

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
8. September 2017 (08.09.2017)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2017/148562 A1**

- (51) Internationale Patentklassifikation:  
F23C 15/00 (2006.01) B01J 8/16 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/000096
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
27. Januar 2017 (27.01.2017)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
10 2016 002 566.2 4. März 2016 (04.03.2016) DE
- (72) Erfinder; und  
(71) Anmelder : BÜCHNER, HORST [DE/DE]; Dahlienweg 1, 98617 Meiningen (DE).
- (74) Anwalt: PETERSEN, Frank; Mannheimer Straße 46, 76131 Karlsruhe (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH,

KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(54) Title: DEVICE AND METHOD FOR THERMAL MATERIAL TREATMENT

(54) Bezeichnung : VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUR THERMISCHEN MATERIALBEHANDLUNG

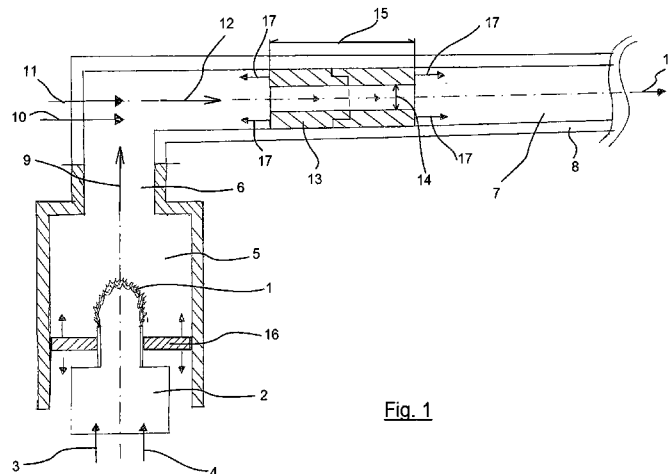
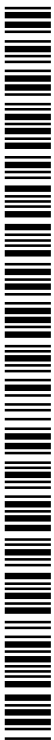


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a method and to a device for the thermal treatment of a raw material (10), having a combustion chamber (5) in which a periodically transient, oscillating flame (1) burns for the purposes of generating a pulsating exhaust-gas stream (9), which exhaust-gas stream flows through a reaction chamber (7) which adjoins the combustion chamber (5). To achieve that the raw material is treated in an effective manner, it is proposed that an insert (13) be provided in the reaction chamber (7), which insert is flowed through by the exhaust-gas stream and is of reduced cross-sectional area (14) in relation to the reaction chamber (7) and has a length (15) shorter than a total length of the reaction chamber (7). In particular, the length (15) of the insert (13) and the geometry of the combustion chamber (5) are variable, such that two resonators are available which can be coordinated with one another.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2017/148562 A1



---

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur thermischen Behandlung eines Rohstoffes (10), mit einer Brennkammer (5), in der eine periodisch instationäre, schwingende Flamme (1) brennt, zur Erzeugung eines pulsierenden Abgasstromes (9), der durch eine an die Brennkammer (5) anschließenden Reaktionsraum (7) strömt. Um zu erreichen, dass der Rohstoff effektiv behandelt wird, wird vorgeschlagen, dass in dem Reaktionsraum (7) ein von dem Abgasstrom durchströmter, in der Querschnittsfläche (14) gegenüber dem Reaktionsraum (7) reduzierter Einsatz (13) vorgesehen ist, der eine Länge (15) aufweist, die kürzer ist als eine Gesamtlänge des Reaktionsraumes (7). Insbesondere sind die Länge (15) des Einsatzes (13) und die Geometrie der Brennkammer (5) veränderbar, so dass man zwei aufeinander abstimmbare Resonatoren hat.

5

## Vorrichtung und Verfahren zur thermischen Materialbehandlung

10

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur thermischen Behandlung eines Rohstoffes, mit einer Brennkammer, in der an wenigstens einem Brenner wenigstens eine periodisch–instationäre, schwingende Flamme brennt zur Erzeugung eines pulsierenden schwingenden Abgasstromes, der durch  
15 einen an die Brennkammer anschließenden Reaktionsraum strömt, sowie ein entsprechendes Verfahren.

Unter einer thermischen Behandlung wird dabei insbesondere eine thermische Materialbehandlung oder auch eine thermische  
20 Materialsynthese verstanden, wobei es sich bei dem Rohstoff auch um ein Rohstoffgemisch handeln kann. Der Rohstoff oder das Rohstoffgemisch können dabei sowohl in fester als auch in flüssiger oder in gas- oder dampfförmiger Form vorliegen.

25 Die weitaus größte Zahl aller technischen oder industriellen Feuerungsanlagen und Verbrennungssysteme werden so ausgelegt und auch so betrieben, dass der Verbrennungsprozess im Mittel zeitlich-konstant abläuft bis auf geringe turbulente Schwankungen, deren Größe mindestens eine Größenordnung kleiner ist als die mittleren Größen des  
30 Verbrennungsprozesses (wie z.B. mittlere Strömungsgeschwindigkeit, mittlere Temperatur der Flamme oder der Abgasströmung, mittlerer statischer Druck in der Brennkammer etc.). Dies bedeutet, dass der Umsatz des eingesetzten Brennstoffes zeitlich kontinuierlich erfolgt und - als Folge hiervon - auch die Wärmefreisetzung aus dem Verbrennungs-  
35 prozess sowie der Massenstrom an anfallendem Abgas (Verbrennungs-

**BESTÄTIGUNGSKOPIE**

produkte) für eine feste Brennereinstellung zeitlich konstante Werte aufweisen.

Abweichend hiervon treten mitunter Phänomene bzw. „Abnormitäten“ auf,  
5 die in der Literatur als Brennkammerschwingungen, selbsterregte  
Verbrennungsinstabilitäten oder thermo-akustische Schwingungen  
bezeichnet werden. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass der  
zunächst stationäre (d.h. zeitlich-konstante) Verbrennungsprozess beim  
Erreichen einer Stabilitätsgrenze plötzlich umschlägt in einen zeitlich-  
10 periodischen, schwingenden Verbrennungsprozess, dessen Zeitfunktion in  
guter Näherung als sinusförmig bezeichnet werden kann. Einhergehend  
mit dieser Änderung werden auch die Wärmefreisetzungsrate(n) der  
Flamme(n) und somit die thermische Feuerungsleistung der  
Verbrennungsanlage sowie die Abgasströmung in und aus der  
15 Brennkammer sowie der statische Druck in der Brennkammer selbst  
periodisch-instationär, d.h. schwingend /1, 2/.

Das Auftreten dieser Verbrennungsinstabilitäten bewirkt oftmals ein  
gegenüber dem stationären Betrieb der Feuerung verändertes Schadstoff-  
20 Emissionsverhalten und verursacht neben einer erhöhten Lärmbelastung  
der Anlagenumgebung auch eine deutlich erhöhte mechanische und/oder  
thermische Belastung der Anlagenstruktur, z.B. der Brennkammerwände,  
der Brennkammerauskleidung etc. Diese Belastungen können bis zu einer  
Zerstörung der Feuerung bzw. einzelner Komponenten führen. Es ist  
25 daher leicht einzusehen, dass das unerwünschte Auftreten der oben  
beschriebenen Phänomene in Feuerungen, die für einen zeitlich-  
konstanten Verbrennungsprozess ausgelegt sind, bei dem auch der  
statische Druck in der Brennkammer oder in vor- bzw. nachgeschalteten  
Anlagenkomponenten ebenfalls konstante Werte besitzen soll  
30 (Gleichdruck-Verbrennung), zwingend vermieden werden muss.

Ganz anders jedoch stellt sich die Situation bei einer kleinen Anzahl von  
sehr speziellen feuerungstechnischen Anlagen dar, von denen bei der  
vorliegenden Erfindung ausgegangen wird und bei denen das oben  
35 dargestellte Phänomen selbsterregter, periodischer Verbrennungs-

instabilitäten absichtlich herbeigeführt und dazu genutzt wird, einen periodischen Verbrennungsprozess mit periodischer Wärmefreisetzungsrates der Flamme und periodischer, schwingender Abgasströmung (pulsierende Heißgasströmung) in der Brennkammer und in nachgeschalteten Anlagenkomponenten (z.B. Wärmetauscher, chemische Reaktoren etc.) zu erzeugen.

Seit mehr als vierzig Jahren wird in der einschlägigen Literatur von chemischen Reaktoren berichtet, in denen eine thermische Behandlung eines aufgegebenen Rohstoffes (Eduktes) oder eine thermisch gesteuerte Materialsynthese aus einem oder mehreren Rohstoffen erfolgt und die typischerweise als Schwingfeuerreaktoren, pulse dryer, pulse combustor oder Pulsationsreaktoren bezeichnet werden /3, 4, 5, 6/.

All diesen Reaktoren ist gemeinsam, dass die thermische Materialbehandlung in einem pulsierenden, schwingenden Heißgasstrom - also zeitlich periodisch-instationär - erfolgt, wobei sowohl die für die thermische Materialbehandlung bzw. Materialsynthese erforderliche Wärme als auch die mechanische Schwingungsenergie der pulsierenden Heißgasströmung aus einem instationären, schwingenden Verbrennungsprozess eines Brennstoffes herrühren. Als Brennstoffe können dabei Erdgas, Wasserstoff, Flüssigbrennstoffe etc. eingesetzt werden.

