



(10) **DE 10 2014 205 882 B3** 2015.08.27

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2014 205 882.1**

(22) Anmeldetag: **28.03.2014**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **27.08.2015**

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

G01P 5/26 (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:

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

(74) Vertreter:

**GRAMM, LINS & PARTNER GbR, 38122
Braunschweig, DE**

(72) Erfinder:

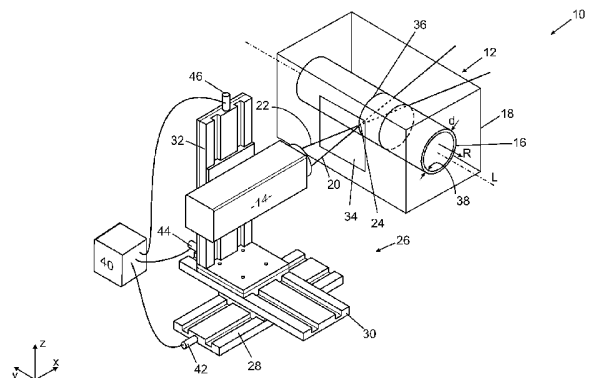
Juling, Markus, 13591 Berlin, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	195 11 666	A1
DE	10 2009 055 799	A1
DE	10 2010 049 673	A1
DE	10 2011 009 675	A1
US	4 600 301	A
US	5 074 661	A
US	6 064 473	A
US	4 632 548	A
US	5 905 568	A
WO	01/ 51 897	A1
WO	2008/ 022 628	A2
WO	2012/ 069 031	A1

(54) Bezeichnung: **Laser-Durchflussmessgerät und Verfahren zum Kalibrieren eines Laser-Durchflussmessgeräts**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Laser-Durchflussmessgerät (10) mit einer Durchleitung (12) zum Durchleiten eines Fluids, dessen Durchfluss zu bestimmen ist, in einer Strömungsrichtung (R) und einer Laserlichtquelle (14) zum Erzeugen von zwei Laserstrahlen (20, 22), die einander in einem Lichtfeld (24) überlagern und ein Interferenzmuster bilden. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass die Durchleitung (12) an zumindest drei Stellen (S) eine Markierung (36) aufweist und die Laserlichtquelle (14) relativ zur Durchleitung (12) quer zur Strömungsrichtung (R) verfahrbar 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 zum Erzeugen von zwei Laserstrahlen, die einander in einem Lichtfeld überlagern und ein Interferenzmuster bilden. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Kalibrieren eines Laser-Durchflussmessgeräts.

[0002] Laser-Durchflussmessgeräte, die auch als Laser-Doppler-Anemometer bezeichnet werden, dienen der berührungsfreien Durchflussmessung. Dabei wird der Effekt ausgenutzt, dass Strömungen in der Regel Partikel mit sich führen, die Laserlicht streuen. Durch Überlagerung zweier Laserstrahlen wird ein Messgebiet geschaffen, in dem die Laserstrahlen ein Interferenzstreifenmuster ausbilden und 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 Schiebungsfrequenz 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 Messvolumen erhalten. Um den Durchfluss zu berechnen, wird diese Messung an einer Vielzahl von Stützstellen durchgeführt und die so erhaltenen Teil-Volumenströme werden aufaddiert.

[0003] Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass die Geschwindigkeit der Partikel von der Position im Rohr, insbesondere der radialen Position, abhängt und dass diese Position nicht direkt gemessen werden kann. Es ist daher notwendig, die Lage des Messgebiets mit Hilfe des Brechungsgesetzes zu berechnen. Da die Positionen, an denen das Messvolumen zu positionieren ist, auf Basis der verwendeten Messstrategie vorab festgelegt werden, muss die jeweilige Position der Lasersonde, mittels der gekreuzten Laserstrahlen in das Rohr abgegeben werden, aus der gewünschten Lage des Messgebiets berechnet werden. Dies ist ein inverses Problem, das einen hohen Rechenaufwand nach sich zieht. Aufgrund der in das Brechungsgesetz eingehenden Annahmen und Konstanten, die vorab bestimmt werden müssen, ist die Laser-Durchflussmessung mit bekannten Verfahren aufwendig und relativ ungenau.

