



(10) **DE 10 2013 102 672 B4** 2015.04.16

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2013 102 672.9**
(22) Anmeldetag: **15.03.2013**
(43) Offenlegungstag: **18.09.2014**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **16.04.2015**

(51) Int Cl.: **G01B 11/24 (2006.01)**
G01B 11/12 (2006.01)
G01M 11/00 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Karlsruher Institut für Technologie, 76131
Karlsruhe, DE**

(72) Erfinder:
**Keller, Hubert, Dr., 76139 Karlsruhe, DE; Matthes,
Jörg, Dr., 76137 Karlsruhe, DE; Waibel, Patrick,
76227 Karlsruhe, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

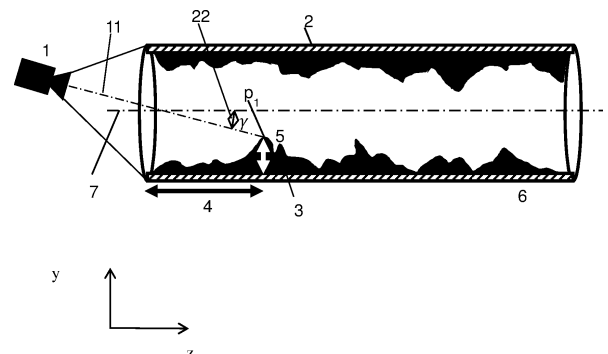
DE 102 16 172 A1
DE 103 47 340 A1
DE 10 2007 051 546 A1

**S. Zipser, J. Matthes, H.B. Keller:
Kamerabasierte Regelung von
Feuerungsprozessen mit dem Software-Werkzeug
INSPECT. In: at – Automatisierungstechnik. Band
54, Heft 11, 2006, Seiten 574–581**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Bestimmung von Wanddickenveränderungen in Drehrohrreaktoren**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Bestimmung von Wanddickenveränderungen (3a, 3b) in Drehrohrreaktoren, umfassend die folgenden Verfahrensschritte

- Bereitstellung eines stirnseitig exzentrisch der Drehachse (7) des Drehrohrreaktors in den Drehrohrreaktor ausgerichtetes feststehendes Kamerasystem (1),
- Aufnahme einer Sequenz von mindestens zwei in unterschiedlichen Drehwinkeln des Drehrohrreaktors um seine Drehachse (7) nacheinander aufgenommenen Bildern, mittels des Kamerasystems (1)
- Identifizierung von wenigstens einem Punkt (p) auf der Oberfläche der sich in ihrer Dicke ändernden Wand dessen Positionen über die Sequenz von Bildern einen Abschnitt einer Ellipse (12, 13) bilden,
- Bestimmung des Mittelpunkts (20) und der Abmaße der Ellipse,
- Bestimmung der Tiefe (4) des identifizierten Punktes p im Drehrohrreaktor anhand des ermittelten Mittelpunkts (20),
- Auswahl der anhand eines Drehrohrreaktors ohne Wanddickenveränderungen (3a, 3b) ermittelten Referenzellipse gleichen Mittelpunkts (20) sowie,
- Bestimmung der Wanddickenveränderungen (3a, 3b) anhand von Abweichungen der Abmaße der Ellipse von denen der Referenzellipse.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung von Wanddickenveränderungen in Drehrohrreaktoren gemäß dem ersten Patentanspruch.

[0002] Drehrohrreaktoren sind für etliche technische Anwendungen bekannt. Es handelt sich grundsätzlich um zylinderförmige Hohlkörper, welche in der Regel während des Verfahrensablaufs um ihre Mittelachse gedreht werden. Solche Reaktoren können für exotherme oder endotherme Verfahrensabläufe Verwendung finden. Für den Fall des Einsatzes bei Verbrennungsprozessen mit exothermen Prozessen sind die Innenwände der Drehrohrreaktoren beispielsweise mit feuerfesten Materialien ausgestaltet.

[0003] Aber auch bei endothermen Prozessen, welche auch in Drehrohrreaktoren ausgeführt werden können, beispielsweise hierfür sind biotechnische Verfahren, insbesondere Fermentationen und Abfallbehandlung auf biologischem Wege, und auch endotherme Verfahren für z. B. Zementherstellung, Metallrecycling, Elektroschrott- und Sonderabfallbehandlung können in solchen Reaktoren durchgeführt werden.

[0004] Diese Öfen liegen in der Regel um 3 bis 5° gegen die Waagerechte geneigt und werden durch Zahn- oder Schneckenradantriebe sehr langsam um ihre Achse gedreht. Das an der höher gelegenen Ofenseite eingefüllte Reaktionsmaterial wird damit gut durchmischt und erhält durch die Drehbewegung dauernd neue Oberflächen, so dass man mit einer relativ kurzen Brenndauer oder Reaktionsdauer auskommt.

[0005] Im Betrieb von Drehrohrreaktoren bilden sich während des verfahrenstechnischen Prozesses, Wanddickenveränderungen an der Reaktorinnenwand, deren Dicke in verschiedenen Bereichen des Drehrohrreaktors variiert und von den lokalen Bedingungen (z. B. Temperaturen, chem. Zusammensetzung der Stoffe, ablaufende Reaktionen) abhängig ist. Diese Anhaftungen (Wanddickenveränderungen) sind zu einem gewissen Teil erwünscht und bilden dann eine schützende Schicht für die Reaktorinnenwand vergleichbar mit einer Ausmauerung.

[0006] Häufig kommt es jedoch lokal zu einer verstärkten Anhaftungsbildung bzw. einer Wanddickenveränderung. Diese Wanddickenveränderungen aufgrund der Anhaftungen beeinflussen den Prozess in der Regel negativ, wodurch sich dann die Durchmischungsprozesse verschlechtern und in extremen Fällen sich der Reaktorquerschnitt zusetzt. Im Betrieb der Drehrohrreaktoren kommt es auch vor, dass die in der Regel ausgemauerte Reaktorinnenwand Stärke bzw. Dicke verliert, d. h. eine negative Wanddickenveränderung aufgrund von Erosion, Korrosion oder Ausbrüchen vorkommen kann.

[0007] Deshalb muss in diesen Fällen ein Zwangstillstand des Reaktors eingeleitet werden, bei dem nachfolgend die überschüssigen Wanddickenveränderungen mechanisch oder thermisch entfernt oder auch fehlerhafte Stellen der Ausmauerung wiederhergestellt werden müssen. Dies verursacht sehr hohe Kosten und zusätzlich entstehen durch den Produktionsausfall erhebliche Umsatzeinbußen.

[0008] Bisher wird zur Überwachung von Drehrohrreaktoren und deren Wanddickenveränderungen nur die Außenhülle mit Wärmescannern beobachtet. Wärmere Bereiche der Außenwand des Reaktors weisen dabei auf kleinere Wanddickenveränderungen im Reaktorinneren hin. Jedoch setzt diese Betrachtung die genaue Kenntnis der Temperaturverteilung innerhalb des Reaktors voraus, was in der Praxis nicht gegeben ist. Zudem werden dabei unterschiedliche wie auch unbekannte Wärmeisolationseigenschaften der Wanddickenveränderungen nicht berücksichtigt. Außerdem ist diese Lösung ausschließlich anwendbar, wenn im Inneren des Reaktors deutlich höhere oder deutlich niedrigere Temperaturen als außerhalb des Reaktors herrschen. Mit dieser Methode lassen sich jedoch nicht, die Lage und Dicke der Wanddickenveränderungen in zylindrischen Drehrohrreaktoren wie beschrieben im laufenden Betrieb, online ermitteln.