Der Vorteil dieser Anlagen gegenüber konventionellen, stationär arbeitenden Verbrennungssystemen besteht in der im zeitlichen Mittel periodisch-instationären und turbulenten Abgasströmung in der Brennkammer und in nachgeschalteten Komponenten, z.B. Wärmetauschern, Reaktionsräumen, Resonanzrohren etc.

Diese bewirkt, dass der Wärmeübergang vom Heißgas zunimmt, sowohl auf die festen Wände (Brennkammerwand, Wand eines Wärmetauschers, Dampferzeuger etc.) als auch auf das Material, das zur Behandlung in die Heißgasströmung mit definierter Behandlungstemperatur eingebracht wird. Diese Zunahme ist sehr deutlich und beträgt das Zwei- bis Fünffache gegenüber einer im Mittel stationären, turbulenten Strömung

gleicher mittlerer Strömungsgeschwindigkeit und gleicher Temperatur. Aufgrund dieser Zusammenhänge erfährt zu behandelndes Material in pulsierenden Heißgasströmungen hohe Aufheizgradienten („Thermoschockbehandlung“ /6/).

5

Aufgrund der Analogie zwischen konvektivem Wärmeübergang und dem Stoffübergang gilt obige Aussage auch für den Stoffübergang: Im Falle der periodisch-instationären, schwingenden Strömung steigt die Übergangsrate von gas- oder dampfförmigen Stoffen aus dem Heißgas an das zu behandelnde Material oder vom Material in die Heißgasströmung um ähnliche Werte an. Dies ist begründet durch das nahezu vollständige Fehlen von Grenzschichten, die bei stationären Strömungen bekannterweise entstehen und Diffusions- bzw. Übergangswiderstände darstellen.

15

Die im Stand der Technik beschriebenen Reaktoren /6, 7, 8, 9/ bestehen typischerweise aus einer Brennkammer, in welcher der Reaktionsumsatz des eingesetzten Brennstoffes unter Freisetzung der chemisch darin gebundenen Wärme in einer Flamme oder flammlos erfolgt, sowie in Strömungsrichtung daran anschließend einem Reaktionsraum, der häufig als „Resonanzrohr“ bezeichnet wird. Es ist bekannt, in diesen Reaktionsraum den zu behandelnden Rohstoff zugeben, so dass in dem Reaktionsraum die thermische Materialbehandlung erfolgt. In einigen, besonderen Ausführungen wird der Rohstoff bereits in der Brennkammer aufgegeben.

25

Die Schwingfeuerreaktoren nach dem Stand der Technik haben aber wesentliche Nachteile und technische Probleme:

30

Da die Schwingung die gesamte strömende Heißgassäule im Reaktor umfasst, d.h. das Abgas in der Brennkammer als auch das Heißgas im Reaktionsraum bis hin zum abschließenden Filter, ist die durch den periodisch-instationären Verbrennungsprozess in Schwingung, d.h. in periodische Bewegung zu versetzende Masse heißer Gase sehr groß. Da gleichzeitig jedoch nur ein sehr geringer Teil der thermischen Energie aus

35

dem Verbrennungsprozess in mechanische Schwingungsenergie der (gesamten) Heißgasströmung umgewandelt wird, sind die auftretenden Amplituden der Heißgasschwingung in den großen Volumina der Brennkammer und des Reaktionsraumes außerordentlich gering und  
5 werden durch die Zugabe des (schwingungsenergiefreien) Rohstoffstromes weiter gedämpft.

So ist es im Grenzfall sogar möglich, die üblicherweise selbsterregten Schwingungen der Heißgasströmung durch hinreichend hohe Rohstoff-  
10 Aufgaberaten vollständig zu dämpfen, mit der Konsequenz, dass dann die thermische Materialbehandlung in einem nun nicht mehr schwingenden, sondern statt dessen stationären Heißgasstrom erfolgt. Dieser hat nicht mehr die Vorteile der erhöhten Wärme- und Stoffübertragungsraten.

15 Insbesondere aus diesem Grund sind die heutigen Schwingfeuerreaktoren nach dem Stand der Technik in mehrerer Hinsicht stark limitiert: Die möglichen Rohstoff-Aufgaberaten und damit auch die erzeugbaren Produktmengen pro Zeit sind durch die beschriebene Abnahme der Schwingungsamplituden der Heißgasströmung sehr stark begrenzt, so  
20 dass auch die Anlagenkapazitäten relativ gering sind.

Grundsätzlich würde eine deutliche Erhöhung der Edukt-Aufgaberaten zunächst einmal auch die Erhöhung der zu deren Behandlung erforderlichen Feuerungsleistung erforderlich machen, was aber mit einer  
25 entsprechenden Vergrößerung des entstehenden Abgasvolumenstromes einherginge. Dies würde auch eine starke Vergrößerung des Volumens des Reaktionsraumes erfordern, in dem die Materialbehandlung stattfindet, um so eine gleichbleibende Materialbehandlungsdauer zu gewährleisten. Hierdurch würde die in Schwingung zu versetzende Gasmasse erneut  
30 ansteigen und die erzielbaren Amplituden der Schwingung der Heißgasströmung zur Materialbehandlung würden wieder abnehmen mit der Konsequenz einer abnehmenden Produktqualität.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, diese Beschränkungen zu  
35 überwinden.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass in dem Reaktionsraum ein von dem Abgasstrom durchströmter, in der Querschnittsfläche gegenüber dem Reaktionsraum reduzierter Einsatz  
5 vorgesehen ist, der in Strömungs- bzw. axialer Richtung eine Länge aufweist, die kürzer ist als eine Gesamtlänge des Reaktionsraumes.

Eine erfindungsgemäße Vorrichtung weist somit eine in der Brennkammer in Strömungsrichtung vorne liegende periodisch-instationäre,  
10 schwingende Flamme auf, die einen pulsierenden, ebenfalls schwingenden Heißgas- bzw. Abgasstrom erzeugt. Der im Reaktionsraum eingesetzte, im Querschnitt reduzierte Einsatz kann nun bei entsprechender Abstimmung seiner Länge, des Volumens und der Temperatur des in den Reaktionsraum eingebrachten Heißgases und des in diesem zu  
15 behandelnden Rohstoffes durch die Schwingung des statischen Druckes und der Abgasströmung sowie durch abgestrahlte Schallwellen des periodisch-instationären Verbrennungsprozess in der Brennkammer an dem durch ihn hindurchströmenden Heißgas eine resonanzverstärkte Schwingung anregen, so dass der aufgegebene Rohstoff (Edukt) hier der  
20 gewünschten thermischen Materialbehandlung unterzogen wird.

Damit wird das Heißgas, das den Abgasstrom enthält und schwingt, lediglich im Abschnitt des Einsatzes resonant angeregt.

25 Der Erfindung liegt die folgende Erkenntnis zugrunde:

Bei den im Stand der Technik beschriebenen schwingenden Resonatoren liegt in Wirklichkeit überhaupt kein Resonanzphänomen vor, da es keine periodische Anregungsquelle gibt, die das Gas insbesondere im  
30 Reaktionsraum, der häufig als Resonanzrohr bezeichnet wird, in periodische Schwingungen versetzt bzw. zur Resonanz anregt. Vielmehr handelt es sich hier um eine Systeminstabilität, die den gesamten Reaktor betrifft und für deren Schwingungsfrequenz das gekoppelte Schwingungsverhalten aller Anlagenkomponenten, (d.h. Brenner, Brennkammer,

Reaktionsraum („Resonanzrohr“), Abscheideeinrichtungen (Filter, Zyklon) etc.) verantwortlich ist /10/.

Man erkennt aber an der Verwendung des Begriffs „Resonanz“ für die  
5 auftretenden physikalischen Effekte, dass es hier einen wesentlichen, hartnäckigen Irrtum gibt in Zusammenhang mit den ursächlichen Phänomenen, die der Erzeugung der schwingenden Heißgasströmung zugrunde liegen:

10 Bei dem oben beschriebenen Phänomen der selbsterregten Verbrennungsinstabilitäten handelt es sich nämlich um eine Systeminstabilität, bei der das System beim Erreichen einer anlagenspezifischen Stabilitätsgrenze von einem stationären, schwingungsfreien Betriebszustand (stationärer Verbrennungsprozess) schlagartig in einen periodisch-instationären,  
15 schwingenden Betriebszustand (periodisch-instationärer Verbrennungsprozess) umschlägt, ohne dass eine Fremderregung des Systems vorliegt.

Der Begriff „Resonanz“ entstammt dagegen genau diesem, physikalisch völlig anderen Phänomen einer fremd- oder zwangserregten Schwingung:  
20 Ein schwingungsfähiges System wird durch eine äußere, periodische Anregung (z.B. periodische Krafteinwirkung durch periodische Unwucht etc.) zum „Mitschwingen“ also zum Resonieren angeregt.

Die sich einstellende Schwingungsfrequenz des Reaktors nach dem Stand  
25 der Technik bei selbsterregter Verbrennungsinstabilität entspricht also nicht einer solchen Resonanzfrequenz eines Bauteils wie z.B. des „Resonanzrohres“. Somit kann bei dieser Verfahrensweise auch nicht eine resonanzbedingte Amplitudenverstärkung ausgenutzt werden, wie dies mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung möglich ist.