[0004] Aus der WO 2012/069031 A1 ist ein Verfahren zur Bestimmung von Differenzstreifenabständen zur Kalibrierung von Laser-Doppler-Velozimetern bekannt. Es wird eine Rotationsscheibe verwendet, die eine Vielzahl an Objekten enthält. Mittels eines Linearverstellers wird die Rotationsscheibe verfahren, bis jedes der auf der Rotationsscheibe vorhandenen Objekte ein Interferenzstreifenmuster durchquert hat, wobei jeweils die Amplitude des Streulichtsignals von Streulicht erfasst wird, das bei der Interaktion von Rotationsscheibe und Interferenzstreifenmuster entsteht. Mittels einer linearen Regressionsrechnung wird aus den so erhaltenen Messdaten auf den Interferenzstreifenabstand geschlossen und damit das Laser-Doppler-Velozimeter kalibriert. Eine derartige Vorrichtung ist relativ aufwendig.

[0005] Aus der DE 195 11 666 A1 sind ein gattungsgemäßes Laser-Durchflussmessgerät und ein Verfahren zur Durchführung von örtlich hochaufgelösten Geschwindigkeitsmessungen im Strömungsquerschnitt einer Rohrleitung bekannt. Dazu ist an einem Rohrleitungsstück, das ein Messfenster aufweist, eine Laserlichtquelle angeordnet, die zwei Laserstrahlen aussendet, die durch das Messfenster in die Rohrleitung eintreten und dort auf bekannte Art und Weise das Interferenzstreifenmuster erzeugt. Das zurückgestreute Licht wird frequenzanalysiert und aus der ermittelten Frequenz und dem Abstand der Interferenzstreifen die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt. Die Laserstrahlen werden so umgelenkt, dass sie an einer berechenbaren Stelle innerhalb des Rohrquerschnitts den Überlagerungsbereich bilden. Nachteilig an diesem Laser-Doppler-Velozimeter ist, dass die genaue Position des Überlagerungsbereichs im Rohr nicht oder nur mit hoher Messunsicherheit bestimmt werden kann.

[0006] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Messgenauigkeit bei der Laser-Durchflussmessung zu verbessern.

[0007] Die Erfindung löst das Problem durch ein gattungsgemäßes Laser-Durchflussmessgerät, bei dem die Durchleitung zumindest an drei Stellen eine Markierung aufweist und die Laserlichtquelle relativ zur Durchleitung einer Ebene quer zur Strömungsrichtung verfahrbar ist. Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 7.

[0008] Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass mittels der Markierungen eine Kalibrierung der Position der Laserlichtquelle möglich ist. Je größer die Zahl der Stellen ist, an denen Markierungen vorhanden sind, je besser ist die Genauigkeit, mit der aus der Position der Laserlichtquelle auf die Lage des Lichtfelds geschlossen wer-

den, das das Messvolumen darstellt. Es ist in anderen Worten möglich, aus der Position der Laserlichtquelle direkt auf die Lage des Lichtfelds zu schließen, ohne auf die Messung von Materialparametern, bspw. den Brechungsindices der beteiligten Materialien, angewiesen zu sein. Das erhöht die Messgenauigkeit deutlich.

[0009] Es ist ein weiterer Vorteil, dass die Durchflussmessung auch außerhalb eines Labors durchgeführt werden kann. So ist es lediglich notwendig, ein erfindungsgemäßes Laser-Durchflussmessgerät in der Rohrleitung zu installieren, in der das Fluid fließt, dessen Durchfluss zu messen ist. Nach Einbau kann das Laser-Durchflussmessgerät ohne Verwendung zusätzlicher externer Geräte kalibriert werden. Das erfindungsgemäße Laser-Durchflussmessgerät ist damit auch für eine Massenanwendung geeignet.