[0009] Aus Zipser, Matthes u. Keller: Automatisierungstechnik 54 (2006) 11, 574–581 ist der Einsatz von Kameras im visuellen (VIS) und im nahen (NIR) bzw. mittleren (MIR) infraroten Bereich bekannt. Mittels Infrarotkameras lässt sich unter anderem das Längstemperturprofil über die Drehrohlänge, die Fläche, Lage und Form des Brennbetts sowie das Vorhandensein von Temperaturen, die für die Außenmauer kritisch sind, ermitteln. Jedoch werden hier eventuell vorhandene Wanddickenveränderungen nicht ermittelt und dementsprechend nicht in die Beurteilung eines kritischen Zustandes bzw. einer kritischen Temperatur mit einbezogen.

[0010] Aus der DE 10 2007 051 546 A1 1 ist eine Verfahren zur Erkennung und Bewertung des Gutbetts bei kontinuierlichen Reaktionsabläufen in Drehrohrreaktoren bei bekannt, welches unter Einsatz einer Infrarotkamera eine Sequenz von nacheinander aufgenommenen Infrarotbildern erstellt und daraus die Unterschiede

der Temperaturdynamik von Gutbett und Gasphase ermittelt werden. Die Infrarotbildaufnahmen werden hier auch als Istwerte für eine nachfolgende Steuerung oder Regelung herangezogen. Das offenbarte Verfahren ist jedoch nicht in der Lage eine Bestimmung der Wanddickenveränderungen durchzuführen.

[0011] Aus der DE 102 16 172 A1 ist ein Verfahren zum Messen der Reststärke der feuerfesten Auskleidung im Wand- und/oder Bodenbereich eines metallurgischen Gefäßes, z. B. eines Lichtbogenofens bekannt. Hier wird mittels einer in Messposition bring baren Messeinheit, bevorzugt stereoskopische Aufnahmetechnik, welche wenigstens ein Stereo-Matrix-Kamera-Paar einsetzt. Hier werden Tiefeninformation der Auskleidung im Wand- und/oder Bodenbereich mit Hilfe eines Kamerapaars über ein Messfeld aus unterschiedlichen Blickwinkeln gewonnen, wodurch die gewünschte Tiefeninformation abgeleitet wird. Diese Vorgehensweise eignet sich aber nicht für den laufenden Betrieb in Drehrohrreaktoren und benötigt einen erhöhten technischen Aufwand in Form von mehreren Kameras und einer komplizierten Positionierungsvorrichtung des Kamerasystems. Des Weiteren werden die gewonnen Informationen der Wanddicke auch nicht als Steuerung für das Reaktorgefäß eingesetzt.

[0012] Eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Optimierung des Abgasausbrands in Verbrennungsanlagen in einer Festbettausbrandzone und einer Abgasausbrandzone sind aus der DE 10 347 340 A1 bekannt. Hier wird vorerwähnt, dass in der Rostfeuerung anhand der Infrarotstrahlung des Brennstoffbettes mit Hilfe einer Infrarotkamera die Temperaturen über die volle Lage des Brennstoffbettes ermittelt werden kann. Mit Hilfe dieser Informationen erfolgt die Regelung der einzelnen Primärgasströme.

[0013] Besonders eignet sich nach der DE 103 473 40 A1 insbesondere eine Spektalkamera, welche im Bereich der Brennkammerwandung in die Abgasausbrandzone gerichtet ist und dabei den Wirkungsbereich der Primärgasströme vollständig erfasst. Als vorteilhaft wird auch der Einsatz einer Infrarotkamera für den Wellenlängenbereich zwischen 3 und 12 μm angesehen.

[0014] Ausgehend hiervon ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zur Bestimmung und Lage der Wanddickenveränderungen in Drehrohrreaktoren vorzuschlagen, welche sich für eine im laufenden Betrieb oder Online zur Erkennung und Bewertung von Wanddickenveränderungen in Drehrohrreaktoren, eignen und die genannten Nachteile oder Einschränkungen, welche aus dem Stand der Technik bekannt, sind nicht aufzeigt.

[0015] Die Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruch 1 gelöst. Auf Anspruch 1 rückbezogene Unteransprüche geben vorteilhafte Ausgestaltungen wieder.

[0016] Zur Lösung der Aufgabe wird vorgeschlagen, mit einem in den Drehrohrreaktor (DRR) ausgerichteten feststehenden Kamerasystem wenigstens einen Teil der Innenwandung zu erfassen und über einen Vergleich mit Referenzbildern Veränderungen an der Innenwandung zu erkennen, insbesondere Wanddickenveränderungen zu bestimmen.

[0017] Hierzu wird eine Sequenz von mindestens zwei Bildern des DRR-Inneren in unterschiedlichen Drehwinkeln um die Drehachse des Drehrohrreaktors aufgenommen. Das Kamerasystem ist hierzu exzentrisch zur Drehachse des Drehrohrreaktors angeordnet. Die Ausrichtung der Kamera verläuft in das Innere des Drehrohrreaktors und schneidet vorzugsweise die Drehachse des Drehrohrreaktors in einem spitzen Winkel.

[0018] Mit einer Sequenz werden alle erfassten Innenwandungsbereiche in verschiedenen Drehwinkeln der Drehrohrreaktor aufgenommen. Durch die exzentrische Ausrichtung der Kamera (Kamerasystems) wird eine perspektivisch vorteilhafte Darstellung in den einzelnen Bildern bzw. Bildaufnahmen des Drehrohrreaktorinneren erreicht. Die sich im Drehrohrreaktor um die Drehachse in einer kreisförmig verlaufenden Umlaufbahn (Kreis) bewegenden Wandungsbereiche folgen mit der Drehung auf den Bildern einer elliptischen Umlaufbahn (Ellipse), wobei der Mittelpunkt von Kreis und korrespondierender Ellipse in den Bildern positionsgleich auf der Drehachse des Drehrohrreaktor liegen. Durch die exzentrische Ausrichtung des Kamerasystems ist hiermit auch eine Bestimmung der axialen Lage des Mittelpunkts und damit einer jeden Ellipse im Drehrohrreaktor möglich.

[0019] Die Drehachse des Drehrohrreaktors wird auf den Bildern als eine Gerade dargestellt.

[0020] Die Hauptachsen der Ellipsen d. h. die jeweilige Achse mit der größten Ausdehnung ist auf den Bildern als eine Gerade senkrecht zur Drehachse darstellbar. Die Nebenachsen der Ellipsen sind senkrecht zu den

korrespondierenden Hauptachsen und fallen in der Darstellung auf den Bildern mit der Drehachse des Drehrohrreaktors zusammen.

[0021] Referenzellipsen stellen in der jeweiligen perspektivischen Darstellung, stets einen kreisförmigen bzw. elliptischen Querschnitt des Drehrohrreaktors ohne zu erkennende oder zu erfassende Wanddickenveränderungen auf den Bildern dar. Der Querschnittsdurchmesser entspricht der Hauptachsenlänge der Referenzellipse. Der Querschnittsradius entspricht der halben Hauptachsenlänge der Referenzellipse.

[0022] Eine Wanddickenveränderung an einem Punkt auf der Innenwand entspricht dem halben Unterschied der Hauptachslänge der Referenzellipse zu der ellipsenförmigen Darstellung der kreisförmigen Umlaufbahn dieses Punktes, wobei die Referenzellipse und die anhand der Umlaufbahn dieses Punktes ermittelten Ellipse den gleichen Mittelpunkt einnehmen.

[0023] Der zeitliche Abstand zwischen den Einzelbildern einer Sequenz von Bildern ist abhängig von der Drehgeschwindigkeit des Drehrohrreaktors. Der zeitliche Mindestabstand zwischen den Einzelbildern und die Anzahl der Einzelbilder sind so zu wählen, dass die elliptische Darstellung der Umlaufbahn in den Bildern mit ausreichender Genauigkeit möglich ist.

