

(19)



Deutsches
Patent- und Markenamt



(10) **DE 10 2015 117 131 A1** 2017.04.13

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2015 117 131.7**

(22) Anmeldetag: **07.10.2015**

(43) Offenlegungstag: **13.04.2017**

(51) Int Cl.: **G01F 1/66 (2006.01)**

G01D 18/00 (2006.01)

G01P 5/26 (2006.01)

(71) Anmelder:

**Bundesrepublik Deutschland, vertr. durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,
dieses vertreten durch den Präsidenten der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116
Braunschweig, DE**

(72) Erfinder:

**Juling, Markus, 13591 Berlin, DE; Steinbock,
Jonas, 10245 Berlin, DE; Lederer, Thomas, Dr.,
16247 Friedrichswalde, DE**

(74) Vertreter:

**Gramm, Lins & Partner Patent- und
Rechtsanwälte PartGmbH, 38122 Braunschweig,
DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE 10 2006 039 489 B3

DE 10 2014 011 480 B3

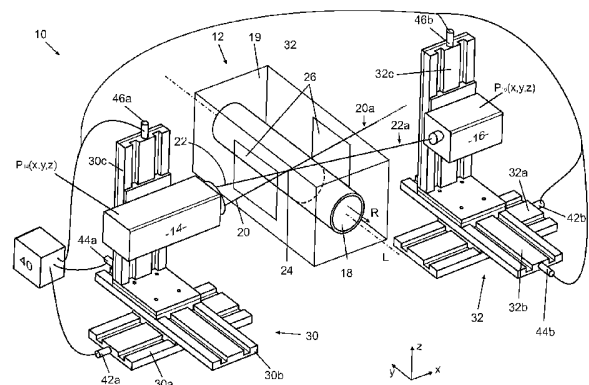
DE 10 2014 205 882 B3

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Laser-Durchflussmessgerät, Verfahren zum Kalibrieren des Laser-Durchflussmessgeräts und Verfahren zum Messen eines Durchflusses mit dem Laser-Durchflussmessgerät**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Laser-Durchflussmessgerät mit einer Durchleitung (12) zum Durchleiten eines Fluids, dessen Durchfluss (Q) zu bestimmen ist, in einer Strömungsrichtung (R), und einer Laserlichtquelle (14), die eingerichtet ist zum Erzeugen von zwei Laserstrahlen (20, 22), die einander in einem Lichtfeld (24) überlagern und ein Interferenzmuster bilden, aus dem eine Partikelgeschwindigkeit (v) im Fluid ermittelbar ist. Erfindungsgemäß ist ein Laserstrahlverlauf-Messgerät (16) vorgesehen, mittels dem ein realer Laserstrahlverlauf (20a, 22a) von jedem der zwei Laserstrahlen (20, 22) in einem Strahlverlauf hinter der Durchleitung (12) messbar ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Laser-Durchflussmessgerät mit (i) einer Durchleitung zum Durchleiten eines Fluids, dessen Durchfluss zu bestimmen ist, in einer Strömungsrichtung, und (ii) einer Laserlichtquelle, die eingerichtet ist zum Erzeugen von zwei Laserstrahlen, die einander in einem Lichtfeld überlagern und ein Interferenzmuster bilden, aus dem eine Partikelgeschwindigkeit im Fluid ermittelbar ist. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Kalibrieren eines Laser-Durchflussmessgerätes. Gemäß einem dritten Aspekt betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Messen eines Durchflusses mit dem Laser-Durchflussmessgerät.

[0002] Laser-Durchflussmessgeräte dienen der berührungsfreien Durchflussmessung. Dabei wird der Effekt ausgenutzt, dass Fluide in der Regel Partikel mit sich führen, die Laserlicht streuen. Durch Überlagerung zweier kohärenter Laserstrahlen wird ein Messgebiet geschaffen, in dem die Laserstrahlen ein Interferenzmuster ausbilden, in denen die Partikel das Laserlicht streuen. Da die beiden Laserstrahlen unter einem Winkel zueinander verlaufen, ergeben sich zwei Doppler-Verschiebungen, die miteinander gemischt werden können und dann eine Verschiebungsfrequenz ergeben, die der Doppler-Frequenz entspricht. Auf diese Weise wird eine Frequenz erhalten, die mit hoher Genauigkeit ausgewertet werden kann. So wird die Geschwindigkeit der Partikel im Lichtfeld erhalten. Um den Durchfluss zu berechnen, wird diese Messung an einer Vielzahl von Positionen in der Durchleitung auf einem Messgitter in der Querschnittsebene der Durchleitung durchgeführt und daraus der Durchfluss berechnet.

[0003] Die DE 10 2014 205 882 B1 betrifft ein gattungsgemäßes Laser-Durchflussmessgerät mit einer Durchleitung zum Durchleiten eines Fluids, dessen Durchleitung an zumindest drei Stellen eine Markierung aufweist. Die Laserlichtquelle ist relativ zur Durchleitung quer zur Strömungsrichtung verfahrbar. Das Laser-Durchflussmessgerät weist eine Positions-Messvorrichtung auf, mittels der eine Laserlichtquellen-Position der Laserlichtquelle relativ zur Markierung messbar ist.

[0004] Nachteilig an dem bekannten Laser-Durchflussmessgerät ist, dass die Partikelgeschwindigkeit von der Position im Rohr, insbesondere der radialen Position, abhängt und dass diese Position nur relativ zu den Markierungen gemessen werden kann.

[0005] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Messgenauigkeit bei der Laser-Durchflussmessung, insbesondere durch eine genauere Bestimmung der radialen Position des Messgebiets, zu verbessern.

[0006] Die Erfindung löst das Problem durch ein gattungsgemäßes Laser-Durchflussmessgerät, das ein Laserstrahlverlauf-Messgerät aufweist, mittels dem ein realer Laserstrahlverlauf von jedem der zwei Laserstrahlen in einem Strahlverlauf hinter der Durchleitung messbar ist. Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 6. Gemäß einem dritten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 7.