30 Mit anderen Worten: Bei den Schwingfeuerreaktoren zur thermischen Materialbehandlung nach dem Stand der Technik muss die gesamte, im Reaktor befindliche Heißgassäule (Heißgasströmung) in Schwingung versetzt werden, auch an Stellen, an denen überhaupt keine  
35 Materialbehandlung erfolgt oder der an dieser Stelle stattfindende

Prozessschritt der Materialbehandlung überhaupt nicht von einer vorliegenden Schwingungen der Heißgasströmung profitiert. Dies geht einher mit einer niedrigen Behandlungsamplitude. Man erkennt, dass mit einer erfindungsgemäßen Ausgestaltung durch das Vorsehen eines Einsatzes mit reduzierter Querschnittsfläche und passender Länge in diesem gezielt eine Resonanz der durch den Einsatz hindurchströmenden Heißgasströmung angeregt werden kann, so dass die in Strömungsrichtung vor bzw. hinter dem Einsatz befindlichen Abschnitte des Reaktionsraumes und deren Abmessungen von untergeordneter Bedeutung sind.

Eine weitere starke Beschränkung in der Einsetzbarkeit von Schwingfeuerreaktoren zur thermischen Materialbehandlung nach dem Stand der Technik besteht darin, dass für eine erfolgreiche thermische Behandlung von Rohstoffen eine stoffspezifische Materialbehandlungsdauer, d.h. eine von dem zu erzeugenden Produkt und den gewünschten Produkteigenschaften abhängige Mindestverweilzeit der Rohstoffe in der Heißgaszone des Reaktors, zwingend erforderlich ist. Wird diese Mindestverweilzeit unterschritten, so ist der Reaktionsablauf/Reaktionsumsatz nicht abgeschlossen und das gewünschte Produkt noch nicht „fertig“ thermisch behandelt.

Bei in der Patentliteratur beschriebenen Schwingfeuerreaktoren erfolgt die Materialbehandlung typischerweise im Reaktionsraum, der dort wie erwähnt häufig als „Resonanzrohr“ bezeichnet wird. Die erreichbare Materialbehandlungsdauer bei diesen vorbekannten Reaktoren hängt somit bei gegebener Strömungsgeschwindigkeit der Heißgasströmung, die festgelegt ist durch die Feuerungsleistung und die Luftzahl der Verbrennung, sowie ggf. zusätzlicher Zugabe von Kühlluft und der Rohstoff-Aufgaberate, und bei gegebener Rohrquerschnittsfläche des Reaktionsraumes direkt von dessen Länge ab. Eine Erhöhung der Materialbehandlungsdauer durch eine Verlängerung des Reaktionsraumes würde gleichzeitig die Schwingungsfrequenz der Schwingung der Heißgasströmung erniedrigen und auch die erzielbaren Amplituden der

Heißgasschwingung durch die erhöhte Gesamtmasse der nun in Schwingung zu versetzenden Gassäule im Reaktionsraum weiter reduzieren.

Man erkennt hier leicht die technischen Nachteile der Reaktoren nach dem  
5 heutigen Stand der Technik: Schwingungsfrequenz und -amplitude und die Materialbehandlungsdauer hängen miteinander gekoppelt von der Reaktorgeometrie ab, insbesondere von der Länge des Reaktionsraumes in Strömungsrichtung. Eine Verlängerung der Verweilzeit geht somit im  
10 Stand der Technik nur auf Kosten erniedrigter Frequenzen und Amplituden der Heißgasschwingung und somit auf Kosten reduzierter Wärme- und Stoffübertragungsraten vom Heißgas auf den zu behandelnden Rohstoff und somit auch auf Kosten der Vorteile einer thermischen Materialbehandlung im schwingenden Heißgasstrom.

15 Diese Probleme werden mit der erfindungsgemäßen Ausgestaltung eines Schwingungsreaktors ebenfalls überwunden.

Bei einer Weiterbildung der Erfindung kann der im Reaktionsraum vorgesehene Einsatz in seiner durchströmten Länge veränderbar sein.

20 Es ist außerdem möglich, dass alternativ oder zusätzlich auch die Brennkammer in ihrer Geometrie veränderbar ist.

Während ein erfindungsgemäßer Reaktor wie bisher beschrieben die  
25 gewünschte Resonanz im Einsatz lediglich an einem speziellen Betriebspunkt des Reaktors mit ganz spezifischen Randbedingungen zeigt, hat ein derart weitergebildeter Reaktor damit zumindest einen, ggf. auch zwei frequenzmäßig abstimmbare Resonatoren. Dies hat zur Folge, dass der Reaktor auf eine Vielzahl von unterschiedlichen Betriebszuständen  
30 bzw. Betriebspunkten einstellbar ist.

Diesbezüglich sei darauf hingewiesen, dass z.B. die Resonanz innerhalb des Einsatzes von der Schallgeschwindigkeit abhängig ist, die wiederum temperaturabhängig ist. Die Temperatur ist dabei u.a. durch die

Verbrennungstemperatur, die evtl. Zumischung von Kühlluft, der Menge und der Temperatur des Rohstoffes/Eduktes usw. beeinflusst.

Bei einem wie erläutert weitergebildeten Reaktor kann also am in  
5 Strömungsrichtung ersten Resonator – nämlich der Brennkammer – eine  
Abstimmung bzgl. der Randbedingungen vorgenommen werden als auch  
am in Strömungsrichtung zweiten Resonator, nämlich dem im Querschnitt  
reduzierten Einsatz.

10 Der erste Resonator weist somit einen Brenner auf mit den zugehörigen  
Versorgungsanschlüssen für Brennstoff und Verbrennungsluft, eine  
Flamme sowie eine Brennkammer, die als Resonator fungiert, welche in  
Hinblick auf ihre Geometrie und die das daraus resultierende  
Schwingungsverhalten der in ihr enthaltenen Gassäule (Abgas des  
15 Verbrennungsprozesses aus der Flamme) im Frequenzbereich zwischen 50  
und 1.000 Hz frequenzmäßig abstimmbare ist. Die Vorrichtung ist geeignet  
zur gezielten Erzeugung selbsterregter Verbrennungsinstabilitäten im  
Reaktorteil Brenner-Flamme-Brennkammer, also im ersten Resonator.

20 Verbunden durch eine bevorzugt isolierte Rohrleitung, in die bei Bedarf  
Kühlluft zur Einstellung einer gewünschten Materialbehandlungstemperatur  
zugegeben werden kann, wird das schwingende, d.h. periodisch-instationär  
strömende Heißgas aus dem schwingenden  
Verbrennungsprozess der Flamme in der Brennkammer, also aus dem  
25 ersten Resonator, dem Reaktionsraum zugeführt. In diesem findet dann  
die Eduktzugabe und somit auch die thermische Materialbehandlung statt,  
letztere insbesondere in dem in den Reaktionsraum integrierten zweiten  
Resonator.

30 Durch Abstimmung der Schwingungsfrequenz des periodisch-instationären  
Verbrennungsprozesses im ersten Resonator (selbsterregte Verbrennungsinstabilität mit schwingender Flamme) bei der dort vorliegenden  
Verbrennungstemperatur auf das Resonanzverhalten des zweiten Resonators mit der dort vorliegenden Materialbehandlungstemperatur, die  
35 typischerweise aufgrund von Kühlluft- und Eduktzugabe niedriger als die

Verbrennungstemperatur im ersten Resonator ist, erfolgt eine abgestimmte resonante Anregung des zweiten Resonators durch die ihm übertragene periodische Anregung, die aus der Verbrennungsschwingung im ersten Resonator resultiert und die durch periodische Schwingungen des statischen Druckes und der Heißgasströmung charakterisiert ist.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass sowohl alternativ als auch kumulativ der zweite Resonator durch Veränderung seiner durchströmten Länge auch an die Frequenz des ersten Resonators anpassbar ist – oder besser gesagt: an die Frequenz der aus dem ersten Resonator austretenden, den zweiten Resonator als Schallwelle anregenden Schwingung. Der an seinen beiden Enden offene Einsatz, also der zweite Resonator besitzt als  $\frac{1}{2}$ -Wellen-Resonator seine Grundfrequenz-Resonanz bei gegebener Schallgeschwindigkeit (und somit bei gegebener Materialbehandlungstemperatur) genau dann, wenn eine halbe Wellenlänge der Schallwelle bzw. Schwingung in den Einsatz, also den zweiten Resonator passt. Es bildet sich so eine stehende Halbwelle in diesem  $\frac{1}{2}$ -Wellen-Resonator, die zur Materialbehandlung genutzt wird. – Die Länge des hier diskutierten zweiten Resonators korreliert somit mit der Temperatur, die in ihm für die Materialbehandlung herrscht, da diese die im Einsatz vorliegende Schallgeschwindigkeit beeinflusst, die wiederum bzgl. der im Einsatz erwünschten Schwingung von Relevanz ist.