[0010] Vorteilhaft ist zudem, dass die Kalibrierung automatisiert durchgeführt werden kann. Es ist daher möglich, die Kalibrierung in regelmäßigen Zeitabschnitten automatisiert durchzuführen, was die erreichbare Messgenauigkeit weiter erhöht.

[0011] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter der Durchleitung insbesondere eine Vorrichtung verstanden, die so transparent ist, dass sowohl das Laserlicht der Laserlichtquelle als auch das gestreute Licht passieren können. 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. 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 den Druck im Rohr entspricht. Sofern das zu vermessene Fluid dafür geeignet ist, kann bspw. das Rohr eine Öffnung aufweisen, sodass in der Druckkammer zwangsläufig der gleiche Druck herrscht wie im Rohr.

[0012] Unter der Laserlichtquelle wird insbesondere eine Quelle verstanden, die 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.

[0013] Unter dem Merkmal, dass die Durchleitung an zumindest drei Stellen eine Markierung aufweist, wird insbesondere verstanden, dass die Durchleitung an diesen Stellen auf messbar andere Weise mit dem Laserlicht interagiert als abseits der Markierung. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist die Markierung streuend ausgebildet. Beispielsweise kann die Markierung durch Ritzen hergestellt sein. Eine Ausführungsform einer derartigen Markierung ist eine Ritzung, die in die Innenoberfläche der Durchleitung eingebracht ist und sich vorzugsweise um den Innenumfang der Durchleitung erstreckt. Alternativ oder zusätzlich kann die Markierung auch absorbierend oder reflektierend ausgebildet sein und bspw. Farbstoff oder eine Metallisierung umfassen.

[0014] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform sind die Markierungen in nur einer axialen Höhe bezüglich einer Längsachse der Durchleitung angeordnet. Die Markierungen liegen dann in der Regel auf einem Kreis. Das macht die Kalibrierung besonders einfach. Selbstverständlich ist es möglich, dass mehrere Markierungen existieren, die nicht notwendigerweise auf nur einer axialen Höhe liegen. Wichtig ist im bevorzugten Fall, dass zumindest eine Markierung existiert, die auf nur einer axialen Höhe angeordnet ist.

[0015] Vorzugsweise umfasst die Durchleitung ein transparentes Rohr. Besonders günstig ist es, wenn ein Durchmesser und/oder Außendurchmesser des transparenten Rohrs eine Abweichung von einem idealen Kreis von weniger als 200 μm hat. Alternativ oder zusätzlich ist es vorteilhaft, wenn der Innendurchmesser und/oder der Außendurchmesser eine Abweichung von höchstens 10^{-3} in Bezug auf den Durchmesser eines idealen Kreises mit diesem Durchmesser hat. Hat das Rohr also bspw. einen Innendurchmesser von 10 Millimeter, so beträgt die Abweichung von einem idealen Kreis weniger als 10 Mikrometer, bei einem Durchmesser von 100 mm ist die Abweichung vorzugsweise kleiner als 0,1 Millimeter.

[0016] Vorzugsweise umfasst das Laser-Durchflussmessgerät eine Positions-Messvorrichtung, mittels der eine Laserlichtquellen-Position der Laserlichtquelle relativ zur Markierung messbar ist. Besonders günstig ist es, wenn das Laser-Durchflussmessgerät zudem eine Positioniervorrichtung aufweist, mittels der die Laserlichtquelle automatisch auf eine vorgegebene Laserlichtquellen-Position relativ zur Markierung positionierbar ist. Es ist möglich, dass die Positions-Messvorrichtung Teil der der Positioniervorrichtung ist. Beispielsweise kann die Positioniervorrichtung einen x-y-Tisch umfassen. Die Messung der Position eines Objekts ist aus dem Stand der Technik bekannt und wird daher nicht näher beschrieben.