[0024] Vorzugsweise werden hierzu Bilder in einem Drehwinkelabstand von mindestens 3° Drehrohrreaktor-Rotation erstellt. Die Auswahl der zeitlichen Abstände hängt jedoch immer von der konkreten Anwendung ab. In einer Brennraumatmosphäre bestehen erheblich dynamische Störeinflüsse für die optische Erfassung von Wandungsbereichen im Inneren eines Drehrohrreaktors aufgrund erhöhter Temperaturunterschiede und/oder erhöhter Helligkeitsunterschiede sowie Rußbildung im Drehrohrreaktor. In einer Brennraumatmosphäre hat sich ein Drehwinkelabstand von mindestens 5° Drehrohrreaktor-Rotation als vorteilhaft erwiesen.

[0025] Störeinflüsse wie zum Beispiel Flackern im Brennraum des Drehrohrreaktor, und die damit verbundenen Ungenauigkeiten auf einer Einzelaufnahme, lassen sich durch mehrere redundante Bildaufnahmen (Redundanzsequenz) in einem Drehwinkelbereich vorzugsweise kleiner gleich 1° reduzieren. Weiter bevorzugt erfolgen die redundanten Bildaufnahmen unmittelbar aufeinanderfolgend innerhalb einer Drehung kleiner gleich 1° .

[0026] Das Kamerasystem umfasst optional mehrere Kameras mit mehreren Kamerapositionen die jeweils in den Drehrohrreaktor mit einer exzentrischen Ausrichtung so eingesetzt werden, dass der gesamte Innenraum des Drehrohrreaktors permanent aus verschiedenen Perspektiven überwacht werden kann. Diese Ausführung ermöglicht eine zeitgleiche Aufnahme von mehreren Bildern einer Sequenz von Bildern in unterschiedlichen Drehwinkeln. Bildstörungen durch dynamische Vorgänge im Drehrohrreaktor wie z. B. Rußbildung oder Flammendynamik lassen sich somit beseitigen.

[0027] Auf Grundlage einer durch mindestens einer Kamera aufgenommenen Sequenz von mindestens zwei Bildern, welche sich in ihrem Drehwinkel des Drehrohrreaktors unterscheiden, wird mindestens ein Punkt, auf der Oberfläche eines erfassten Wandbereichs (Wanddickenveränderung) festgelegt bzw. identifiziert.

[0028] Die Festlegung des Punktes erfolgt vorzugsweise anhand lokaler Bildmerkmale (Zum Beispiel: Strukturen, Kontraste, Kontrastdynamik, Helligkeitsunterschiede, Helligkeitsverlauf etc. auf den Bildern). Der Punkt muss auf jedem Bild oder einer Aufnahme der Redundanzsequenz eindeutig identifizierbar sein. Alternativ kann die Festlegung eines Punktes auch durch manuelle Eingaben erfolgen. Hierzu kann der Bediener einen Punkt im aktuellen Kamerabild beispielsweise durch einen Maus-Klick auswählen.

[0029] Die Identifikation sowie die vorherige Selektion des Punktes auf einer zeitlich folgenden Aufnahme, erfolgt derart, dass dem Punkt in der Bildaufnahme x, y-Koordinaten (x, y-Werte) zugeordnet werden bzw. die x, y-Werte werden aus den Bilddaten ausgelesen. Zusätzlich werden lokale Bildmerkmale um den Punkt wie vorzugsweise die Kontrastdynamik (Helligkeitsverlauf) herangezogen. Die Kontrastdynamik beschreibt den Intensitätsunterschied zwischen dem hellsten und dem dunkelsten Punkt, in einer Fläche um den zu identifizierenden Punkt, des aufgenommenen Bildes.

[0030] Da die Geometrie, Drehrichtung und die Drehgeschwindigkeit des Drehrohrreaktors bekannt sind, kann hieraus die neue Lage, des zu identifizierenden Punktes abgeschätzt werden.

[0031] Ein Punkt gilt dann als identifiziert wenn dieser in einer nachfolgenden Aufnahme der Sequenz von Bildern eindeutig wieder erkennbar ist. Ein wiedererkennbarer Punkt weist auf mehreren Bildern eine Se-

quenz von Bildern, an den jeweils abgeschätzten Positionen, ausreichend gleichartige lokale Bildmerkmale auf. Grundsätzlich ist die automatisierte Suche nach relevanten Bildpunkten mittlerweile eine marktübliche Anwendung auf die nicht weiter eingegangen wird.

[0032] Durch die exzentrische Perspektive ergibt sich, dass sich ein derart festgelegter Punkt mit einer zugeordneten Kontrastdynamik, über eine Sequenz oder auch Abfolge von Bildern, immer über einen Abschnitt mindestens einer Ellipse bzw. einer Ellipsenbahn bewegt.

[0033] Eine Ausführung sieht vor, zwei Bilder mit einem um 180° versetzten Drehwinkel des Drehrohrreaktors aufzunehmen. Dies hat den Vorteil, dass sich aus den folglich mindestens zwei Aufnahmen, und deren identifizierten Punkten (Punktpaar), sofort der Mittelpunkt als halbe Strecke (Verbindungsline) zwischen der Verbindung der beiden Punkte ergibt.

[0034] Eine weitere Ausführung sieht eine Sequenz von drei oder mehr Bildern in unterschiedlichen Drehwinkeln als Grundlage zur Berechnung der Ellipsenbahnen (Umlaufbahnen) vor. Mit drei Punkten auf einer solchen Ellipsenbahn sind diese und der Mittelpunkt, einschließlich der Haupt- sowie Nebenachsen, eindeutig bestimmbar. Durch die Vorkenntnis, dass der Mittelpunkt immer auf der Rotationsachse des Drehrohrreaktors im Bild liegt, liefert der dritte Punkt bereits eine redundante Information, welche für einen Fehlerausgleich genutzt wird.

[0035] Um die Verlässlichkeit der Bewertung weiter zu steigern, werden die aus der Sequenz von Bildern entnommenen x , y -Koordinaten (x , y -Werte) von Punkten (N_p -Punkte, Bilddaten) vorzugsweise weiter optimiert, z. B. mit Hilfe der Optimierung eines geometrischen Fehlerfunktionalen E_A , bei der das zu minimierende Residuum dem Abstand aller N_p -Punkte zur geschätzten Ellipsenbahn entspricht. Vorzugsweise wird die Optimierung eines geometrischen Fehlerfunktionalen E_A mit der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Alternativ sind auch andere Optimierungsverfahren anwendbar. Zur Aufnahme einer Sequenz von Bildern umfasst das Kamerasystem eine handelsübliche Kamera mit einer nicht näher spezifizierten Schnittstelle zu einem Datenverarbeitungsgerät, um eine Online- und/oder Offline-Datenanalyse durchzuführen. Vorzugsweise ist die Kamera als Wärmebildkamera oder als Infrarotkamera ausgeführt.

[0036] Das zuvor beschriebene Ergebnis einer Bewertung der Wanddickenveränderung ist in vorteilhafter Weise auch als eine Eingangsgröße für eine Steuerung oder Regelung des Drehrohrreaktors nutzbar.

[0037] Im Folgenden wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die **Fig. 1** bis **Fig. 5** näher beschrieben, die Figuren zeigen:

[0038] **Fig. 1:** Schematische Schnittdarstellung eines Drehrohrreaktors mit Wanddickenveränderungen an der Innenwand sowie eines Kamerasystems zur Überwachung des Drehrohrreaktors.

[0039] **Fig. 2:** Schematische Darstellung eines Drehrohrreaktors mit mehreren Wanddickenveränderungen in unterschiedlichen Tiefen im Drehrohrreaktor in Bildrichtung.

[0040] **Fig. 3a:** Modellhafte Schnittdarstellung, eines Drehreaktors mit zwei exemplarischen Wanddickenveränderungen und zwei identifizierte Punkte auf der Oberfläche der Wanddickenveränderung.