[0007] Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass die Lage des Lichtfelds, an der gemessen wird, sehr genau bestimmt werden kann. Hierfür werden zunächst mittels des Laserstrahlverlauf-Messgeräts die realen Laserstrahlverläufe von einem ersten Laserstrahl und einem zweiten Laserstrahl in einem Strahlverlauf hinter der Durchleitung präzise gemessen. Zudem werden theoretische Laserstrahlverläufe auf Basis von Anfangsparametern berechnet. Die Anfangsparameter umfassen beispielsweise die Brechungsindizes der beteiligten Materialien und Medien und/oder geometrische Abmessungen der Durchleitung, wie Abstände oder Wanddicken.

[0008] Die Anfangsparameter sind aber häufig nur ungenau bekannt. Daher wird die Laserlichtquelle auf zumindest eine Laserlichtquellen-Position positioniert und jeweils die Abweichung zwischen zumindest einem realen Laserstrahlverlauf und dem dazu korrespondierenden zumindest einen theoretischen Laserstrahlverlauf bestimmt. Werden mehrere Laserlichtquellen-Positionen angefahren, ergeben sich mehrere Abweichungen, aus denen eine Abweichung, die auch Gesamt-Abweichung genannt werden könnte, berechnet wird. Beispielsweise werden die einzelnen Abweichungen aufsummiert.

[0009] Diese Abweichung hängt von den Anfangsparametern ab. Die Anfangsparameter werden dann so verändert, dass die Abweichung minimiert wird. Das kann beispielsweise durch einen Levenberg-Marquardt-Algorithmus erfolgen. So werden Arbeitsparameter erhalten. Anhand der Arbeitsparameter kann aus der Position der Laserlichtquelle durch Strahlverfolgungsrechnung die Lage des Lichtfelds berechnet werden.

[0010] Es ist in anderen Worten möglich, aus den realen Laserstrahlverläufen, die außerhalb der Durchleitung gemessen werden, und ohne genaue A-priori-Kennntnis der Anfangsparameter, die exakte Lage des Lichtfelds innerhalb der Durchleitung zu berechnen. Das erhöht die Messgenauigkeit.

[0011] Ein Vorteil der Erfindung liegt darin, dass die Wandstärke und der Brechungsindex der Durchleitung, die vorzugsweise durch ein Rohr mit konstanter Wanddicke und konstantem Brechungsindex gebildet ist, vorab nur grob bekannt sein müssen.

[0012] Ändert sich die Temperatur des Fluids, so ändert sich dessen Brechungsindex. Anders als im Stand der Technik reicht eine erneute Kalibrierung, um Messfehler zu vermeiden. Insbesondere ist es also möglich den Brechungsindex des Fluids, bei dem es sich meist um Wasser handelt, zu bestimmen, ohne dessen Temperatur, Druck oder Zusammensetzung kennen zu müssen.

[0013] Darüber hinaus kann das Laser-Durchflussmessgerät während einer Durchflussmessung zur Temperaturmessung verwendet werden, wenn der Druck und die Zusammensetzung des Fluids konstant sind und die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Temperatur bekannt ist. Vorzugsweise besitzt das Laser-Durchflussmessgerät eine Ansteuerungseinheit, die einen digitalen Speicher, in dem diese Abhängigkeit tabelliert ist, und eine Recheneinheit aufweist, in der aus dem berechneten Brechungsindex die Temperatur berechnet wird.

[0014] Vorteilhaft ist zudem, dass eine Kalibrierung an einem Durchflussnormal entbehrlich ist. Zur Messung ist lediglich notwendig, ein erfindungsgemäßes Laser-Durchflussmessgerät an der Rohrleitung zu installieren, in der das Fluid fließt, dessen Durchfluss zu bestimmen ist. Nach Einbau wird eine Laserlichtquellen-Positioniervorrichtung kalibriert. Mittels der genau bekannten Position der Laserlichtquelle und der Arbeitsparameter können die theoretischen Laserstrahlverläufe genau berechnet werden. Damit ist die Lage des Lichtfelds bekannt, an der die Partikelgeschwindigkeit ermittelt wird. Für die Berechnung des Durchflusses ist daher keine Kalibrierung an einem Durchflussnormal nötig. Das erfindungsgemäße Laser-Durchflussmessgerät ist damit auch für eine Massenanalyse geeignet.

[0015] Vorteilhaft ist zudem, dass die Kalibrierung automatisiert durchgeführt werden kann. Es ist daher möglich und gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen, die Kalibrierung in regelmäßigen Zeitabschnitten automatisiert durchzuführen, was die erreichbare Messgenauigkeit weiter erhöht. Insbesondere vorteilhaft ist, dass auch bereits während der Messung einer Partikelgeschwindigkeit ein Abgleich zwischen den realen Laserstrahlverläufen und theoretischen Laserstrahlverläufen erfolgen kann und damit während der Messung gegebenenfalls die Werte der Anfangsparameter angepasst werden können.

[0016] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter der Durchleitung insbesondere eine Vorrichtung verstanden, die so transparent ist, dass das Laserlicht der Laserlichtquelle diese passieren kann. Besonders günstig ist es, wenn die Durchleitung ein transparentes Rohr und eine Druckkammer aufweist, die mit Druck beaufschlagt werden kann, sodass der Druck im Rohr und der das Rohr umgebende Druck gleich sind. Das Rohr ist dann im Kräftegleichgewicht

und deformiert sich nicht, auch wenn sich der Druck im Rohr ändert.

[0017] Unter dem Kalibrieren wird insbesondere ein Kalibrieren der Messgerät-Positioniervorrichtung verstanden, sodass eine Position des Lichtfelds in der Durchleitung kalibrierbar ist.

[0018] Vorzugsweise umfasst das Laser-Durchflussmessgerät einen Drucksensor zum Erfassen eines Fluiddrucks im Rohr und eine Druckregelvorrichtung, die auch so ausgebildet ist, dass der Druck der Druckkammer stets dem Druck im Rohr entspricht. Sofern das zu vermessende Fluid dafür geeignet ist, kann beispielsweise das Rohr eine Öffnung aufweisen, sodass in der Druckkammer zwangsläufig der gleiche Druck herrscht wie im Rohr.