[0017] Vorzugsweise besitzt das Laser-Durchflussmessgerät eine elektrische Ansteuereinheit, die ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den folgenden Schritten (a) Verfahren der Laserlichtquelle auf eine Laserlichtquellen-Position, (b) Messen einer Partikelgeschwindigkeit entlang einer Längsachse der Durchleitung mittels der Laserlichtquelle, (c) Wiederholen der beiden Schritte und (d) Berechnen der Lagen des Lichtfelds aus den Laserlichtquellen-Positionen anhand von Kalibrierparametern, die durch Einmessen der Markierung erhalten wurden, und (e) berechnen des Durchflusses aus den Partikelgeschwindigkeiten. Dieses Laser-Durchflussmessgerät hat eine besonders hohe Messgenauigkeit.

[0018] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist die elektrische Ansteuereinheit ausgebildet zum Durchführen eines Verfahrens, das die folgenden Schritte umfasst: (a) Erfassen einer Laserlichtquellen-Position der Laserlichtquelle relativ zur Markierung, (b) Bestrahlen der Markierung mit zumindest einem der Laserstrahlen, (c) Erfassen einer Licht-Intensität an von der Markierung gestreutem Licht, (d) Bewegen der Laserlichtquelle relativ zur Markierung, sodass sich die Licht-Intensität ändert, (e) Wiederholen der Schritte (a) bis (d) für die zumindest drei Markierungen, sodass Licht-Intensitäten für zumindest drei Laserlichtquellen-Positionen erhalten werden, und (f) Ermitteln einer Lage des Lichtfelds relativ zu den Markierungen aus den Licht-Intensitäten und den zugehörigen Laserlichtquellen-Positionen, so dass aus einer vorgegebenen Laserlichtquellen-Position die Lage des Lichtfelds in der Durchleitung berechenbar ist.

[0019] Alternativ oder zusätzlich ist das Laser-Durchflussmessgerät mittels eines derartigen Verfahrens kalibriert worden. Laser-Durchflussmessgeräte, die hohe Genauigkeiten erreichen sollen, umfassen in der Regel einen Kalibrierschein, in dem beschrieben ist, auf welche Weise das Laser-Durchflussmessgerät kalibriert worden ist.

[0020] Ein erfindungsgemäßes Verfahren wird vorzugsweise mittels eines erfindungsgemäßen Laser-Durchflussmessgeräts durchgeführt.

[0021] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird das Laser-Durchflussmessgerät zu einer Längsachse der Durchleitung ausgerichtet. Das erfolgt beispielsweise dadurch, dass für zumindest drei Stellen auf der Markierung die Koordinaten im Koordinatensystem der Positions-Messvorrichtung bestimmt werden. Ergibt sich, dass die Koordinaten keine konstante y-Koordinate haben, wird die Positions-Messvorrichtung so gedreht, dass der y-Tisch parallel zur Längsachse der Durchleitung verläuft.

[0022] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt:

[0023] Fig. 1 eine perspektivische Ansicht eines erfindungsgemäßen Laser-Durchflussmessgeräts,

[0024] Fig. 2 das Laser-Durchflussmessgerät gemäß Fig. 1 mit einem schematischen Vergleich zwischen der positionsabhängig gemessenen Streuintensität und der Lage des Lichtfelds relativ zu einer Markierung,

[0025] Fig. 3 eine Grafik zur Darstellung, wie die Lage des Lichtfelds bestimmt wird,

[0026] Fig. 4 eine Grafik mit der Darstellung, wie die Position der Strahlteile bestimmt wird,

[0027] Fig. 5a einen Querschnitt durch die Durchleitung und

[0028] Fig. 5b die Bestimmung der Lage des Lichtfelds in x-Richtung bei einer Kalibrierung gemäß der Erfindung.