[0041] **Fig. 3b:** Modellhafte Darstellung der in **Fig. 3a** identifizierten Punkte sowie der daraus resultierenden Bewegungslinien aus Kameraperspektive.

[0042] **Fig. 4a** zeigt eine Sequenz von sechs Bildern mit Blickrichtung in das Innere eines Drehreaktors.

[0043] **Fig. 4b:** Schematische Darstellung einer Sequenz von sechs Bildern mit Blickrichtung in das Innere eines Drehreaktors.

[0044] **Fig. 5:** Aufnahme mit einer Infrarotkamera mit der Blickrichtung in das Innere eines Drehreaktors und einer Darstellung von Bewegungslinien einer ausgewählten Wanddickenveränderung.

Ausführungsbeispiel 1

[0045] In **Fig. 1** zeigt eine modellhafte Schnittdarstellung eines Drehrohrreaktors mit Wanddickenprofil **3** an der Innenwand **2** sowie eines Kamerasystems **1** zur Überwachung des Drehrohrreaktors. Das Wanddickenprofil

erstreckt sich über die gesamte Innenwandung des Drehrohrreaktors. Das Kamerasystem **1** ist exzentrisch zur Drehachse **7** des Drehrohrreaktors angeordnet wobei, sich die Sichtlinie **11** mit der Drehachse **7** des Drehrohrreaktors in einem spitzen Winkel **22** schneidet. In dem erfassten Wandungsbereich ist ein exponierter Punkt p_1 auf dem Wanddickenprofil **3** mit einer (maximalen) Dicke **5** und einer Tiefe **4** im Drehrohrreaktor exemplarisch hervorgehoben dargestellt.

[0046] In Fig. 2 zeigt eine modelhafte Darstellung eines Drehrohrreaktors mit mehreren Wanddickenveränderungen **3** in unterschiedlichen Tiefen an der Innenwandung **2** im Drehrohrreaktor in Bildrichtung. Die beiden Kreuze **8, 9** kennzeichnen jeweils den Mittelpunkt an den beiden Enden des Drehrohrreaktors (vorderes Ende **8** und hinteres Ende **9**). Die Verbindungslinie **7** zwischen den Mittelpunkten **8, 9** des Drehrohrreaktors entspricht der Drehachse **7** des Drehrohrreaktors.

[0047] Fig. 3a zeigt eine modellhafte Schnittdarstellung, eines Drehrohrreaktors mit einer exzentrisch angeordneten Kamera **1** mit zwei exemplarischen Wanddickenveränderungen **3a, 3b** des Wanddickenprofils und dazugehörige identifizierte Punkte p_1, p_2 auf der Oberfläche der Wanddickenveränderungen **3a, 3b** an der Innenwandung des Drehrohrreaktors. Die Wanddickenveränderung **3a** erstreckt sich weiter in den Innenraum des Drehrohrreaktor als die Wanddickenveränderung **3b**. Hier wird mit einer Sequenz von zwei Bildern die beiden identifizierten Punkte (Punktepaar) p_1, p_2 an folglich jeweils zwei verschiedenen Positionen mit einem um 180° unterschiedlichen Drehwinkel dargestellt. Die gepunkteten Linien stellen die Sichtlinien **10** zwischen der Kamera **1** und der Wanddickenveränderung **3a** bzw. des Punktes p_1 zum Drehwinkel **1** und Drehwinkel **2** dar p_{11}, p_{12} , die gestrichelten Linien geben die Sichtlinien **11** zwischen der Kamera **1** und der Wanddickenveränderung **3b** bzw. dem identifizierten Punkt p_2 zu dem Drehwinkel **1** bzw. Drehwinkel **2** p_{21}, p_{22} an.

[0048] Fig. 3b zeigt eine modellhafte Darstellung des in Fig. 3a dargestellten Drehrohrreaktors perspektivisch aus einer Kameraposition. Des Weiteren werden die als Sterne illustrierten, identifizierten Punkte p_1, p_2 sowie die daraus resultierenden Umlaufbahnen (Bewegungslinien) **12, 13** im Kamerabild dargestellt. Die jeweiligen Punktepaare p_{21}, p_{22} und p_{11}, p_{12} entstehen bei einer Drehung des Drehreaktors um 180° . Die gestrichelte Linie stellt die Umlaufbahn (umlaufende Ellipsenbahn) **13** des Punktes p_2 respektive die Ellipsenbahn **13** der Wanddickenveränderung **3b** dar. Die gepunktete Linie zeigt die umlaufene Ellipsenbahn **12** des Punktes p_1 der Wanddickenveränderung **3a**. Durch das Verbinden von p_{11} mit p_{12} ergibt sich eine Verbindungslinie (Strecke) **15** die der Hauptachslänge der Ellipse entspricht. Auf der halben Strecke **15** befindet sich der Mittelpunkt **16** der Ellipse. Da die exzentrische Ausrichtung der Kamera **1** bekannt ist, ist mit Kenntnis der bestehenden Geometrie (geometrisches Modell) des Drehrohrreaktors jede beliebige Ellipse mit einem bestimmten Mittelpunkt einer daraus resultierenden Tiefe im Drehrohrreaktor zuordnungsfähig. Die Abmaße z. B. Hauptachslänge, Abstand eines beliebigen Punktes zum Mittelpunkt, Umfang, Nebenachslänge, Fläche und Umfang einer Ellipse sind mit Kenntnis des Mittelpunkts, der aus einer Sequenz von Bilder ermittelt wurde, bestimmbar.

[0049] Die Bewegungslinien (elliptische Umlaufbahn) **12, 13** beschreiben die auf der Oberfläche der Wanddickenveränderung festgelegten Punkt (p) bei der Rotation des Drehrohrreaktors im Kamerabild. Diese Bewegungslinien **12, 13** sind wegen der exzentrischen Sicht in den Drehrohrreaktor Ellipsen, deren Mittelpunkte auf der Drehachse **7** des Drehrohrreaktors im Kamerabild liegen. Es ist dargestellt, dass die Lage der jeweiligen Ellipse gegeben durch den Mittelpunkt, direkt der Tiefe (z-Werte) **6** der Wanddickenveränderung **3** entspricht. Die Größe der Ellipse, die sich im Vergleich z. B. der Länge der Hauptachse zu der Ellipse eines Punktes p in gleicher Tiefe **4** (z-Wert) im Drehrohrreaktor direkt auf der Innenwandung, ohne Wanddickenveränderung, ergibt, entspricht der doppelten Dicke **5** einer Wanddickenveränderung.

[0050] Sind mehrere Positionen (k) im Drehrohrreaktor x_k, y_k (x, y -Werte des identifizierten Punktes) einer Wanddickenveränderung ermittelt worden, dann lassen sich der zugehörige Mittelpunkt x_m, y_m und die zugehörigen Halbachsen (Hauptachsen) r_1, r_2 der beschriebenen Ellipsenbahn mit Hilfe der Optimierung eines Fehlerfunktional E_A über die Methode der kleinsten Quadrate berechnen.

[0051] Ein geometrisches Fehlerfunktional $E_{A, \text{Ellipse, geom.}}$, bei der das zu minimierende Residuum dem Abstand aller N_p Punkte zur geschätzten Ellipsenbahn entspricht, lautet:

$$E_{A, \text{Ellipse, geom.}} = \sum_{k=1}^{N_p} \left(\sqrt{\left((x_k - x_m) \cdot \frac{r_1}{r_2} \right)^2 + (y_k - y_m)^2} - r_1 \right)^2 \rightarrow \min \quad (I)$$

[0052] Die Mittelpunkte aller potentiellen Ellipsenbahnen, die von Wanddickenveränderungen im Drehrohrreaktor beschrieben werden können, befinden sich auf einer Geraden mit der Gleichung

$$y_m = mx_m + n. \quad (\text{II})$$

[0053] Es handelt sich folglich um ein nichtlineares Optimierungsproblem mit einer linearen Restriktion, das mit einem iterativen Standardverfahren z. B. Gradientenverfahren gelöst werden kann. Es können aber auch andere Verfahren eingesetzt werden.