Im Gegensatz zu den in der Literatur beschriebenen Schwingfeuerreaktoren liegt hier bezogen auf die Schwingungserzeugung im zweiten Resonator, also im eigentlichen Reaktionsraum der Materialbehandlung, eine echte Fremd- oder Zwangserregung mit Resonanz vor. Je nach frequenzmäßiger Abstimmung der Anregungsfrequenz und Schwingungsdämpfung können im zweiten Resonator resonanzbedingte Überhöhungen (Verstärkung) der Anregung bis zu einem Faktor Zehn eingestellt werden. Hier liegt also tatsächlich eine aktive Beeinflussungsmöglichkeit der Schwingungsamplituden im Reaktionsraum bei der thermischen Materialbehandlung vor.

Unabhängig hiervon wird erfindungsgemäß ein weiteres Problem der Schwingfeuerreaktoren nach dem Stand der Technik gelöst: Unabhängig von der Wahl der Anregungsfrequenz aus dem ersten Resonator ist die Dauer der Materialbehandlung im Reaktionsraum bzw. im zweiten Resonator unabhängig von der dort vorliegenden Schwingungsfrequenz der Heißgasströmung, solange der mittlere Durchsatz bzw. die mittlere Strömungsgeschwindigkeit konstant gehalten wird, da sich die Länge des zweiten Resonators (d.h. die Länge des „Resonanzrohres“) nicht ändern muss, damit dort unterschiedliche Materialbehandlungsfrequenzen vorliegen.

Somit ist die Frequenz der Materialbehandlung in der pulsierenden Heißgasströmung physikalisch entkoppelt von der Dauer der Materialbehandlung im Reaktionsraum bzw. im zweiten Resonator. Somit stellen beide Größen nun unabhängige Verfahrensparameter der thermischen Materialbehandlung dar.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, mit diesem Verfahren auch direkt Oberwellen, d.h. höhere harmonische Resonanzfrequenzen des zweiten Resonators im Reaktionsraum gezielt anzuregen.

Handelt es sich bei diesem Resonator beispielsweise um einen  $\frac{1}{2}$ -Wellen-Resonator mit beispielsweise einer Grundschwingungsfrequenz von 100 Hz bei gegebener Heißgas- bzw. Materialbehandlungstemperatur, so wären somit Frequenzen von 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz ... etc. gezielt zur thermischen Materialbehandlung anregbar.

Überraschenderweise hat sich gezeigt, dass die erzielten Materialeigenschaften der behandelten Produkte bei gleicher Materialbehandlungstemperatur von dem Produkt aus Behandlungsfrequenz und Behandlungsdauer abhängen. D.h. bei einer Behandlungsfrequenz von 100 Hz und einer Materialbehandlungsdauer von 400 Millisekunden wird dasselbe Ergebnis in Hinsicht auf Produkteigenschaften und Produktqualität erreicht wie bei 400 Hz und 100 Millisekunden.

Ein Grund hierfür wird darin vermutet, dass die zu behandelnden Partikel eines Rohstoffes während ihrer Behandlung in beiden Fällen dieselbe Anzahl von Schwingungszyklen im Reaktionsraum sprich insbesondere innerhalb des Einsatzes erleben.

5

Ist man also bei einer erfindungsgemäßen Vorrichtung in den Lage, die Frequenzen der thermischen Materialbehandlung durch eine gezielte Anregung des zweiten Resonators im Reaktionsraum deutlich zu erhöhen, beispielsweise durch eine gezielte Resonanzanregung der Oberwellen des zweiten Resonators, kann man gleichzeitig die zur vollständigen thermischen Behandlung des Rohstoffes notwendigen Verweilzeiten und somit die Größe bzw. das Volumen des Reaktionsraumes (oder die Länge des erforderlichen Resonanzrohres bei fester Querschnittsfläche) deutlich reduzieren.

15

Damit sinkt aber gleichzeitig die notwendige Gasmasse, die in Schwingung versetzt werden muss im Vergleich zu den in der Patentliteratur beschriebenen Vorrichtungen und Verfahren, bei denen die Heißgassäule des gesamten Schwingfeuerreaktors mit deutlich größerer Gasmasse in Schwingung versetzt werden muss. Damit und mit der zuvor beschriebenen, resonanzbedingten Überhöhung (Verstärkung) der Schwingungsamplitude im zweiten Resonator können dort somit erheblich größere Rohstoff-Massenströme bei gleicher mittlerer Feuerungsleistung des Reaktors behandelt werden als bei Reaktoren nach dem Stand der Technik durchgesetzt werden. – Der erzielbare Reaktordurchsatz steigt dementsprechend deutlich an und verbessert die Rentabilität des thermischen Prozesses.

Abschließend sei der guten Ordnung halber darauf hingewiesen, dass der Typ des Resonators (Helmholtz-Resonator,  $\frac{1}{4}$ -Wellen-Resonator,  $\frac{1}{2}$ -Wellen-Resonator), der als erster Resonator und/oder als zweiter Resonator 2 eingesetzt wird, grundsätzlich nicht von Bedeutung ist, solange sichergestellt ist, dass die mit der Erzeugung selbsterregter Verbrennungsinstabilitäten im ersten Resonator (Brennkammer) einhergehenden Schwingungsfrequenzen des statischen Druckes und der

35

Strömungsgeschwindigkeit der aus dem instationären Verbrennungsprozess resultierenden, schwingenden Heißgasströmung geeignet sind, um den zweiten Resonator im Reaktionsraum für die thermische Materialbehandlung resonant anzuregen.

5

Bei einer weiter bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist der im Reaktionsraum vorgeschlagene Einsatz in seiner axialen Position innerhalb des Reaktionsraumes und somit parallel zu seiner axialen Erstreckung veränderbar.

10

Der Vorteil dieser Weiterentwicklung wird bei nachfolgender Betrachtung ersichtlich:

Typischerweise besteht eine thermische Materialbehandlung in einem Schwingfeuerreaktor beispielsweise beim Einsatz eines flüssigen Rohstoffes (z.B. Rohstoff-Lösung oder wässrige Suspension mit Feststoffanteil) aus folgenden Einzelschritten:

20

- Zerstäubung des flüssigen Rohstoffes z.B. mit Hilfe einer Zerstäuberdüse
- Aufheizung und Verdampfung der Rohstoff-Lösung/Trocknung des Feststoffes
- Aufheizen des Rohstoffes auf Materialbehandlungstemperatur
- Thermische Behandlung z.B. Kalzination, Ablauf von Festkörperreaktionen, Entgasung
- Kristallwachstum/Kristallumwandlungen,
- usw.

25

Es ist sehr unwahrscheinlich, dass alle diese physikalisch sehr unterschiedlichen Einzelschnitte der thermischen Materialbehandlung in einem Schwingfeuerreaktor im gleichen Maße von einer Schwingung der Heißgasströmung um die zu behandelnden Tropfen/Partikel herum

30

profitieren gegenüber einer thermischen Behandlung in einer stationär strömenden, nicht schwingenden Heißgasströmung.

Bei den im Stand der Technik beschriebenen Reaktoren wird jedoch die  
5 gesamte strömende Heißgassäule im gesamten Reaktorraum in Schwin-  
gung versetzt mit der Konsequenz einer großen und trägen Gasmasse mit  
erheblicher Schwingungsdämpfung und daraus resultierend kleinen  
Schwingungsamplituden und niedrigen Schwingungsfrequenzen der  
oszillierenden Heißgasströmung.

10

Mit der hier beschriebenen, besonders bevorzugten Weiterbildung der  
Erfindung besteht hingegen die Möglichkeit, in dem nach außen gas- und  
wärmedicht abgeschlossenen Reaktorgehäuse den eigentlichen Reaktions-  
raum der Materialbehandlung, d. h. den zweiten Resonator bzw. den eine  
15 axiale Erstreckung aufweisenden Einsatz an genau jener Stelle zu  
positionieren, an der entsprechend des dort ablaufenden Einzelschrittes  
bzw. physikalischen Teilprozesses der thermischen Materialbehandlung  
das Produkt die stärkste Veränderung seiner erzielbaren  
Materialeigenschaften erfährt im Vergleich zu einer thermischen  
20 Behandlung in einer stationären Heißgasströmung ohne Schwingungen.

Eine derartige optimierende Position des Einsatzes kann in Vorversuchen  
durch Wiederholung der Materialbehandlung bei unterschiedlich  
positioniertem Einsatz innerhalb des Reaktorraumes anhand der  
25 gemessenen Materialeigenschaften so gefertigter Produktmuster einfach  
festgestellt werden.

Als besonderer Vorteil ist noch zu erwähnen, dass das Material nach  
Durchlaufen der thermischen Behandlung im zweiten Resonator mit einem  
30 über eine gewisse Länge reduziertem Durchmesser mit sich aufgrund  
Massenkonstanz ergebender erhöhter Strömungsgeschwindigkeit bei sich  
demgemäß ergebenden hohen Behandlungsfrequenzen und kurzer  
Verweilzeit (typischerweise unter 200 Millisekunden, bevorzugt unter 100  
Millisekunden) im nachgeschalteten Reaktorteil mit wieder erhöhtem  
35 Reaktordurchmesser und daher deutlich abgesenkten Strömungs-

geschwindigkeiten eine thermische Nachbehandlung erfährt, die zum vollständigen Abbau unerwünschter Restkomponenten der Rohstoffmischung/Rohstofflösung genutzt werden kann.