[0019] Unter der Laserlichtquelle wird insbesondere eine Quelle verstanden, die zumindest zwei zueinander kohärente Laserstrahlen abgibt. Jeder Laserstrahl hat einen Strahlwinkel zu einer optischen Achse der Laserlichtquelle, wobei diese optische Achse der Mittelhalbierenden zwischen den beiden Laserstrahlen entspricht.

[0020] Unter einem Laserstrahlverlauf-Messgerät wird insbesondere eine CCD-Kamera mit mehreren Neutraldichte-Filtern verstanden, mittels der eine Intensitätsverteilung des Laserstrahls messbar ist. Über eine anschließende Anpassung eines 2D-Gaußverlaufs über die Intensitätsverteilung des Laserstrahls, ist ein Mittelpunkt des Laserstrahls präzise bestimmbar. Mittels der CCD-Kamera kann damit mittels Messung der Intensitätsverteilung an zumindest zwei Stellen im Laserstrahlverlauf, der reale Laserstrahlverlauf eines Laserstrahls in einem Strahlverlauf hinter der Durchleitung genau bestimmt und dem Kalibrierverfahren zugrunde gelegt werden.

[0021] Vorzugsweise weist das Laser-Durchflussmessgerät eine Messgerät-Positioniervorrichtung auf, mittels der das Laserstrahlverlauf-Messgerät automatisch auf eine vorgegebene Position relativ zur Laserlichtquelle positionierbar ist. Aufgrund der automatisch positionierbaren Laserlichtquelle-Positioniervorrichtung sowie der Messgerät-Positioniervorrichtung wird vorteilhafterweise erreicht, dass verschiedene Messpunkte schnell und präzise angefahren werden können.

[0022] Vorzugsweise weist das Laserstrahlverlauf-Messgerät einen Hartmann-Shack-Sensor auf. Der Vorteil eines derartigen Sensors liegt darin, dass der Verlauf eines Laserstrahls mit nur einer Messung und damit besonders schnell bestimmt werden kann. Mit einer herkömmlichen CCD-Kamera sind hierzu mindestens zwei Messungen zur Bestimmung eines Anfangspunktes und eines Richtungsvektors nötig.

[0023] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform besitzt das Laser-Durchflussmessgerät eine elektrische Ansteuereinheit, die eingerichtet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten (i) Positionieren der Laserlichtquelle auf eine Laserlichtquellen-Position, (ii) Ermitteln des realen Laserstrahlverlaufs zumindest eines der Laserstrahlen im Strahlverlauf hinter der Durchleitung, (iii) zumindest einmaliges Wiederholen der Schritte (i) und (ii), (iv) Berechnen eines theoretischen Laserstrahlverlaufs von jedem der zwei Laserstrahlen auf Basis von Anfangsparametern, (v) Anpassen der Anfangsparameter, sodass eine Abweichung zwischen den realen Laserstrahlverläufen und den theoretischen Laserstrahlverläufen minimiert wird, so dass Arbeitsparameter erhalten werden, mittels deren aus einer Position der Laserlichtquelle die Lage des Lichtfelds berechenbar ist.

[0024] Um die Anfangsparameter durch Anpassen in Arbeitsparameter zu überführen, werden die Schritte (i) und (ii) solange wiederholt, bis genügend Daten zur genauen Bestimmung der Arbeitsparameter vorliegen. Die Berechnung eines theoretischen Laserstrahlverlaufs erfolgt beispielsweise ausgehend von der Position der Laserlichtquelle mit Hilfe von Geradengleichungen und dem Snelliusschem Brechungsgesetz.

[0025] Vorzugsweise ist das Laser-Durchflussmessgerät eingerichtet zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten (i) Berechnen einer Lage des Lichtfelds anhand der Arbeitsparameter, (ii) Messen der Partikelgeschwindigkeit entlang einer Längsachse der Durchleitung mittels der Laserlichtquelle an der berechneten Lage des Lichtfeldes, (iii) Wiederholen der Schritte (i) und (ii), sodass ein Datensatz an Partikelgeschwindigkeiten erhalten wird, und (iv) Berechnen des Durchflusses aus dem Datensatz an Partikelgeschwindigkeiten. Aufgrund der sehr präzise angepassten Arbeitsparameter hat dieses Laser-Durchflussmessgerät eine besonders hohe Messgenauigkeit. Unter dem Merkmal, dass die Partikelgeschwindigkeit entlang der Längsachse gemessen wird, wird insbesondere verstanden, dass zumindest eine Geschwindigkeitskomponente ermittelt wird, die parallel zur Längsachse verläuft. Diese Messung wird vorzugsweise für eine Vielzahl an Messpositionen durchgeführt, die über den Querschnitt der Durchleitung verteilt sind. Die Messpunkte bilden dann ein Messgitter.

[0026] Vorzugsweise werden die realen Laserstrahlverläufe kontinuierlich gemessen, wenn die Laserlichtquelle zum Bestimmen der Partikelgeschwindigkeit auf verschiedene Positionen gebracht wird, wobei die Arbeitsparameter angepasst werden, wenn die Abweichung zwischen realen und auf Basis der momentanen Arbeitsparameter berechneten theoretischen Laserstrahlverläufe einen vorgegebenen Ma-

ximalwert überschreitet. Auf diese Weise wird das Laser-Durchflussmessgerät quasi kontinuierlich kalibriert.

[0027] Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Kalibrieren eines Laser-Durchflussmessgeräts, das (i) eine Durchleitung zum Durchleiten eines Fluids, dessen Durchfluss zu bestimmen ist, in einer Strömungsrichtung, (ii) eine Laserlichtquelle, die eingerichtet ist zum Erzeugen von zwei Laserstrahlen, die einander in einem Lichtfeld überlagern und ein Interferenzmuster bilden, mittels dem eine Partikelgeschwindigkeit im Fluid ermittelbar ist, und (iii) eine elektrische Ansteuereinheit aufweist, mit den Schritten (a) automatisches Ermitteln eines realen Laserstrahlverlaufs von jedem der zwei Laserstrahlen im Strahlverlauf hinter der Durchleitung, (b) Berechnen eines theoretischen Laserstrahlverlaufs von jedem der zwei Laserstrahlen auf Basis von Anfangsparametern, (c) Berechnen einer Abweichung zwischen dem realen Laserstrahlverlauf und dem theoretischen Laserstrahlverlauf von jedem der zwei Laserstrahlen, und (d) Anpassen der Anfangsparameter oder der Arbeitsparameter zum Minimieren der Abweichung, so dass Arbeitsparameter erhalten werden, mittels deren aus einer Position der Laserlichtquelle die Lage des Lichtfelds berechenbar ist.