[0029] Fig. 1 zeigt ein erfindungsgemäßes Laser-Durchflussmessgerät **10**, das eine Durchleitung **12** und eine Laserlichtquelle **14** aufweist. Die Durchleitung **12** umfasst ein transparentes Rohr **16**, das in einer Druckkammer **18** angeordnet ist. Die Druckkammer **18** ist so ausgebildet, dass in ihr stets der gleiche Druck herrscht wie im Inneren des Rohrs **16**, sodass eine Druckdifferenz zwischen einer Außenseite des Rohrs **16** und einer Innenseite des Rohrs **16** in hinreichend guter Annäherung Null ist.

[0030] 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.

[0031] Das Rohr **16** ist aus einem Material hergestellt, das für das Laserlicht und das durch die Doppler-Verschiebung entstehende Streulicht hinreichend transparent ist. Beispielsweise ist das Rohr **16** aus Glas aufgebaut.

[0032] Das Laser-Durchflussmessgerät **10** umfasst eine Positioniervorrichtung **26**, die im vorliegenden Fall einen ersten Lineartisch **28**, mittels dem die Laserlichtquelle **14** in eine x-Richtung verfahrbar ist, und einen zweiten Lineartisch **30** zum Verfahren der Laserlichtquelle **14** in einer zur x-Richtung senkrechten y-Richtung umfasst. Die Positioniervorrichtung **26** besitzt zudem einen dritten Lineartisch **32** 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 **16**. Die beiden Laserstrahlen **20**, **22** verlaufen in der x-y-Ebene, was die Auswertung vereinfacht.

[0033] Die Druckkammer **18** besitzt ein schematisch eingezeichnetes Fenster **34**, durch das die Laserstrahlen **20**, **22** auf das Rohr **16** fallen. Es ist zu erkennen, dass das Rohr **16** eine Markierung **36** besitzt, die im vorliegenden Fall durch eine Ritzung gebildet ist, die auf einer Innenseite **38** eingebracht ist. Die Markierung **36** erstreckt sich auf nur einer axialen Höhe bezüglich der Längsachse L des Rohrs **16** und ist daher kreisförmig oder teilkreisförmig und insbesondere in erster Näherung nicht ellipsoid. Das Rohr **16** hat einen Innendurchmesser d_{innen} , der $d_{\text{innen}} = 75 \text{ mm} \pm 30 \text{ } \mu\text{m}$ beträgt. Der Außendurchmesser $d_{\text{außen}}$ beträgt $d_{\text{außen}} = 89 \text{ mm} \pm 100 \text{ } \mu\text{m}$.

[0034] Schematisch eingezeichnet ist eine elektrische Ansteuereinheit **40**, die mit einem schematisch eingezeichneten ersten Stellmotor **42** des ersten Lineartischs **28**, einem schematisch eingezeichneten zweiten Stellmotor **44** des zweiten Lineartischs **30** und einem dritten schematisch eingezeichneten Stellmotor **46** des dritten Lineartischs **32** zum Ansteuern verbunden ist. Mittels der Ansteuereinheit **40** kann die Laserlichtquelle **14** auf eine vorgebbare Position $P(x, y, z)$ gebracht werden.

[0035] Fig. 2 zeigt, dass die Laserlichtquelle **14** einen Laser **48**, einen Kollimator **50**, einen Strahlteiler **52**, eine Strahloptik **54** und eine Streulichtauskopplung **56** umfasst. Mittels der Streulichtauskopplung **56** wird von Partikeln gestreutes Laserlicht in eine Lichtleitfaser **57** eingekoppelt, die das Streulicht zu einer Auswerteeinheit leitet.