5 So kann beispielsweise bei Verarbeitung eines nitrathaltigen Rohstoffes der Rest-Nitratgehalt im Produkt oder bei organischen Komponenten im Rohstoff der Rest-Kohlenstoffgehalt im Produkt deutlich gesenkt oder völlig vermieden werden. Um dies sicher zu gewährleisten, sind Nachbehandlungsdauern im Reaktionsraum stromab des zweiten  
10 Resonators größer 2 Sekunden, bevorzugt größer 3 Sekunden einzuhalten.

Als Letztes sei noch darauf hingewiesen, dass auch der in seiner axialen Position im Reaktionsraum verschiebbare Einsatz bzw. Resonator so  
15 ausgeführt werden kann, dass er hinsichtlich seiner Resonanzfrequenz insbesondere durch die Veränderung bzw. Einstellung seiner axialen Länge einstellbar, also frequenzmäßig abstimmbar ausgestaltet ist.

Typischerweise können mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung und dem  
20 zugehörigen Verfahren feinteilige Partikel mit einer mittleren Partikelgröße im Bereich von 5 nm bis 100 µm erzeugt werden. Durch dieses erfindungsgemäße Verfahren lassen sich gezielt feinteilige Partikel beispielsweise in Form von Karbiden, Nitriden, einfache Oxiden, komplexen Mischoxiden, Oxiden mit Dotierungen, Mischungen aus Oxiden  
25 oder beschichtete Partikel erzeugen.

Dazu wird aus Edukten eine sogenannte Präkursorenmischung hergestellt, die zumindest alle Bestandteile der zu bildenden festen Partikel beinhaltet.  
30

Für den Spezialfall, dass nur ein Edukt benötigt wird, findet im Folgenden dennoch der Begriff Präkursorenmischung Anwendung.

Die aus den Rohstoffkomponenten gebildete Präkursorenmischung kann  
35 dabei sowohl als Feststoff, beispielsweise in Form eines feinteiligen

Pulvers oder Pulvermischung, in Form einer Lösung, einer Suspension, einer Dispersion bzw. Emulsion, eines Gels, als Gas oder Dampf vorliegen.

Bei Verwendung von flüssigen Rohstoffmischungen, wie Lösungen,  
5 Dispersionen oder Emulsionen resultieren besonders sphärische Partikel.

Durch einen ein- oder mehrstufigen nasschemischen Zwischenschritt kann die Präkursorenmischung so konditioniert werden, dass sich eine spezifische Partikelform oder Größe im thermischen Prozess einstellt, zum  
10 Beispiel eine besonders enge Kornverteilung der Partikel. Für den nasschemischen Zwischenschritt können bekannte Methoden wie beispielsweise Cofällung oder Hydroxidfällung angewandt werden.

Die genannten Formen der Präkursorenmischung werden in den  
15 Heißgasstrom der erfindungsgemäßen Vorrichtung aufgegeben, beispielsweise durch Einsprühen, Einleiten oder Einblasen. Die Art der Präkursorenaufgabe, wie beispielsweise Art, Durchmesser und Sprühbild einer hierfür benutzten Mehrstoffdüse, die Zuführungsrichtung (z.B. Einsprührichtung) und der Zuführungsort beeinflussen die Prozessführung  
20 und das resultierende thermische Behandlungsregime und sind damit bedeutende Steuergrößen für die resultierenden Partikeleigenschaften.

Die sich bildenden Partikel werden mit dem Heißgasstrom durch den Reaktor transportiert und in diesem Heißgasstrom thermisch behandelt.  
25 Die Eigenschaften des Heißgasstroms beeinflussen damit maßgeblich die thermische Behandlung und somit die Eigenschaften der sich bildenden Partikel. Die erfindungsgemäße Vorrichtung bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten zur gezielten Einstellung von Prozessparametern für die erfindungsgemäße thermische Erzeugung und/oder Behandlung dieser  
30 feinteiligen Partikeln. Einstellbar sind auf für den Fachmann bekannte Art und Weise beispielsweise das Temperaturprofil, die maximale Prozesstemperatur, die Verweilzeit der Gasströmung sowie die Verweilzeit der Partikel in der Gasströmung.

Eine Besonderheit der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist, dass der Heißgasstrom in Schwingungen versetzt werden kann. In schwingenden bzw. pulsierenden Heißgasströmungen resultiert ein deutlich erhöhter Wärmeübergang aufgrund der hohen Strömungsturbulenzen. Der  
5 Wärmeübergang beeinflusst maßgeblich die Reaktions- und Phasenbildungsmechanismen bei der Stoffumwandlung bzw. bei der Phasenbildung. Mit der Wahl der Frequenz und Amplitude der pulsierenden Gasströmung kann die Reaktionsbedingungen an die Erfordernisse des herzustellenden Materials exakt angepasst werden.

10

Bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung besteht die Möglichkeit, den Gasraum der thermischen Materialbehandlung, d.h. den zweiten Resonator durch eine äußere, periodische Erregung zum Resonieren anzuregen. Im Resonanzfall resultiert dann daraus eine 8-10 mal höhere  
15 Amplitude der Gassäulen-Schwingung bei der thermischen Materialbehandlung innerhalb des zweiten Resonators als bei einer Erregung mit Frequenzen außerhalb dieses Resonanzbandes. Die sich daraus ergebenden höheren Amplituden erhöhen den Wärme- und Stoffübergang signifikant.

20

Auch höhere Frequenzen steigern den Wärme- und Stoffübergang erheblich. Da durch die erfindungsgemäße Vorrichtung auch hohe Oberfrequenzen, also sehr hohe Frequenzen zum Beispiel im Bereich größer 300 Hz erzeugt werden können, ergibt sich hier ein weiterer  
25 Einstellparameter für einen besonders hohen Wärmeübergang.

Die Geschwindigkeit der Wärmeübertragung definiert dabei maßgeblich die Aufheizgeschwindigkeit der Präkursoren bzw. Partikel und damit das tatsächlich wirkende Temperaturprofil. Höhere Amplituden und höhere  
30 Frequenzen des pulsierenden Gasstroms beschleunigen die Reaktions- und Phasenbildungsmechanismen. Damit kann beispielsweise ein höherer Reaktionsumsetzungsgrad der Präkursorenmischung bei vergleichbarer Verweilzeit erreicht oder die Aktivität bei beispielsweise katalytischen Materialien erhöht werden. Die erfindungsgemäße Möglichkeit für deutlich  
35 höhere Amplituden und höhere Frequenzen als bei konventionellen

Systemen erweitert damit die Möglichkeiten zur Prozessführung, erweitert das mögliche Stoffspektrum der zu behandelnden Materialien, verbreitet die einstellbaren Partikeleigenschaften und vereinfacht die Prozessführung.

5

In Abhängigkeit vom Stoffsystem haben die Frequenz und Amplituden der schwingenden Heißgasströmung unterschiedlich starken Einfluss auf Teilreaktionsschritte wie Trocknung, Aufheizung, (zeitlich) unterschiedliche Phasenreaktionen, Abkühlung usw. und somit auf die Partikelbildung und/oder die thermische Partikelbehandlung.

10

Mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung und dem erfindungsgemäßen Verfahren kann der Reaktionsabschnitt bzw. die Reaktionsabschnitte, bei dem/denen beispielsweise die gewünschte Beeinflussung durch hohe Amplituden und Frequenzen besonders stark ist, gezielt gewählt werden, indem die axiale Positionierung des zweiten, eine gewisse axiale Erstreckung aufweisenden Resonators innerhalb des Reaktors und der Aufgabeeort der Präkursorenmischung entsprechend ausgewählt wird.

15

In einer besonders bevorzugten Ausführungsform erfolgt eine zumindest teilweise Beschichtung von Partikeln durch eine geeignete Präkursorenkombination einer hergestellten Präkursorenmischung in Ausbildungsform einer Dispersion. Dabei beinhaltet beispielsweise die feste Phase bei Suspensionen bzw. die innere Phase bei der Emulsion zumindest alle Komponenten, die zur Bildung der zu beschichtenden Partikel erforderlich sind. Die flüssige Phase bei der Suspension bzw. die äußere Phase bei der Emulsion beinhalten zumindest alle Beschichtungskomponenten. Durch die Wahl eines geeigneten thermischen Behandlungsregimes gelingt so die Bildung der festen Partikel und eine zumindest teilweise Beschichtung dieser Partikel.

20

25

30

Die im erfindungsgemäßen pulsierenden Heißgasstrom erzeugten feinteiligen Partikel werden abschließend mit einer geeigneten Abscheideeinrichtung von dem Heißgasstrom abgetrennt. Das Heißgas wird gegebenenfalls vor seinem Eintritt in die Abscheideeinrichtung auf eine je

35

nach dem Typ der Abscheideeinrichtung erforderliche Temperatur abgekühlt. In einer bevorzugten Ausführungsform erfolgt die Abtrennung der gebildeten Partikel vom Heißgasstrom bei Temperaturen oberhalb 300 °C, bevorzugt oberhalb 500 °C, besonders bevorzugt oberhalb 5 600 °C, beispielsweise durch einen Zyklon oder einen Heißgasreaktor. Dadurch kann beispielsweise verhindert werden, dass stark reaktive Partikel Heißgaskomponenten, wie beispielsweise Wasser, aufnehmen. Das Heißgas kann in dieser Ausführungsform bei Bedarf nach dem Filter abgekühlt werden.