[0054] Wird näherungsweise von einer Kreisbahn (besondere Ellipsenbahn) ausgegangen, lässt sich auch folgendes Fehlerfunktional nutzen, das eine geschlossene Lösung erlaubt:

$$E_{A,\text{Kreis,geom.}} = \sum_{k=1}^{N_p} ((x_k - x_m)^2 + (y_k - y_m)^2 - r^2)^2 \rightarrow \min \quad (\text{III})$$

[0055] Ist der Mittelpunkt in der Bilddarstellung der Kreisbahn (Umlaufbahn) einer Wanddickenveränderung durch die x, y-Koordinaten $x_{m,z}$, $y_{m,z}$ (x, y-Werte) bekannt, dann lässt sich mit

$$z = \frac{l_{\text{Drehrohr}}}{r_i - 1} \left(\frac{r_a}{(x_{m,z} - x_{m,i}) \left(\frac{r_a - r_i}{x_{m,a} - x_{m,i}} \right) + r_i} - 1 \right) \quad (\text{IV})$$

die Tiefe (z-Wert) **6** der Wanddickenveränderung im DRR ermitteln.

[0056] Alternativ kann hier auch bei der Betrachtung einer Umlaufbahn **12** wie in **Fig. 3b** anstelle des Radius r in der Gleichung (III) beispielsweise auch die Länge der Hauptachse (Strecke, Verbindungslinie) **15** genutzt werden.

[0057] Dabei ist l_{Drehrohr} die Länge des Drehrohrreaktors, r_a und r_i stellen jeweils den Radius der nähergelegenen (vorderen) **21** bzw. der von der Kamera **1** weiter entfernten hinteren Drehrohrreaktoröffnung **19** im Bild dar, alternativ können auch Durchmesser oder Radien des Drehrohrreaktor in bekannten Tiefen (z-Werte) **6** gewählt werden, wenn beispielsweise die hintere Drehrohrreaktoröffnung **19** in den Bildaufnahmen nicht erkennbar ist.

[0058] $x_{m,a}$ und $x_{m,i}$ sind die x-Werte der Mittelpunkte hierzu. Analog können auch die y-Komponenten der Mittelpunkte zur Berechnung der Tiefe **6** der Wanddickenveränderung genutzt werden:

$$z = \frac{l_{\text{Drehrohr}}}{r_i - 1} \left(\frac{r_a}{(y_{m,z} - y_{m,i}) \left(\frac{r_a - r_i}{y_{m,a} - y_{m,i}} \right) + r_i} - 1 \right) \quad (\text{V})$$

[0059] Anschließend kann aus der Differenz zwischen dem Radius eines Punkts p an der Oberfläche der Wanddickenveränderung $r_z(z)$ in derselben Tiefe **6** zum Radius, der Umlaufbahn **12** der Wanddickenveränderung $r_A(z)$, auf die Dicke (h_A) **5** der Wanddickenveränderung im Drehrohrreaktor geschlossen werden. Prinzipiell ist auch eine negative Höhe denkbar, wenn z. B. eine Position in einem Loch in der Ausmauerung des Drehrohrreaktors als Grundlage der Berechnungen genutzt wird:

$$r_z(z) = r_a \left(\frac{l_{\text{Drehrohr}}}{l_{\text{Drehrohr}} + z \left(\frac{r_a}{r_i} - 1 \right)} \right) \quad (\text{VI})$$

dem entsprechend folgt

$$h_A(z) = r_{\text{Drehrohr}} \left(1 - \frac{r_A(z)}{r_z(z)} \right) \quad (\text{VII})$$

[0060] **Fig. 4a** zeigt mit den Indizes (a) bis (f) sechs aufeinander folgend aufgenommene Bilder eines Drehrohrreaktorinneren. Die Aufnahmen wurden mit einer Infrarot-Kamera im Wellenlängenbereich $3.8 \mu\text{m}$ – $4.0 \mu\text{m}$ aufgenommen. In den einzelnen Bildern (a) bis (f) der Sequenz wurde die Bewegung eines identifizierten Punk-

tes (p), mit einem Stern markiert und einem Pfeil nochmal hervorgehoben, auf der Oberfläche einer Wanddickenveränderung nachverfolgt.

[0061] Der Punkt p wurde fortlaufend in den Bildern (a) bis (f) mit der Bezeichnung p_{11} bis p_{16} versehen um jeweilige veränderte Position des Punktes hervorzuheben.

[0062] In Fig. 4b werden die Aufnahmen aus Fig. 4a. schematisiert dargestellt und mit der Bewegungslinie (Umlaufbahn) **12** der Wanddickenveränderung ergänzt.

[0063] Fig. 5 zeigt die aus den sechs Positionen p_{11} bis p_{16} wie in Fig. 4a und Fig. 4b bereits dargestellt, der Wanddickenveränderung ermittelte Ellipse (Umlaufbahn) **12**, deren Mittelpunkt auf der Rotationsachse **7** des Drehrohrreaktors liegt. Die grauen Ellipsen geben das einmalig festgelegte geometrische Modell des leeren Reaktors an. Aus der Position der Ellipse ergibt sich für das Beispiel eine Tiefe der Wanddickenveränderung von 0,4 m. Mit der Größe der Ellipse, der Lage und dem geometrischen Modell folgt eine Dicke der Wanddickenveränderung von ca. 0,5 m. Das Beispiel zeigt, dass bereits nach weniger als einer viertel Umdrehung des Drehrohrreaktor die Lage und Dicke der Wanddickenveränderung bestimmt werden kann. Das bedeutet, dass es genügt, wenn die Bahn der Wanddickenveränderung während der Rotation des Drehrohrreaktors auch nur stückhaft sichtbar ist.

Ausführungsbeispiel 2

[0064] Zur Aufnahme einer Sequenz von der Bildern, wird beispielsweise eine Kamera **1** mit einer exzentrischen Position eingesetzt (vgl. a. Fig. 1), welche im visuellen Spektralbereich (VIS) bei Wellenlängen zwischen 0,4 und 0,8 μm und im nahen Infrarotbereich (NIR) zwischen 0,8 und 1,1 μm und im mittleren Infrarotbereich (MIR) zwischen 2 und 5 μm und zwischen 8 und 12 μm Bilder aus dem Drehrohrreaktorinneren aufnimmt positioniert.

[0065] Durch Auslesen der x, y-Koordinaten des identifizierten bzw. festgelegten Punktes auf der Oberfläche einer Wanddickenveränderung und der dazugehörigen Lage und/oder der Temperaturdynamik und/oder des Temperaturprofils und/oder die Reflektivität und/oder das Temperaturmuster der Umgebungen, wird dieser in einer darauf folgende Aufnahme wieder identifizierbar wenn die Temperaturdynamik und/oder das Temperaturprofil und/oder die Reflektivität und/oder das Temperaturmuster der Umgebungen einer ersten und einer darauffolgenden Aufnahme gleich bzw. nur geringe Unterschiede aufweisen, wobei die örtliche Änderung der Position des Punktes in Drehrichtung des Drehrohrreaktors mit einbezogen wird.

[0066] Je nach Zustand und Einsatz des Drehrohrreaktors ist es vorteilhaft, die Spektralbereiche der Kamera oder des Kamerasystems durch den Einsatz von mindestens einem Bandpassfilter weiter einzugrenzen um die Bildqualität bzw. die Qualität der Daten aus den Bildern weiter zu erhöhen.

[0067] Auch das Ausblenden von partikelhaltigen Bildern bzw. Bildausschnitten und die alleinige Auswertung der partikelfreien Bildbestandteile ist für die Zwecke der vorliegenden Erfindung hilfreich.