[0028] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

[0029] Fig. 1 eine perspektivische Ansicht eines erfindungsgemäßen Laser-Durchflussmessgeräts,

[0030] Fig. 2a Laserstrahlverläufe und Lage des Lichtfelds in x-Richtung bei ungenauen Anfangsparametern,

[0031] Fig. 2b Laserstrahlverläufe und Lage des Lichtfelds in x-Richtung bei noch nicht vollständig angepassten Anfangsparametern,

[0032] Fig. 2c Laserstrahlverläufe und Lage des Lichtfelds in x-Richtung bei Arbeitsparametern,

[0033] Fig. 3 Laserstrahlrückverfolgung mit Anfangsparametern und

[0034] Fig. 4 das Anfahren einer vorgegebenen Ziel-Lage des Lichtfelds in einem vorgegebenen Messgitter.

[0035] Fig. 1 zeigt ein erfindungsgemäßes Laser-Durchflussmessgerät **10**, das eine Durchleitung **12**, eine Laserlichtquelle **14** und ein Laserstrahlverlauf-Messgerät **16** aufweist. Die Durchleitung **12** besteht aus einem transparenten Rohr **18**, das in einer Druckkammer **19** angeordnet ist. Die Druckkammer **19** ist so ausgebildet, dass in ihr stets der gleiche Druck

herrscht wie im Inneren des Rohrs **18**, so dass eine Druckdifferenz zwischen einer Außenseite des Rohrs **18** und einer Innenseite des Rohrs **18** in hinreichend guter Annäherung null ist.

[0036] Die Laserlichtquelle **14** erzeugt im Betrieb einen ersten Laserstrahl **20** und einen zweiten Laserstrahl **22**, die einander in einem Lichtfeld **24** überlagern. Da die Laserstrahlen **20**, **22** aus kohärentem Licht bestehen und beispielsweise aus einem Laserstrahl durch Strahlteilung erzeugt worden sind, bildet sich im Lichtfeld **24** ein Interferenzmuster aus. Das Rohr **18** ist aus einem Material hergestellt, das für das Laserlicht und das durch die Dopplerverschiebung entstehende Streulicht hinreichend transparent ist. Beispielsweise ist das Rohr **18** aus Glas aufgebaut.

[0037] Das Laser-Durchflussmessgerät **10** umfasst eine Laserlichtquellen-Positioniervorrichtung **30**, die im vorliegenden Fall einen ersten Lineartisch **30a**, mittels dem die Laserlichtquelle **14** in einer x-Richtung verfahrbar ist, und einen zweiten Lineartisch **30b** zum Verfahren der Laserlichtquelle **14** in eine zur x-Richtung senkrechten y-Richtung aufweist. Die Laserlichtquellen-Positioniervorrichtung **30** besitzt zudem einen dritten Lineartisch **30c** zum Verfahren der Laserlichtquelle **14** in einer z-Richtung, die senkrecht auf der x- und der y-Richtung steht. Die y-Richtung verläuft parallel zu einer Längsachse L des Rohrs **18**.

[0038] Das Laser-Durchflussmessgerät **10** weist weiterhin eine Messgerät-Positioniervorrichtung **32** auf, die einen ersten Lineartisch **32a**, einen zweiten Lineartisch **32b** und einen dritten Lineartisch **32c** aufweist, mittels der das Laserstrahlverlauf-Messgerät **16** relativ zur Laserlichtquelle **14** positionierbar ist.

[0039] Die Druckkammer **19** besitzt zwei schematisch eingezeichnete Fenster **26**, durch die die Laserstrahlen **20**, **22** auf das Rohr **18** fallen und es auf der gegenüber liegenden Seite in Richtung des Laserstrahlverlauf-Messgeräts **16** wieder verlassen. Es ist zu erkennen, dass der zweite Laserstrahl **22**, nachdem dieser die Druckkammer **19** über das Fenster **26** verlassen hat, auf das Laserstrahlverlauf-Messgerät **16** trifft.

[0040] Schematisch eingezeichnet ist eine elektrische Ansteuereinheit **40**. Die Ansteuereinheit **40** ist mit schematisch eingezeichneten Stellmotoren **42a**, **44a** und **46a** der Lineartische **30a**, **30b** und **30c** der Laserlichtquellen-Positioniervorrichtung **30** zum Ansteuern verbunden. Die Ansteuereinheit **40** ist zudem mit schematisch eingezeichneten Stellmotoren **42b**, **44b** und **46b** der Lineartische **32a**, **32b** und **32c** der Messgerät-Positioniervorrichtung **32** zum Ansteuern verbunden. Mittels der Ansteuereinheit **40** kann die Laserlichtquelle **14** auf eine vorgebbare Position $P_{14}(x, y, z)$ und das Laserstrahlverlauf-Messge-

rät **16** auf je eine vorgebbare Position $P_{16}(x, y, z)$ gebracht werden. Dazu sind die Laserlichtquellen-Positioniervorrichtung **30** und die Messgerät-Positioniervorrichtung **32** kalibriert worden.

[0041] Die Positionen $P_{14}(x, y, z)$ und $P_{16}(x, y, z)$ können in einem Koordinatensystem oder in ineinander umrechenbaren Koordinatensystemen angegeben werden. Die Position der Durchleitung **12** ist bekannt.