10

Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen. Dabei zeigt:

Fig. 1 die Prinzipskizze einer Vorrichtung zur thermischen Behandlung 15 eines Rohstoffes mit einer Brennkammer, einem Reaktionsraum und einem in dem Reaktionsraum integrierten Einsatz, bei der die Brennkammer in ihrer Geometrie veränderbar ist;

Fig. 2 die Prinzipskizze einer Vorrichtung gemäß Fig. 1 mit einer anderen Veränderbarkeit der Brennkammer-Geometrie.

20

In Fig. 1 erkennt man die Prinzipskizze eines Reaktors zur thermischen Behandlung eines Rohstoffes innerhalb eines periodisch-instationär schwingenden Heißgasstromes. Dieser Heißgasstrom wird durch eine Flamme 1 an einem Brenner 2 erzeugt, wozu diesem Brennstoff 3 und 25 Verbrennungsluft 4 zugeführt werden. Die Flamme 1 brennt dabei in einer Brennkammer 5.

Unter Brennstoff versteht man Brenngase wie Erdgas, Methan, Wasserstoff oder Flüssigbrennstoffe wie Alkohol etc. Unter Verbrennungsluft wird 30 im Rahmen dieser Anmeldung allgemein ein Oxidationsmittel verstanden, das den für die Verbrennung benötigten Sauerstoff bereitstellt. Außer Luft gehört hierzu beispielsweise auch reiner Sauerstoff oder mit Sauerstoff angereicherte Luft etc.

- Grundsätzlich ist es möglich, durch eine entsprechende schwingende Versorgung der Flamme mit einem zeitlich periodisch modulierten Brennstoff/Luft-Gemisch oder mit einer zeitlich periodisch modulierten Strömung von Verbrennungsluft die Flamme fremderregt zu betreiben. Die
- 5 Veränderbarkeit des Massenstroms an Brennstoff/Luft-Gemisch wird dabei insbesondere im Fall einer Vormisch-Verbrennung bevorzugt bzw. eine Veränderung im Massenstrom der Verbrennungsluft insbesondere im Fall einer Diffusionsverbrennung.
- 10 Im Übrigen wird die Verbrennung so betrieben, dass sie einen periodisch-instationären, schwingenden Betriebszustand hat. Hierbei wird die Frequenz der pulsierenden Verbrennung z.B. durch die Geometrie der Brennkammer als auch durch die Prozesstemperatur beeinflusst.
- 15 Die mit der pulsierenden Flamme letztlich erzeugte pulsierende Heißgasströmung strömt durch ein Koppelrohr 6 in einen Reaktionsraum 7, dessen Wandung 8 gas- und wärmedicht ist. Die Wärmedichtigkeit kann dabei insbesondere durch eine separate Isolierung gewährleistet werden.
- 20 In den aus dem Koppelrohr 6 ausströmenden Abgasstrom 9 wird zum einen ein zu behandelnder Rohstoff 10 aufgegeben als auch Kühlluft 11. Damit bildet sich ein Heißgasstrom 12, der durch den Reaktionsraum 7 hindurchströmt und an dessen Ende durch einen hier nicht mehr dargestellten Heißgasfilter oder Zyklon geleitet wird, in dem der im Reak-
- 25 tionsraum 7 thermisch behandelte Rohstoff 10 aus dem Heißgasstrom abgeschieden wird.
- Wesentlich ist jetzt, dass in dem Reaktionsraum 7 ein Einsatz 13 vorgesehen ist, der über eine gewisse, sich in Axial- und Strömungsrichtung
- 30 erstreckende Länge eine gegenüber dem Reaktionsraum 7 reduzierte Querschnittsfläche 14 aufweist.
- Im hier dargestellten Beispiel ist dieser Einsatz 13 als ein Einzelrohr ausgebildet und hat eine durchströmte axiale Länge 15, die lediglich einen
- 35 Bruchteil der Gesamtlänge des Reaktionsraumes 7 hat. Außerdem ist der

Einsatz 13 im Wesentlichen gasdicht an die Wandung 8 des Reaktionsraumes angeschlossen, so dass der Heißgasstrom 12 vollständig durch den in Radialrichtung innenliegenden freien Querschnitt des Einsatzes 13 strömt, nicht aber seitlich an diesem vorbei.

5

Der Einsatz 13 ist dabei in seiner axialen Länge 15 verstellbar, so dass die Möglichkeit besteht, ihn in seiner Länge derart einzustellen, dass er auf die Schwingungsfrequenz des periodisch instationären Verbrennungsprozesses in der Brennkammer 5 so abgestimmt ist, dass die von diesem angeregte periodisch instationäre Heißgasströmung 12 bei ihrem Hindurchtreten durch den Einsatz 13 resonant angeregt wird und so im Bereich dieses Einsatzes 13 in eine fremd- bzw. zwangserregte Schwingung übergeht. Die sich hier resonanzbedingt einstellenden Überhöhungen der Anregungen können bis zum Faktor 10 gehen.

15

Die Resonanzfrequenz innerhalb des Einsatzes 13 ist dabei insbesondere abhängig von der Temperatur des Heißgasstromes 12, da diese Temperatur die für die Resonanzzeugung relevante Schallgeschwindigkeit beeinflusst. Des Weiteren ist die Resonanzfrequenz auch abhängig von der axialen Länge 15 des Einsatzes 13.

20

Der Einsatz 13 wird im Folgenden auch als zweiter Resonator bezeichnet.

In dem hier dargestellten Beispiel ist auch die Brennkammer 5 durch das Vorhandensein eines verschiebbaren Bodens 16 verstellbar. Im Folgenden wird die insoweit beschriebene Baugruppe auch als erster Resonator bezeichnet. Mit der Verstellbarkeit des ersten Resonators hat man eine weitere Stellgröße über die eine echte Resonanz innerhalb des zweiten Resonators also des Einsatzes 13 im Reaktionsraum 7 justiert werden kann.

30

Um die Bedeutung und die Funktionsweise von zwei frequenzmäßig abstimmbaren Resonatoren in dem hier beschriebenen Reaktor zu erläutern und zu veranschaulichen, wird nachfolgend eine beispielhafte

Berechnung vorgestellt, ohne jedoch die Allgemeingültigkeit durch diese konkrete Beispielrechnung einschränken zu wollen:

Der erste Resonator mit der Brennkammer 5 soll als  $\frac{1}{4}$ -Wellen-Resonator  
5 ausgeführt sein mit einer veränderbaren Länge zwischen 0,5 m und  
1,0 m. Aufgrund der einstellbaren Brenner-/Flammenparameter (Brenn-  
gasmassenstrom, Luftmassenstrom, Luftzahl, Vorwärmtemperatur der  
Luft, etc.) soll die Flamme 1 stabil schwingend brennen in einem  
Temperaturbereich der Flamme 1 bzw. des Abgasstromes 9, welcher von  
10 der Flamme 1 erzeugt wird, zwischen 800 °C und 1.800 °C. Entsprechend  
der gewählten Verbrennungstemperatur stellen sich im ersten Resonator  
Schallgeschwindigkeiten zwischen ca. 630 m/s und 830 m/s ein. (Zur  
Vereinfachung wird hier nur mit Luft als Medium gerechnet und nicht mit  
der vollständigen Abgaszusammensetzung.) Gemäß der eingestellten  
15 Länge des ersten Resonators entstehen Schwingungsfrequenzen bei  
Entstehung selbsterregter Verbrennungsschwingungen im ersten  
Resonator zwischen ca. 160 Hz bis ca. 420 Hz. Die niedrigste Temperatur  
von ca. 800 °C und die größte Länge des ersten Resonators von 1.0 m  
ergeben z.B. die niedrigste Frequenz des schwingenden  $\frac{1}{4}$ -Wellen-  
20 Resonators von ca. 160 Hz. Mit dieser kann der nachfolgende zweite  
Resonator im Reaktionsraum zu Resonanz angeregt werden.

Im Einsatz 13 als zweiten Resonator, der als  $\frac{1}{2}$ -Wellen-Resonator  
ausgeführt ist, soll eine thermische Materialbehandlung im Temperatur-  
25 bereich zwischen 200 °C und 800 °C ermöglicht werden unter resonanter  
Anregung des zweiten Resonators mittels der einstellbaren Verbrennungs-  
schwingung im ersten Resonator. Die Schallgeschwindigkeiten im zweiten  
Resonator betragen im für die Materialbehandlung gewünschten Tempe-  
raturbereich 430 m/s bis 630 m/s.

30

Im Falle einer gewählten durchströmten Länge 15 des zweiten Resonators  
von 2,0 m wäre bei der höchsten Materialbehandlungstemperatur von 800  
°C die Resonanz-Grundfrequenz ca. 160 Hz und wäre somit gerade noch  
mit der niedrigsten, einstellbaren Schwingungsfrequenz im ersten  
35 Resonator bei 800 °C Flammen-/Abgastemperatur resonant anregbar.

Würde jedoch eine Materialbehandlungstemperatur im zweiten Resonator von 200 °C gewünscht, so betrüge die Resonanzfrequenz des zweiten Resonators bei dieser Temperatur und einer durchströmten Länge 15 des zweiten Resonators ca. 105 Hz. Der zweite Resonator wäre somit nicht  
5 mehr durch den ersten Resonator mit dessen minimaler Schwingungsfrequenz bei 800 °C von 160 Hz resonant zur Grundschwingung anregbar.