[0036] Schematisch sind Positionen der Markierung **36.1**, **36.2**, **36.3**, **36.4** relativ zur Laserlichtquelle **14** eingezeichnet. Es ist anhand des oben eingezeichneten Diagramms zu erkennen, dass die Streulichtintensität I in Abhängigkeit von der y-Position ein umso schärferes Maximum zeigt, je dichter das Lichtfeld **24**, das auch als Messvolumen bezeichnet werden kann, an der Markierung **36** liegt. (Bezugszeichen ohne Zählsuffix beziehen sich auf alle entsprechenden Objekte.) Die gezeigten Kurven $I(y)$ werden erhalten, indem eine feste x-Position angefahren wird und danach die Licht-Intensität I für mehrere y-Positionen gemessen wird.

[0037] Die erhaltenen Streulichtintensitätskurven $I(y)$ werden um ihr Maximum herum mit einer Anpassfunktion angepasst, beispielsweise mit einer Gauß-Funktion. Mittels der Anpassfunktion wird die Lage des Maximums y_{peak} berechnet. Es ergibt sich folglich für jede x-Position eine y-Position y_{peak} , an der das Maximum der Licht-Intensität I liegt.

[0038] In Fig. 3 sind für eine Vielzahl von x-Positionen die zugehörigen y_{peak} -Positionen des Maximums aufgetragen. Für den ersten Laserstrahl **20** liegen die Werte für y_{peak} auf einer ersten Gerade g_{20} , für den zweiten Laserstrahl **22** liegen die Maxima auf einer zweiten Gerade g_{22} . Die beiden Geraden g_{20} , g_{22} schneiden sich an der x-Position x_M , an der sich der Mittelpunkt des Messvolumens **24** befindet. In anderen Worten zeigt Fig. 3, wie die x-Koordinate x_M des Mittelpunkts des Messvolumens **24** bestimmt wird. Die zugehörige y-Koordinate ist die Y-Koordinate y_M des Mittelpunkts des Messvolumens **24**.

[0039] Beim Anpassen der Funktionen $I(Y)$, die in Fig. 2 gezeigt sind, wird zudem die Strahlbreite d erhalten. Fig. 4 zeigt das Diagramm, in dem diese Strahlbreite d über die x-Koordinate aufgetragen ist. Durch erneutes Anpassen, beispielsweise mit einer Parabel, lässt sich die x-Koordinate x_W der Strahltaile berechnen.

[0040] Durch das Vorgehen, das in den Fig. 3 und Fig. 4 gezeigt ist, können folglich die Koordinaten x_M , y_M berechnet werden, die die Laserlichtquelle **14** einnehmen muss, damit das Messvolumen **24** an einer Stelle der Markierung **36** positioniert ist.

[0041] Das geschilderte Verfahren wird für eine Vielzahl an Stellen auf der Markierung durch geführt. Man erhält so eine Menge an Punkten $(x_{M,i}, y_{M,i}, z_{M,i})$ für $i = 1, 2, 3, \dots, N$, die die Lage der Markierung **36** im Koordinatensystem der Laserlichtquelle **14** beschreiben.

[0042] Fig. 5a zeigt, wie bei konstanter z-Koordinate an einer ersten Stelle S1 und einer zweiten Stelle S2 die Lage der Markierung **36** bestimmt wird.

[0043] Muss die Laserlichtquelle auf die Koordinaten $(x_{M,1}, y_{M,1}, z_{M,1})$ gefahren werden, damit das Messvolumen die Markierung **36** an der Stelle S1 = (x_1, y_1, z_1) trifft und muss die Laserlichtquelle auf die Koordinaten $(x_{M,2}, y_{M,2}, z_{M,2})$ gefahren werden, damit das Messvolumen die Markierung **36** an der Stelle S2 = (x_2, y_2, z_1) trifft, so liegt das Messvolumen an einer Stelle

$$S3 = (x_3, y_3, z_1) = (x_1, y_1, z_1) + a[(x_2, y_2, z_1) - (x_1, y_1, z_1)] \text{ mit } 0 < a < 1,$$

so muss die Laserlichtquelle auf die x- und y-Koordinaten

$$(x_{M,3}, y_{M,3}) = (x_{M,1}, y_{M,1}) + a[(x_{M,2}, y_{M,2}) - (x_{M,1}, y_{M,1})]$$

gefahren werden. In anderen Worten kann die Position in der x-y-Ebene, an die die Laserlichtquelle gefahren werden muss, durch lineare Interpolation berechnet werden.