[0042] Die Fig. 2a bis Fig. 2c zeigen die Bestimmung der Lage des Lichtfelds **24** in x-Richtung bei einer Kalibrierung. Die Laserlichtquelle **14** ist so positioniert, dass das Lichtfeld **24** an einer beliebigen Position innerhalb der Durchleitung **12** liegt. Anschließend wird das nicht dargestellte Laserstrahlverlauf-Messgerät relativ zur Laserlichtquelle **14** so positioniert, dass die Lichtintensität der Laserstrahlen **20**, **22** in drei Sensorebenen S_1 , S_2 , S_3 gemessen werden können. Aus diesen Messwerten werden die realen Laserstrahlverläufe **20a**, **22a** bestimmt. Es ist lediglich ein Abschnitt der Durchleitung **12** dargestellt, so dass der linke und rechte Rand der Durchleitung **12** durch die Fenster **26** gebildet werden.

[0043] Zur Berechnung der theoretischen Laserstrahlverläufe **20b**, **22b** werden Anfangsparameter $p_{i,Anf.}$ herangezogen. Die theoretischen Laserstrahlverläufe **20b**, **22b** haben jeweils einen Abstand von den realen Laserstrahlverläufen **20a**, **22a**, der berechnet und gespeichert wird. Nachfolgend wird die Laserlichtquelle **14** sukzessive auf eine Vielzahl anderer Positionen $P_{14,i}(x, y, z)$ ($i = 1, 2, \dots$) gebracht und jeweils die Abstände bestimmt. Aus allen Abständen wird durch Aufsummieren die Abweichung errechnet.

[0044] Nachfolgend werden die Anfangsparameter $p_{i,Anf.}$ s , beispielsweise mittels dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus, so verändert, dass die Abweichung A minimal wird und die theoretischen Laserstrahlverläufe **20b**, **22b** im Wesentlichen den realen Laserstrahlverläufen **20a**, **22a** entsprechen. Die Anfangsparameter $p_{i,Anf.}$ werden so zu Arbeitsparametern p_i . Aus dem Schnittpunkt der theoretischen Laserstrahlverläufe **20b**, **22b** kann dann die Lage des Lichtfelds **24** präzise berechnet werden.

[0045] Ein Berechnungsbeispiel zur Berechnung der theoretischen Laserstrahlverläufe **20b**, **22b** auf Basis von Anfangsparametern $p_{i,Anf.}$ soll unter zu Hilfenahme von Fig. 3 gegeben werden. Der Berechnung werden die folgenden Anfangsparameter $p_{i,Anf.}$ zu Grunde gelegt:

$p_{1,Anf.}$ – Abstand E_1 zwischen Laserlichtquelle **14** und einer Außenseite des Fensters **26** in der Durchleitung **12**

$p_{2,Anf.}$ – Brechungsindex n_1 von Luft

$p_{3,Anf.}$ – Glasdicke E_2 des Fensters **26**

$p_{4,Anf.}$ – Brechungsindex n_2 von dem Glas des Fensters **26**

$p_{5,Anf.}$ – Abstand E_3 zwischen einer Innenseite des Fensters **26** und einer Außenseite des Rohres **18**

$p_{6,Anf.}$ – Brechungsindex n_3 von Wasser in der Druckkammer **19**

$p_{7,Anf.}$ – Glasdicke E_4 des Rohres **18**

$p_{8,Anf.}$ – Brechungsindex n_4 von dem Glas des Rohres **18**

$p_{9,Anf.}$ – Abstand E_5 zwischen zwei Innenseiten des Rohres **18**

$p_{10,Anf.}$ – Brechungsindex n_5 von dem Wasser im Rohr **18**

$p_{11,Anf.}$ – Glasdicke E_6 des Rohres **18**

$p_{12,Anf.}$ – Brechungsindex n_6 von dem Glas des Rohres **18**

$p_{13,Anf.}$ – Abstand E_6 zwischen einer Außenseite des Rohres **18** und einer Innenseite des Fensters **26**

$p_{14,Anf.}$ – Brechungsindex n_7 von Wasser in der Druckkammer

$p_{15,Anf.}$ – Glasdicke E_7 des Fensters **26**

$p_{16,Anf.}$ – Brechungsindex n_8 von dem Glas des Fensters **26**

$p_{17,Anf.}$ – Brechungsindex n_9 von Luft

[0046] Wenn die Brechungsindices n_1 – n_9 nicht bekannt sind, können diese entweder näherungsweise angenommen oder im Vorfeld bestimmt werden. Es ist nicht zwingend notwendig, die Anfangsparameter $p_{i,Anf.}$ genau zu kennen. Die Erfindung zeichnet sich dadurch aus, die Anfangsparameter $p_{i,Anf.}$ auch während der Messung in präzise Arbeitsparameter p_i überführen zu können.

[0047] Auf Grundlage des Snellius'schen Brechungsgesetzes und den verfügbaren Werten der Anfangsparameter $p_{i,Anf.}$ wird eine Strahlverfolgungsrechnung durchgeführt. Hierzu werden die realen Laserstrahlverläufe **20a**, **22a** mit theoretischen Laserstrahlverläufen **20b**, **22b** nachgebildet. Ein theoretischer Laserstrahlverlauf **20b**, **22b** verläuft zunächst ausgehend von der Laserlichtquelle **14** in einem bekannten Eintrittswinkel φ_1 durch ein Medium, beispielsweise Luft mit einem Brechungsindex n_1 . Dann trifft der Laserstrahl in dem Eintrittswinkel φ_1 auf das mit Abstand E_1 zur Laserlichtquelle **14** beabstandete Fenster **26**. Eine genaue Eintrittsstelle auf dem Fenster **26** kann aus dem Eintrittswinkel φ_1 und dem Abstand E_1 berechnet werden. Das Fenster **26** besteht aus Glas der Dicke E_2 und dem Brechungsindex n_2 . Mit Hilfe des Brechungsgesetzes kann nun ein Austrittswinkel φ_2 ausgehend von der Eintrittsstelle auf einer Außenseite des Fensters **26** berechnet werden, unter dem der Laserstrahl **20b**, **22b** das Glas durchläuft. Aus der Dicke des Glases E_2 und dem Austrittswinkel φ_2 wird die Austrittsstelle des Laserstrahls **20b**, **22b** aus dem Glas des Fensters **26** berechnet.