In diesem gewünschten Fall müsste die Länge 15 des Einsatzes 13 als  
10 zweiter Resonator auf ca. 1,34 m reduziert werden, um bei 200 °C Materialbehandlungstemperatur gerade eine Resonanzfrequenz als Grundschwingung von ca. 160 Hz im zweiten Resonator zu erreichen, welche dann durch den ersten Resonator bei dessen Minimalfrequenz von 160 Hz resonant angeregt werden könnte.

15 Man kann an dem erläuterten Beispiel leicht die Vorteile erkennen, die entstehen, wenn beide Resonatoren frequenzmäßig über individuelle Geometrieinstellungen aufeinander und auf die gewünschten Temperaturen abgestimmt werden können.

20 Ein weiterer Gesichtspunkt der vorliegenden Erfindung ist, dass der Einsatz 13 in seiner axialen Position innerhalb des Reaktionsraumes 7 entsprechend den Pfeilen 17 bedarfsgerecht positioniert werden kann.

25 Im Heißgasstrom 12 beförderte Rohstoffpartikel werden somit zunächst in dem Bereich vor dem Einsatz 13 mit der Heißgasströmung 12 mit der im Reaktionsraum 7 vorhandenen Frequenz und Amplitude beaufschlagt, dann innerhalb des freien Querschnitts 14 über die Länge 15 des Einsatzes 13 von der dort aufgrund der Massenkonstanz zumindest mit erhöhter  
30 Geschwindigkeit strömenden Heißgasströmung und anschließend wieder in der Wiederrum wegen der Massenkonstanz mit geringerer Geschwindigkeit strömenden Heißgasströmung im nicht mehr im Querschnitt eingeschränkten Bereich des Reaktionsraumes. Dabei kann mit einer entsprechenden Abstimmung von der in der Brennkammer 1 erzeugten Schwingung und der Länge 15 des Einsatzes 13 die Strömung durch den Einsatz  
35

13 nicht nur mit einer Grund- sondern ggf. auch mit einer Oberschwingung in eine Resonanz gebracht werden, was die Intensität der im Bereich des Einsatzes 13 bewirkten thermischen Behandlung entsprechend erhöht.

5

Sollte der Rohstoff aus einer Rohstoffmischung bestehen, bei der es sinnvoll ist, verschiedene Intensitäten der thermischen Behandlung zeitlich nacheinander zu haben, kann dies somit entsprechend eingestellt werden, indem die jeweils passende axiale Position des Einsatzes 13 innerhalb des Reaktionsraumes 7 bedarfsweise gewählt wird.

10

In der Fig. 2 ist eine im Wesentlichen gleiche Vorrichtung wie in Fig. 1 dargestellt. Bei dieser unterscheidet sich der Brennraum 5 durch die Art, wie er als Resonator auf die in ihm brennende Flamme 1 abgestimmt wird. Statt das Volumen der Brennkammer 5 über einen verschiebbaren Boden zu verändern, wie dies in der Fig. 1 dargestellt ist, ist bei dieser Ausführungsform ein die Flamme 1 am Brenner 2 in Radialrichtung umgebender Rohreinsatz 18 vorgesehen, der in Axialrichtung 19 der Brennkammer 5 verschiebbar ist, um so die in der Brennkammer 5 erzeugte Schwingung entsprechend auf den Einsatz 13 mit seinem verringerten Querschnitt 14 und seiner axialen Länge 15 abstimmen zu können, damit so bei diesem eine Resonanz bezüglich der durch ihn hindurchströmenden Heißgasströmung 12 erzeugt wird.

15

20

BCH 105/0A/WO

## Literatur

5

/1/ A.A. Putnam and W.R. Dennis: „Organ Pipe Oscillations in Flame-filled tubes“; Proc. Comb. Inst. 4, S. 556 ff., 1952

10 /2/ H. Büchner: „Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Entstehungsmechanismen selbsterregter Druckschwingungen in technischen Vormisch-Verbrennungssystemen“; Dissertation Universität Karlsruhe, Shaker-Verlag Aachen, 1992

15 /3/ DD 114 454 B1

/4/ DD 155 161 B1

/5/ DD 245 648 A1

20

/6/ DE 10 2006 046 803 A1

/7/ DE 101 09 892 B4

25 /8/ DE 10 2006 046 880 B4

/9/ DE 10 2006 032 452 B4

30 /10/ Chr. Bender: „Messung und Berechnung des Resonanzverhaltensgekoppelter Helmholtz-Resonatoren in technischen Verbrennungssystemen“; Dissertation Universität Karlsruhe KIT, 2010

BCH 105/0A/WO

## Bezugszeichenliste

5	
	1 Flamme
	2 Brenner
	3 Brennstoff
10	4 Verbrennungsluft
	5 Brennkammer
	6 Koppelrohr
	7 Reaktionsraum
	8 Wandung
15	9 Abgasstrom
	10 Rohstoff
	11 Kühlluft
	12 Heißgasstrom
	13 Einsatz
20	14 Querschnittsfläche
	15 Axiale Länge
	16 Verstellbarer Boden
	17 Pfeile
	18 Rohreinsatz
25	19 Axialrichtung

BCH 105/0A/WO

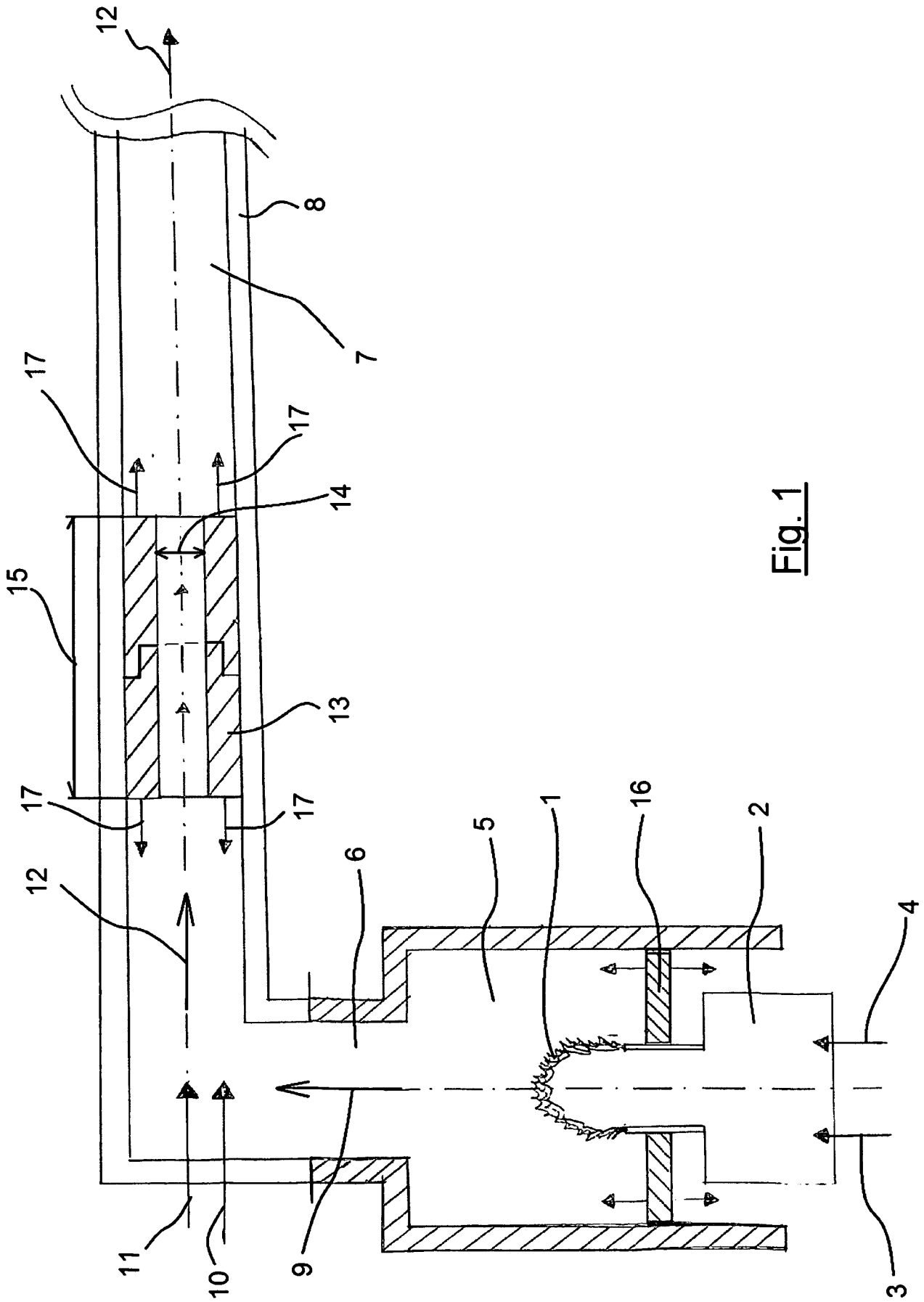
## Patentansprüche

5

1. Vorrichtung zur thermischen Behandlung eines Rohstoffes (10), mit einer Brennkammer (5), in der eine periodisch instationäre, schwingende Flamme (1) brennt zur Erzeugung eines pulsierenden Abgasstromes (9), der durch eine an die Brennkammer (5) anschließenden Reaktionsraum (7) strömt, dadurch gekennzeichnet, dass in dem Reaktionsraum (7) ein von dem Abgasstrom durchströmter, in seiner Querschnittsfläche (14) gegenüber dem Reaktionsraum (7) reduzierter Einsatz (13) vorgesehen ist, der eine Länge (15) aufweist, die kürzer ist als eine Gesamtlänge des Reaktionsraumes (7).  
10
2. Vorrichtung gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Länge (15) des Einsatzes (13) veränderlich ist.  
20
3. Vorrichtung gemäß Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Brennkammer (5) in ihrer Geometrie veränderbar ist.  
25
4. Vorrichtung gemäß einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Flamme (1) zu Schwingungen fremderregbar ist.  
30
5. Verfahren zur thermischen Behandlung eines Rohstoffes in einem periodisch instationär schwingenden Abgasstrom (9), der durch eine periodisch instationär schwingende Flamme (1) erzeugt wird, wobei der Abgasstrom durch einen Reaktionsraum (7) geleitet wird, dadurch gekennzeichnet,  
35