[0068] Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt hierbei, dass beispielhaft für eine Verbrennung im einem Drehrohrreaktor die Temperaturschwankungen der Wanddickenveränderungen geringer sind als die Schwankungen des Gutbetts bzw. des Festbetts, während die thermischen Schwankungen der Gasphase größer als die des Gutbetts und der Wanddickenveränderungen sind. Da die Wanddickenveränderungen eine geringere thermische Dynamik als die Gasphase besitzt, ergibt sich in den Bildaufnahmen, insbesondere in einem Infrarotbild für die Wanddickenveränderungen eine geringere Variation als für die Gasphase.

[0069] Zur Messung der Temperatur bei Festkörpern in einer Verbrennungsumgebung mit erhöhten CO , CO_2 und H_2O -Anteilen ist ein spezieller Bandpassfilter bei 3,9 μm von Vorteil, da in diesem Bereich eine hohe Transmission vorliegt. Vorteilhaft für MIR-Kameras ist zudem, dass die Extinktion von Ruß mit zunehmender Wellenlänge abnimmt und damit im Vergleich zu VIS und NIR-Kameras eine bessere Sicht auf Festkörper bietet. Eine MIR-Kamera mit Bandpassfilter bei 3,9 μm eignet sich damit insbesondere für die Analyse des ungezündeten Brennstoffs in der Flamme oder zur Ermittlung der Temperaturverteilung von Brennkammerwänden.

Bezugszeichenliste

1	Kamera (Kamerasystem)
2	Wandung des Drehreaktors (Referenzellipse ohne Wanddickenveränderung)
3	Profil der Wanddickenveränderung über den gesamten Drehrohrreaktor
3a, 3b	Wanddickenveränderung
4	Tiefe der Wanddickenveränderung im Drehrohrreaktor (z-Wert)
5	Dicke der Wanddickenveränderung im Drehrohrreaktor (x, y-Werte)
6	Tiefe im Drehrohrreaktor (z-Achse/z-Werte)
p,	Punkte auf der Oberfläche einer
p_{1,1}, p_{1,2}, p_{1,3}, p_{1,4}, p_{1,5}, p_{1,6}	Wanddickenveränderung im Drehrohrreaktor (x, y, z-Werte)
p_{2,1}, p_{2,2}	
7	Drehachse des Drehrohrreaktors
8	Mittelpunkt am vorderen Ende des Drehrohrreaktors im Kamerabild
9	Mittelpunkt am hinteren Ende des Drehrohrreaktors im Kamerabild
10	Sichtlinien zwischen der Kamera und der Wanddickenveränderung
11	Sichtlinien zwischen der Kamera und der Wanddickenveränderung
12	Bewegungslinie (elliptische Umlaufbahn) im Kamerabild
13	Bewegungslinie (elliptische Umlaufbahn) im Kamerabild
14	Bewegungslinie (elliptische Umlaufbahn) im Kamerabild
15	Strecke (Verbindungsline) zwischen dem Punkt p ₁ zum Zeitpunkt 1 (Drehwinkel 1) p ₁₁ und dem Punkt p ₁ zum Zeitpunkt 2 (Drehwinkel 2) p ₁₂ entspricht der Länge der Hauptachse der Ellipse im Kamerabild
16	Mittelpunkt der Verbindungsline 15
17	Brenner drehfest im Drehrohrreaktor
18	Umriss einer Wanddickenveränderung im Kamerabild
19	Umfang des hinteren Ende des Drehrohrreaktors
20	Mittelpunkt der Ellipse
21	Umfang des vorderen Ende des Drehrohrreaktors
22	Winkel

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung von Wanddickenveränderungen (**3a, 3b**) in Drehrohrreaktoren, umfassend die folgenden Verfahrensschritte

- Bereitstellung eines stirnseitig exzentrisch der Drehachse (**7**) des Drehrohrreaktors in den Drehrohrreaktor ausgerichtetes feststehendes Kamerasystem (**1**),
- Aufnahme einer Sequenz von mindestens zwei in unterschiedlichen Drehwinkeln des Drehrohrreaktors um seine Drehachse (**7**) nacheinander aufgenommenen Bildern, mittels des Kamerasystems (**1**)
- Identifizierung von wenigstens einem Punkt (p) auf der Oberfläche der sich in ihrer Dicke ändernden Wand dessen Positionen über die Sequenz von Bildern einen Abschnitt einer Ellipse (**12, 13**) bilden,
- Bestimmung des Mittelpunkts (**20**) und der Abmaße der Ellipse,
- Bestimmung der Tiefe (**4**) des identifizierten Punktes p im Drehrohrreaktor anhand des ermittelten Mittelpunkts (**20**),
- Auswahl der anhand eines Drehrohrreaktors ohne Wanddickenveränderungen (**3a, 3b**) ermittelten Referenzellipse gleichen Mittelpunkts (**20**) sowie,
- Bestimmung der Wanddickenveränderungen (**3a, 3b**) anhand von Abweichungen der Abmaße der Ellipse von denen der Referenzellipse.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei

- die Aufnahme einer Sequenz von zwei Bildern mit einem 180° versetzten Drehwinkel des Drehrohrreaktors erfolgt
- die Bestimmung des Mittelpunkts (**20**) der Ellipse durch den Mittelpunkt (**15**) einer Verbindungsline (**15**) der Positionen des Punktes (p_{1,1}, p_{1,2}) auf zwei Bildern gegeben ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Aufnahme einer Sequenz von mindestens drei Bildern in unterschiedlichen Drehwinkeln des Drehrohrreaktors um seine Drehachse (**7**) erfolgt.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Bestimmung des Mittelpunkts **(20)** der Ellipse und/oder des Mittelpunkts der Verbindungslinie **(15)** eines Punktpaares $(p_{1,1}, p_{1,2})$ und/oder der Abmaße der Ellipse durch Minimierung eines Fehlerfunktionalen erfolgt.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass die ermittelten Wanddickenveränderungen **(3a, 3b)** als Istwerte für eine Steuerung oder Regelung dienen.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche **dadurch gekennzeichnet**, dass das Kamerasystem **(1)** im visuellen Spektralbereich (VIS) bei Wellenlängen zwischen 0,4 und 0,8 μm und/oder im nahen Infrarotbereich (NIR) zwischen 0,8 und 1,1 μm und/oder im mittleren Infrarotbereich (MIR) zwischen 2 und 5 μm und/oder im Spektralbereich zwischen 8 und 12 μm Bilder aufnimmt.

7. Verfahren nach Anspruch 6 **dadurch gekennzeichnet**, dass die Spektralbereiche des Kamerasystems **(1)** durch den Einsatz von mindestens einem Bandpassfilter weiter eingegrenzt werden.