[0048] Dieses Vorgehen wird für den weiteren Strahlverlauf fortgesetzt, sodass ein theoretischer Laserstrahlverlauf **20b**, **22b** von jedem der zwei Laserstrahlen erhalten wird. Über eine Schnittpunktberechnung der beiden theoretischen Laserstrahlen **20b**, **22b** wird die Lage des Lichtfelds **24** berechnet. Die Anfangsparameter $p_{i,Anf.}$ ergeben noch zu ungenaue theoretische Laserstrahlverläufe, wie an der Abweichung A erkennbar ist. Die berechnete Lage des Lichtfelds **24** entspricht dann noch nicht einer wahren Lage. Eine weitere Anpassung der Anfangsparameter $p_{i,Anf.}$ ist notwendig.

[0049] In Fig. 4 ist das präzise Anfahren einer vorgegebenen Ziel-Lage Z in einem vorgegebenen Messgitter veranschaulicht. Das Messgitter liegt in der x - z Ebene und besteht aus 4×4 Messpunkten, die in einem quadratförmigen Messgitter verteilt sind. Es können auch andere, beispielsweise kreisförmige, Messgitter vorgesehen sein. Die Ziel-Lage Z eines jeden Messpunktes ist damit durch Zielkoordinaten innerhalb des Rohres **18** genau festgelegt.

[0050] Mit Hilfe der Anfangsparameter $p_{i,Anf.}$ werden zwei theoretische Laserstrahlverläufe berechnet. Aufgrund der Ansicht ist nur ein theoretischer Laserstrahlverlauf **20b** dargestellt. Die theoretischen Laserstrahlverläufe überlagern sich in einem Lichtfeld **24**, welches aber nicht an der vorgegebenen Ziel-Lage Z liegt. Während der Messung einer Partikelgeschwindigkeit v kann aufgrund der Abweichung A festgestellt werden, dass noch nicht an der vorgegebenen Ziel-Lage Z gemessen wird. Das bedeutet, dass der Wert für zumindest einen der Anfangsparameter $p_{i,Anf.}$ nicht präzise genug ist. Durch Anpassung der Anfangsparameter $p_{i,Anf.}$ wird der Verlauf der theoretischen Laserstrahlen präziser und dadurch die Lage des Lichtfelds **24** an die Ziel-Lage Z angepasst, bis diese im Wesentlichen übereinstimmen.

[0051] Wenn die Abweichung A kleiner einem vorgegebenen Maximalwert ist, die Lage des Lichtfelds **24** aber noch nicht der Ziel-Lage Z entspricht, muss die Laserlichtquelle **14** über die Laserlichtquellen-Positioniervorrichtung neu positioniert werden. Mit der neuen Position ergeben sich neue Laserstrahlverläufe **20a**, **22a**. Wenn die Ziel-Lage Z erreicht wurde, kann überprüft werden, ob die Abweichung A noch kleiner dem vorgegebenen Maximalwert ist. Gegebenenfalls müssen die Anfangsparameter $p_{i,Anf.}$ korrigiert und die Laserlichtquelle **14** dann wieder neu positioniert werden, so lange bis sich das Lichtfeld **24** in der Ziel-Lage Z befindet. Die Ziel-Lage Z ist dann unter Verwendung eines kalibrierten Laser-Durchflussmessgeräts **10** präzise angefahren.

[0052] Zum Messen eines Durchflusses Q wird die Partikelgeschwindigkeit v für eine Mehrzahl an Ziel-Lagen in dem vorgegebenen Messgitter im Rohr **18** ermittelt und durch Aufsummieren der Teilvolumen-

ströme der Durchfluss Q ermittelt. Dieses Verfahren gehört zum Stand der Technik und wird daher nicht weiter erläutert. Die Berechnung der Geschwindigkeit v des Partikels an der Ziel-Lage Z aus dem Interferenzabstand und der Dopplerfrequenz gehört ebenso zum Stand der Technik und wird hier nicht weiter erläutert.

Bezugszeichenliste

10	Laser-Durchflussmessgerät
12	Durchleitung
14	Laserlichtquelle
16	Laserstrahlverlauf-Messgerät
18	Rohr
19	Druckkammer
20	erster Laserstrahl
20a	realer Laserstrahlverlauf
20b	theoretischer Laserstrahlverlauf
22	zweiter Laserstrahl
22a	realer Laserstrahlverlauf
22b	theoretischer Laserstrahlverlauf
24	Lichtfeld
26	Fenster
30	Laserlichtquellen-Positionier- vorrichtung
30a	erster Lineartisch
30b	zweiter Lineartisch
30c	dritter Lineartisch
32	Messgerät-Positionier- vorrichtung
32a	erster Lineartisch
32b	zweiter Lineartisch
32c	dritter Lineartisch
40	elektrische Ansteuereinheit
42a, b	erster Stellmotor
44a, b	zweiter Stellmotor
46a, b	dritter Stellmotor
φ_i	Eintritts-/Austrittswinkel
A	Abweichung
E_i	Abstand, Dicke
L	Längsachse
n_i	Brechungsindex
$p_{i,Anf.}$	Anfangsparameter
p_i	Arbeitsparameter
$P_{14}(x, y, z)$	Position der Laserlichtquelle
$P_{16}(x, y, z)$	Position des Laserstrahlver- lauf-Messgeräts
Q	Durchfluss
R	Strömungsrichtung
S_i	Sensorebene
v	Partikelgeschwindigkeit
Z	Ziel-Lage

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- DE 102014205882 B1 [0003]

Patentansprüche

1. Laser-Durchflussmessgerät mit

(i) einer Durchleitung (12) zum Durchleiten eines Fluids, dessen Durchfluss (Q) zu bestimmen ist, in einer Strömungsrichtung (R), und

(ii) einer Laserlichtquelle (14), die eingerichtet ist zum Erzeugen von zwei Laserstrahlen (20, 22), die einander in einem Lichtfeld (24) überlagern und ein Interferenzmuster bilden, aus dem eine Partikelgeschwindigkeit (v) im Fluid ermittelbar ist, gekennzeichnet durch

(iii) ein Laserstrahlverlauf-Messgerät (16), mittels dem ein realer Laserstrahlverlauf (20a, 22a) von jedem der zwei Laserstrahlen (20, 22) in einem Strahlverlauf hinter der Durchleitung (12) messbar ist.