5 dass der Abgasstrom in einem im Reaktionsraum (7) vorgesehenen Einsatz (13) mit einer gegenüber dem Reaktionsraum (7) verringerten Querschnittsfläche und einer gegenüber der Gesamtlänge des Reaktionsraumes (7) kürzeren Länge (15) zu einer resonanten Schwingung angeregt wird.

6. Verfahren zur Herstellung von feinteiligen Partikeln, bei dem sich aus einer Präkursorenmischung, die zumindest alle Komponenten zur Bildung der feinteiligen Partikel umfasst, die feinteiligen Partikel bilden, wobei die Partikelbildung und/oder eine thermische Partikelbehandlung in einem schwingenden Abgasstrom erfolgt und die gebildeten Partikel anschließend vom Abgasstrom abgetrennt werden, dadurch gekennzeichnet, dass der schwingende Abgasstrom in einem Abschnitt resonant angeregt wird.
- 10
- 15



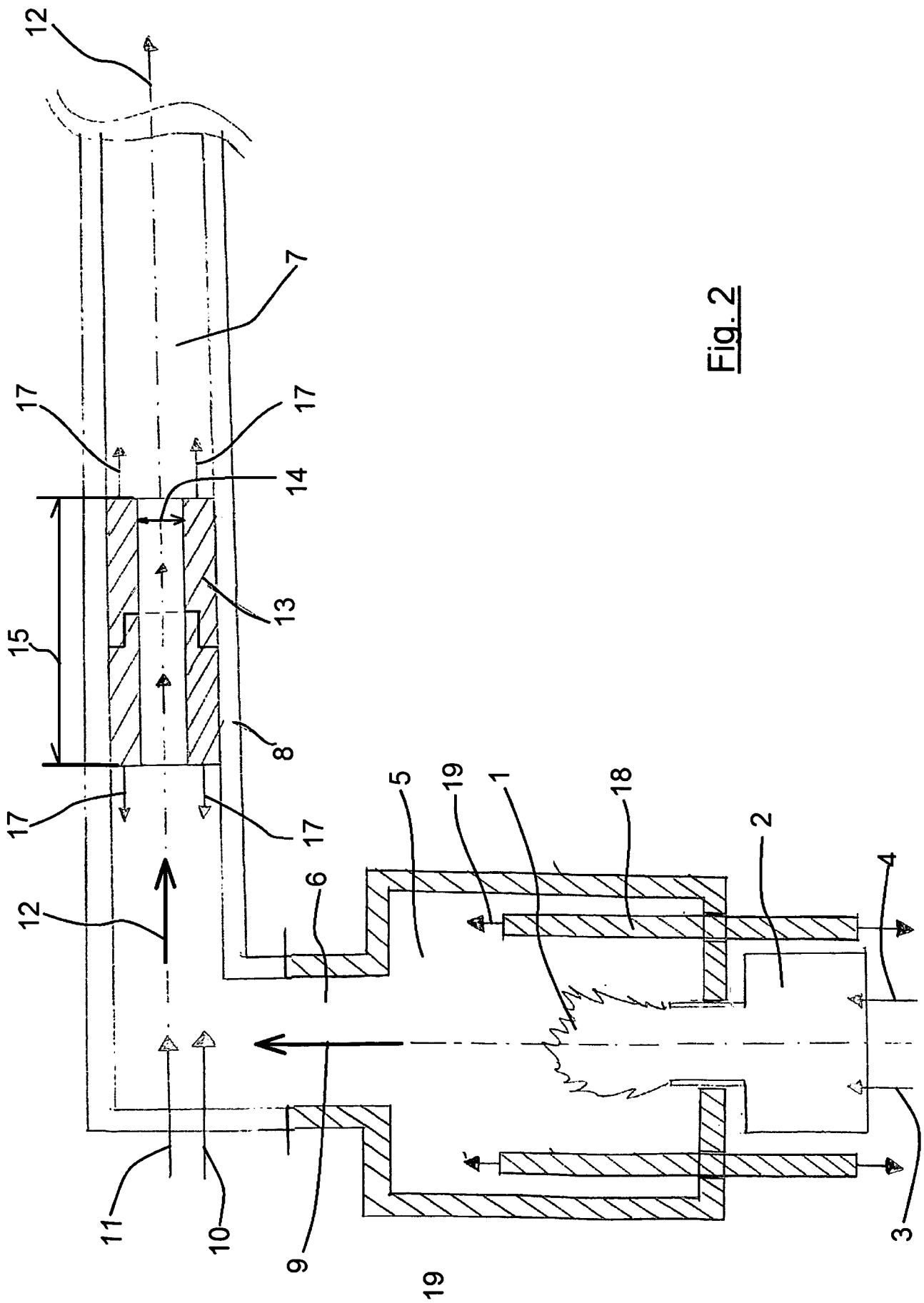


Fig. 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No  
PCT/EP2017/000096

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
INV. F23C15/00 B01J8/16  
ADD.  
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED  
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
F23C F23D B01J A47J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)  
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 5 044 930 A (HONGO ICHIRO [JP] ET AL) 3 September 1991 (1991-09-03)	1,4
Y	column 6, line 58 - line 19 column 9, line 10 - line 48; figures 7, 13	3
Y	----- DE 10 66 313 B (BABCOK) 1 October 1959 (1959-10-01) column 2, line 53 - column 3, line 43; figure 1	3
X	----- EP 2 092 976 A1 (IBU TEC ADVANCED MATERIALS AG [DE]) 26 August 2009 (2009-08-26)	6
A	paragraphs [0023], [0080], [0085]; claim 1; figure 1	3,4
	----- -/--	

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

\* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  26 April 2017	Date of mailing of the international search report  08/05/2017
--	--

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer  Harder, Sebastian
--	---

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No  
PCT/EP2017/000096

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2 722 180 A (MCILVAINE ORAN T) 1 November 1955 (1955-11-01) column 1, line 25 - column 2, line 5 column 4, line 10 - line 23 -----	1,4

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No PCT/EP2017/000096
---

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5044930	A	03-09-1991	CA 2013491 A1 30-09-1990 JP 2726487 B2 11-03-1998 JP H02263003 A 25-10-1990 US 5044930 A 03-09-1991
-----			
DE 1066313	B	01-10-1959	NONE
-----			
EP 2092976	A1	26-08-2009	DE 102008006607 A1 06-08-2009 EP 2092976 A1 26-08-2009
-----			
US 2722180	A	01-11-1955	NONE
-----			

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
 INV. F23C15/00 B01J8/16  
 ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
 F23C F23D B01J A47J

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 5 044 930 A (HONGO ICHIRO [JP] ET AL) 3. September 1991 (1991-09-03)	1,4
Y	Spalte 6, Zeile 58 - Zeile 19 Spalte 9, Zeile 10 - Zeile 48; Abbildungen 7, 13	3
Y	----- DE 10 66 313 B (BABCOK) 1. Oktober 1959 (1959-10-01) Spalte 2, Zeile 53 - Spalte 3, Zeile 43; Abbildung 1	3
X	----- EP 2 092 976 A1 (IBU TEC ADVANCED MATERIALS AG [DE]) 26. August 2009 (2009-08-26)	6
A	Absätze [0023], [0080], [0085]; Anspruch 1; Abbildung 1	3,4
	----- -/--	



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

26. April 2017

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

08/05/2017

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
 NL - 2280 HV Rijswijk  
 Tel. (+31-70) 340-2040,  
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Harder, Sebastian

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2 722 180 A (MCILVAINE ORAN T) 1. November 1955 (1955-11-01) Spalte 1, Zeile 25 - Spalte 2, Zeile 5 Spalte 4, Zeile 10 - Zeile 23 -----	1,4

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2017/000096

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 5044930	A	03-09-1991	CA 2013491 A1 30-09-1990 JP 2726487 B2 11-03-1998 JP H02263003 A 25-10-1990 US 5044930 A 03-09-1991
DE 1066313	B	01-10-1959	KEINE
EP 2092976	A1	26-08-2009	DE 102008006607 A1 06-08-2009 EP 2092976 A1 26-08-2009
US 2722180	A	01-11-1955	KEINE