Es folgen 7 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1:

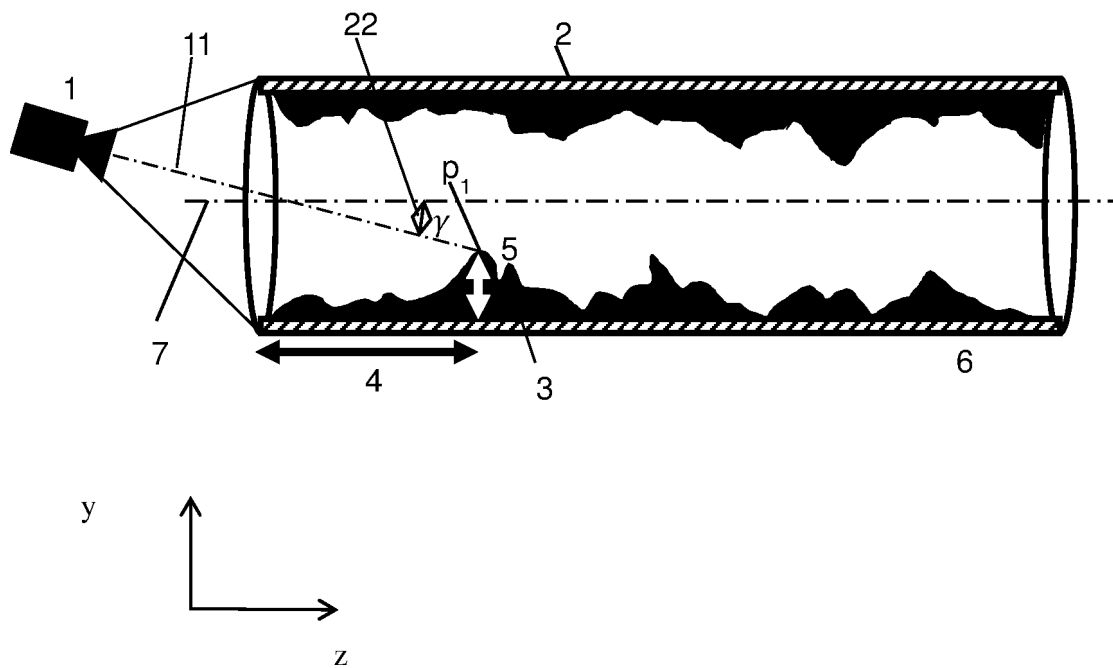


Fig. 2:

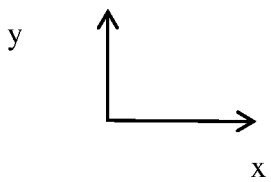
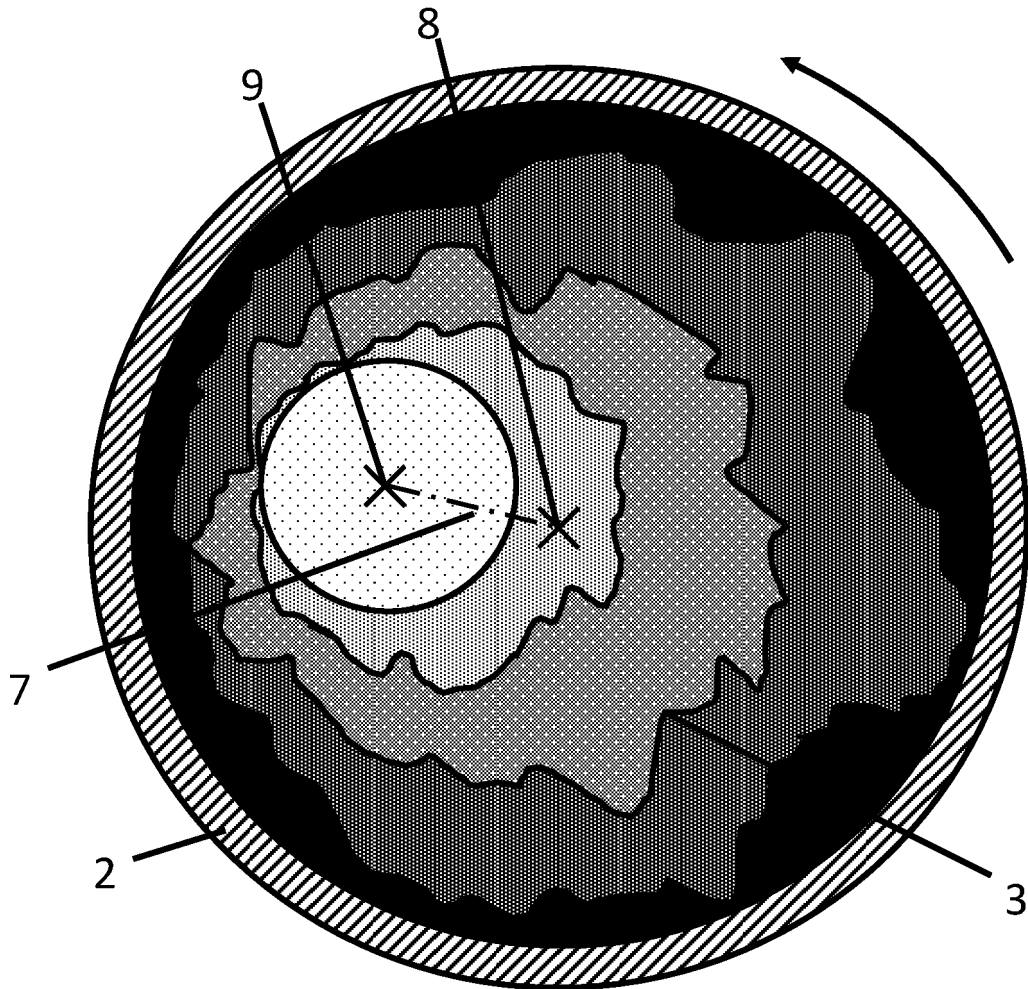


Fig. 3a:

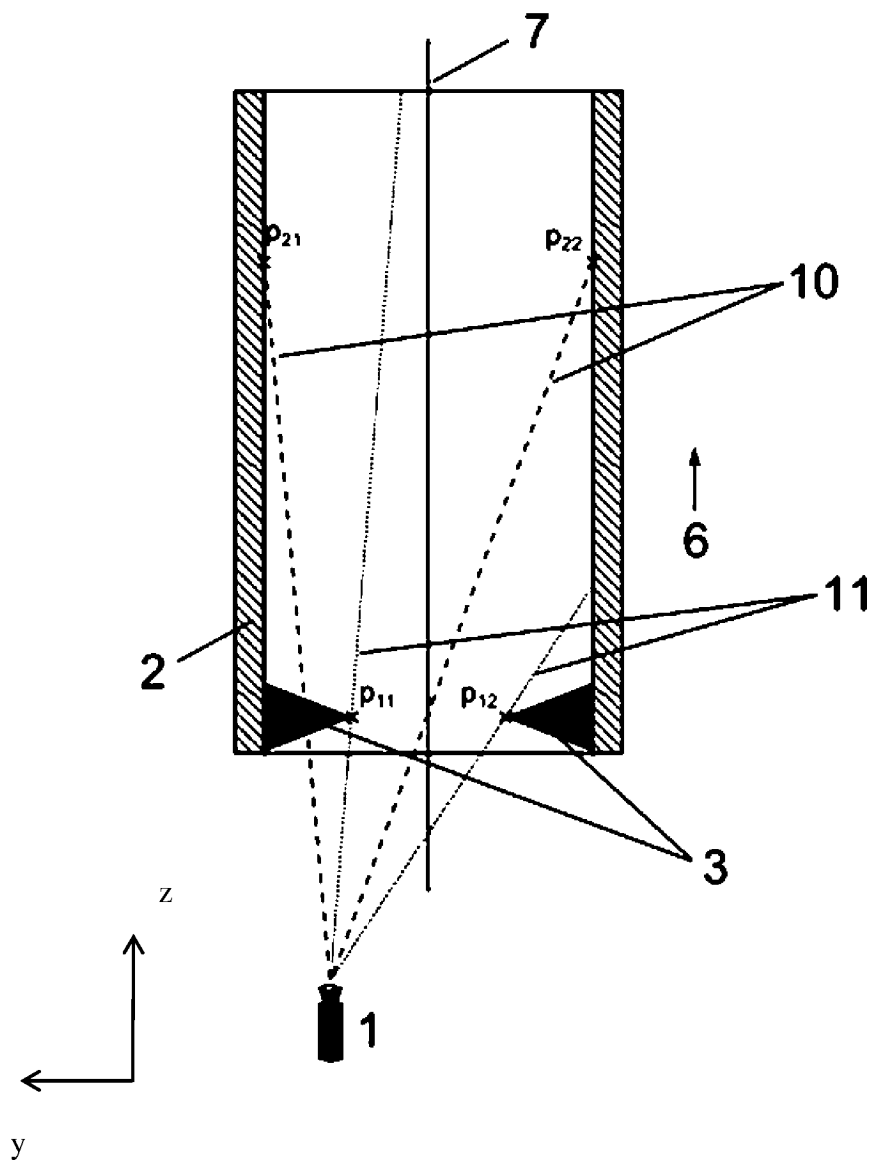


Fig. 3b:

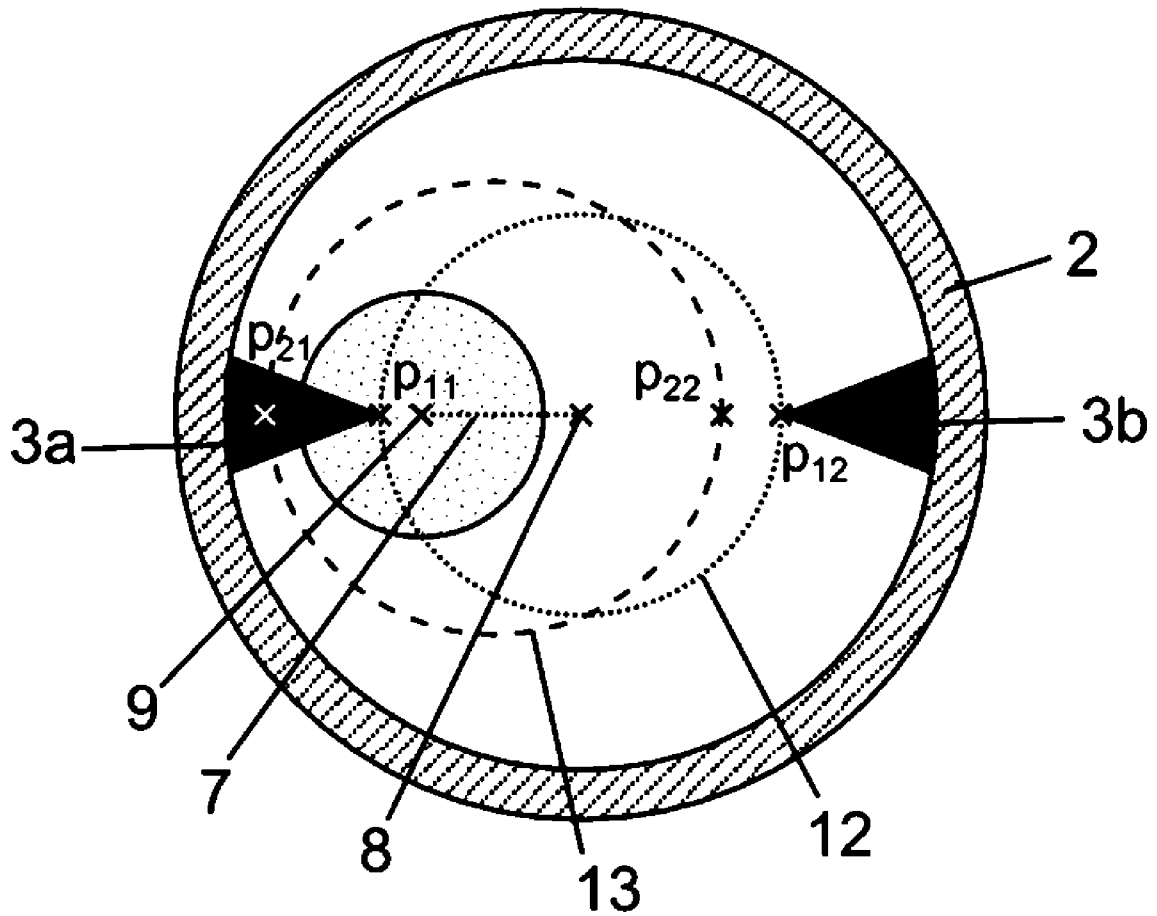


Fig. 4a:

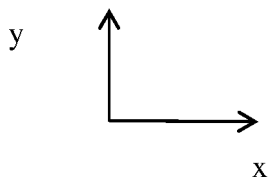
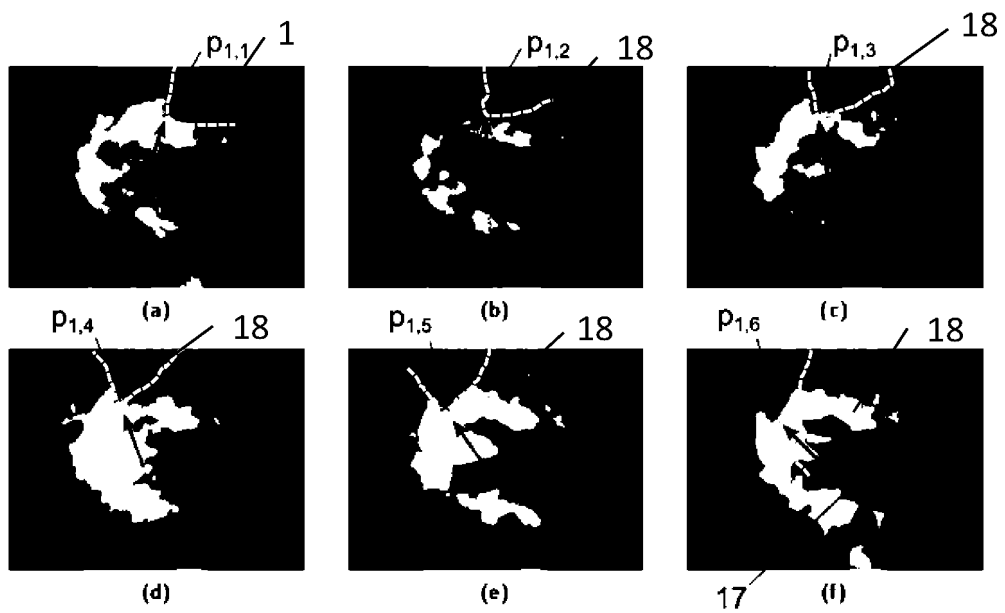


Fig. 4b:

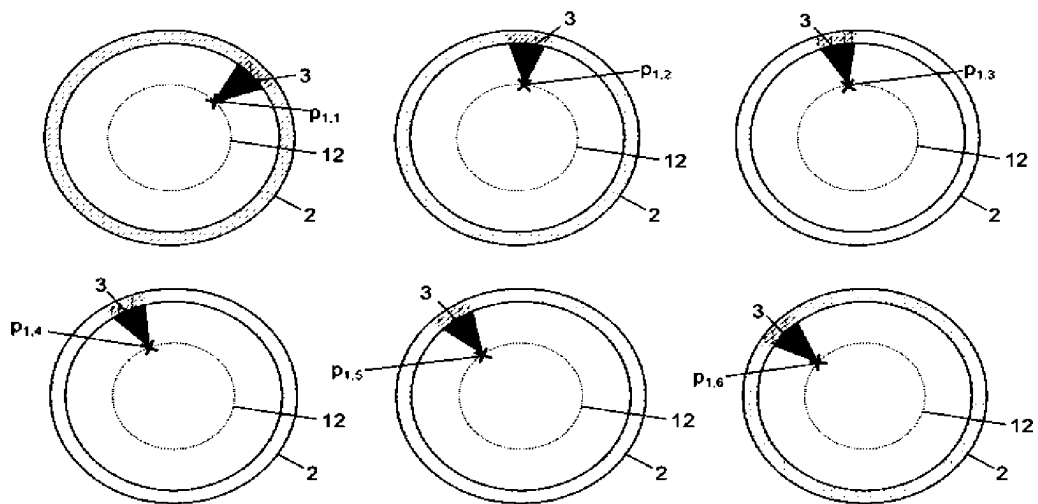


Fig.: 5