(iii) ein Laserstrahlverlauf-Messgerät (16), mittels dem ein realer Laserstrahlverlauf (20a, 22a) von jedem der zwei Laserstrahlen (20, 22) in einem Strahlverlauf hinter der Durchleitung (12) messbar ist.

2. Laser-Durchflussmessgerät nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch eine Messgerät-Positioniervorrichtung (32), mittels der das Laserstrahlverlauf-Messgerät (16) automatisch auf eine vorgegebene Position relativ zur Laserlichtquelle (14) positionierbar ist.

3. Laser-Durchflussmessgerät nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Laserstrahlverlauf-Messgerät (16) einen Hartmann-Shack-Sensor aufweist.

4. Laser-Durchflussmessgerät nach einem der voranstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine elektrische Ansteuereinheit (40), die eingerichtet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten:

(i) Positionieren der Laserlichtquelle (14) auf eine Laserlichtquellen-Position,

(ii) Ermitteln des realen Laserstrahlverlaufs (20a, 22a) von jedem der zwei Laserstrahlen (20, 22) im Strahlverlauf hinter der Durchleitung (12),

(iii) zumindest einmaliges Wiederholen der Schritte (i) und (ii),

(iv) Berechnen eines theoretischen Laserstrahlverlaufs (20b, 22b) von zumindest einem der Laserstrahlen (20, 22) auf Basis von Anfangsparametern ($p_{i,Anf.}$), und

(v) Anpassen der Anfangsparameter ($p_{i,Anf.}$) zum Minimieren einer Abweichung (A) zwischen dem realen Laserstrahlverlauf (20a, 22a) und dem theoretischen Laserstrahlverlauf (20b, 22b), sodass Arbeitsparameter (p_i) erhalten werden, mittels derer aus einer Position (P_{14}) der Laserlichtquelle (14) die Lage des Lichtfeldes (24) berechenbar ist.

5. Laser-Durchflussmessgerät nach Anspruch 4, das eingerichtet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten:

(a) Berechnen einer Lage des Lichtfeldes (24) anhand der Arbeitsparameter (p_i),

(b) Messen der Partikelgeschwindigkeit (v), insbesondere entlang einer Längsachse (L) der Durchlei-

tung (12), mittels der Laserlichtquelle (14) an der berechneten Lage des Lichtfeldes (24),

(c) Wiederholen der Schritte (i) und (ii), sodass ein Datensatz an Partikelgeschwindigkeiten (v) erhalten wird, und

(d) Berechnen des Durchflusses (Q) aus dem Datensatz an Partikelgeschwindigkeiten (v).

6. Verfahren zum Kalibrieren eines Laser-Durchflussmessgeräts, das

(i) eine Durchleitung (12) zum Durchleiten eines Fluids, dessen Durchfluss (Q) zu bestimmen ist, in einer Strömungsrichtung (R),

(ii) eine Laserlichtquelle (14), die eingerichtet ist zum Erzeugen von zwei Laserstrahlen (20), die einander in einem Lichtfeld (24) überlagern und ein Interferenzmuster bilden, mittels dem eine Partikelgeschwindigkeit (v) im Fluid ermittelbar ist, und

(iii) eine elektrische Ansteuereinheit (40) aufweist, mit den Schritten:

(a) Ermitteln zumindest eines realen Laserstrahlverlaufs (20a, 22a) von zumindest einem der Laserstrahlen (20, 22) im Strahlverlauf hinter der Durchleitung (12),

(b) Berechnen zumindest eines theoretischen Laserstrahlverlaufs (20b, 22b) von zumindest einem der Laserstrahlen (20, 22) auf Basis von Anfangsparametern ($p_{i,Anf.}$),

(c) Berechnen einer Abweichung (A) zwischen dem zumindest einen realen Laserstrahlverlauf (20a, 22a) und dem zumindest einen theoretischen Laserstrahlverlauf (20b, 22b) und

(d) Anpassen der Anfangsparameter ($p_{i,Anf.}$) zum Minimieren der Abweichung (A), so dass Arbeitsparameter (p_i) erhalten werden, mittels derer aus einer Position (P_{14}) der Laserlichtquelle (14) die Lage (P_{14}) des Lichtfeldes (24) berechenbar ist.

7. Verfahren zum Messen eines Durchflusses (Q) eines Fluids mit einem Laser-Durchflussmessgerät (10), das

(i) eine Durchleitung (12) zum Durchleiten eines Fluids, dessen Durchfluss (Q) zu bestimmen ist, in einer Strömungsrichtung (R),

(ii) eine Laserlichtquelle (14), die eingerichtet ist zum Erzeugen von zwei Laserstrahlen (20), die einander in einem Lichtfeld (24) überlagern und ein Interferenzmuster bilden, mittels dem eine Partikelgeschwindigkeit (v) im Fluid ermittelbar ist, und

(iii) eine elektrische Ansteuereinheit (40) aufweist, mit den Schritten:

(a) Berechnen einer Lage des Lichtfeldes (24) anhand von Arbeitsparametern (p_i), die mit dem Verfahren nach Anspruch 6 ermittelt wurden,

(b) Messen der Partikelgeschwindigkeit (v) entlang einer Längsachse (L) der Durchleitung (12) mittels der Laserlichtquelle (14) an der berechneten Lage des Lichtfeldes (24),

- (c) Wiederholen der Schritte (a) und (b), sodass ein Datensatz an Partikelgeschwindigkeiten (v) vorliegt, und
- (d) Berechnen des Durchflusses (Q) aus den Partikelgeschwindigkeiten (v) des Datensatzes.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

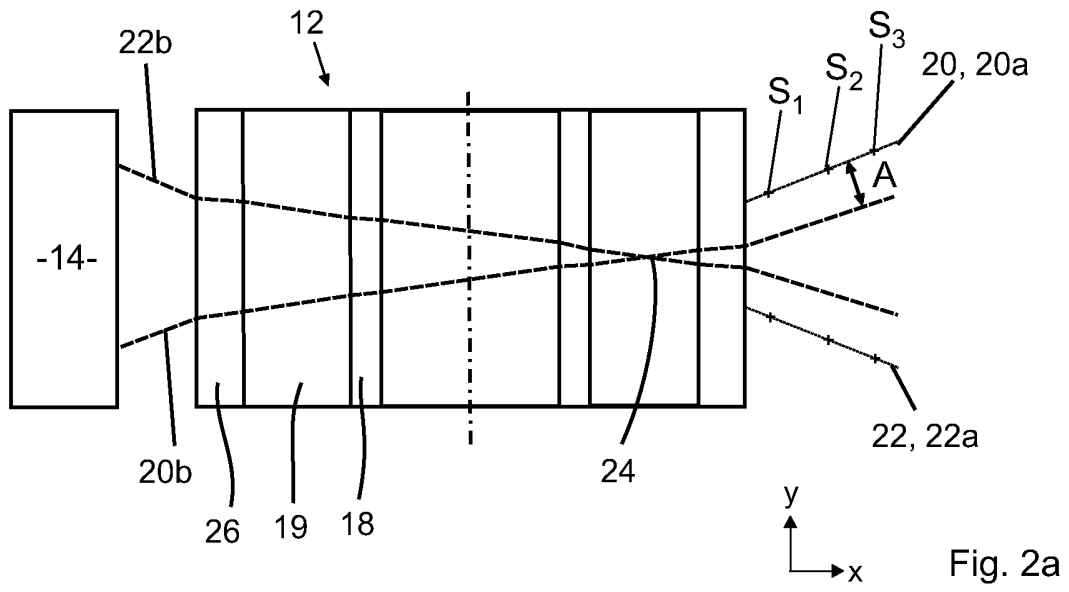


Fig. 2a

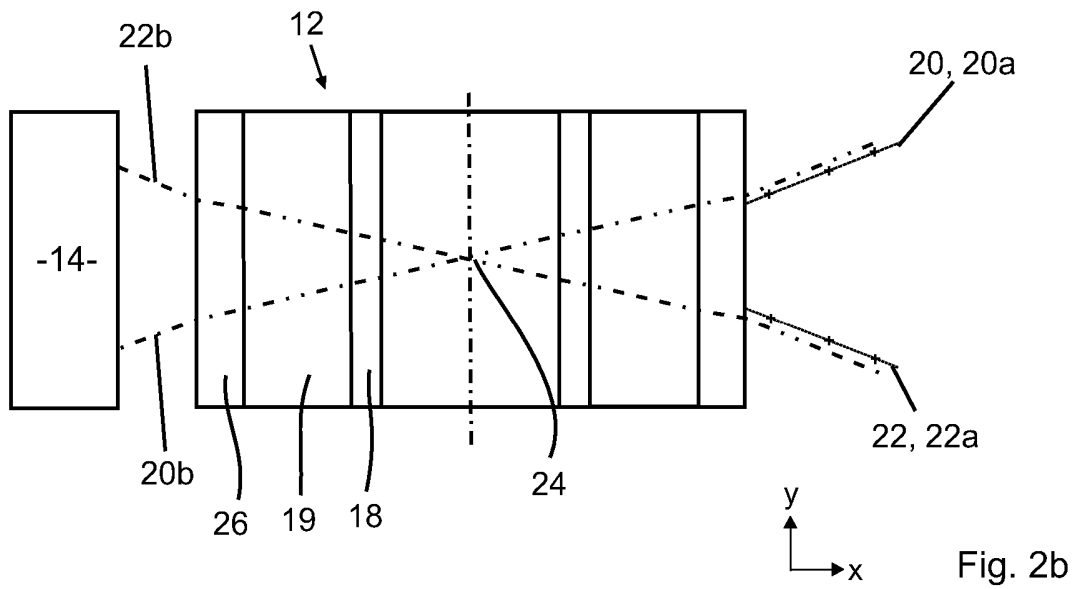


Fig. 2b

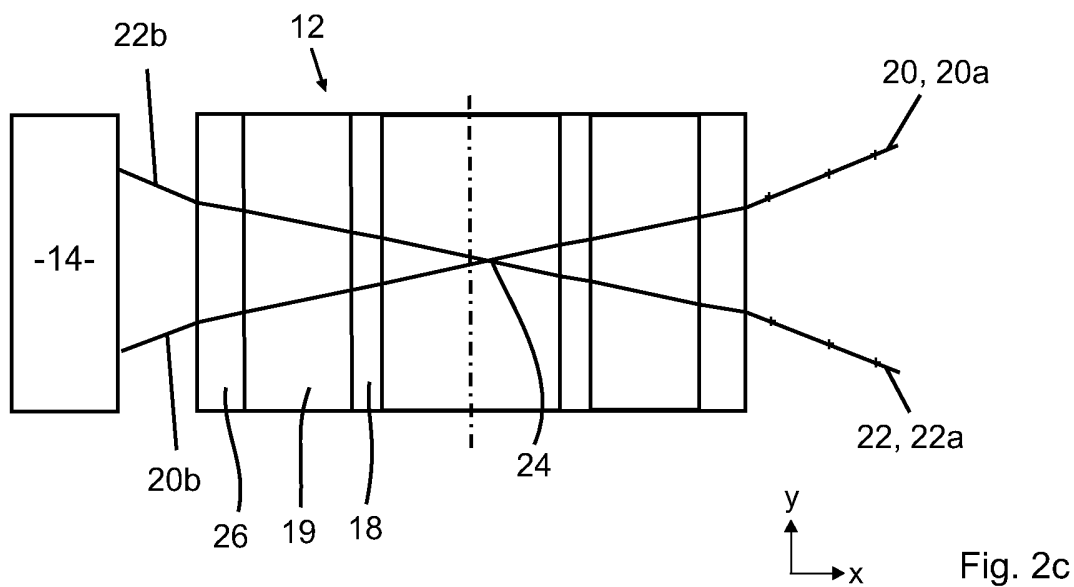


Fig. 2c