[0044] Fig. 5b zeigt, dass die z-Koordinate weiter mit Hilfe des Brechungsgesetzes berechnet werden muss, sofern die beiden Laserstrahlen nicht die Oberflächen des Glasrohrs unter einem rechten Winkel schneiden.

[0045] Ist das Strömungsprofil bekannt, insbesondere als radialsymmetrisch bekannt, ist es vorteilhaft, da ausreichend, ausschließlich in derjenigen x-y-Ebene zu messen, die durch den Mittelpunkt M des Rohrs verläuft. Diese x-y-Ebene kann aus den Koordinaten der Stellen, an denen die Markierung vorliegt, berechnet werden, da diese auf einem Kreis liegen. Alternativ kann die Intensität des am Rohr rückgestreuten Laserlichts in Abhängigkeit von der z-Koordinate gemessen werden, wenn die Oberkante des Rohrs und die Unterkante des Rohrs getroffen wird. So werden die z-Koordinaten von Ober- und Unterkante ermittelt und der Mittelpunkt M liegt auf halber Strecke.

[0046] Bei Verfahren nach dem Stand der Technik muss die Position, auf die die Laserquelle gefahren werden muss, auch für die x- und y-Koordinate aus dem Brechungsgesetz berechnet werden.

[0047] Zum Messen eines Durchflusses Q wird die Partikelgeschwindigkeit v für eine Mehrzahl an Stellen im Rohr **16** ermittelt und durch Aufsummieren der Durchfluss Q ermittelt. Dieses Verfahren gehört zum Stand der Technik und wird daher nicht weiter erläutert.

[0048] Die Geschwindigkeit v des Partikels am Ort des Messvolumens **24** ergibt sich aus

$$v = L_I \cdot f_D$$

wobei L_I der Interferenzstreifenabstand ist und f_D die Dopplerfrequenz.

[0049] Es gilt

$$L_I(x) = \frac{\lambda}{2 \sin \varphi} \left[1 + \frac{(x - x_M) \cos^2 \varphi \left((x - x_M) \cos^2 \varphi - (x_w - x_M) \right)}{x_R^2 \cos^2 \varphi - (x_w - x_M) \left((x - x_M) \cos^2 \varphi - (x_w - x_M) \right)} \right]$$

mit

- φ : Winkel zwischen den Laserstrahlen
- x_M : x-Koordinate des Mittelpunkts des Messvolumens
- x_w : x-Koordinate der Strahltaile
- λ : Wellenlänge des Laserstrahls
- x_R : Rayleighlänge des Laserstrahls (Abstand zwischen der Strahltaile und dem Ort, an dem der Durchmesser des Laserstrahls auf das -fache zugenommen hat)

[0050] Alternativ wird der Interferenzstreifenabstand L_I mittels eines Geschwindigkeitsnormals ermittelt.

Bezugszeichenliste

10	Laser-Durchflussmessgerät
12	Durchleitung
14	Laserlichtquelle
16	Rohr
18	Druckkammer
20	erster Laserstrahl
22	zweiter Laserstrahl
24	Lichtfeld, Messvolumen
26	Positioniervorrichtung
28	erster Lineartisch
30	zweiter Lineartisch
32	dritter Lineartisch
34	Fenster
36	Markierung
38	Innenseite
40	Ansteuereinheit
42	Erster Stellmotor
44	zweiter Stellmotor
46	dritter Stellmotor
48	Laser
50	Kollimator
52	Strahlleiter
54	Strahloptik
56	Streulichtauskopplung
d_{innen}	Innen-Durchmesser
d	Strahldurchmesser
f_D	Dopplerfrequenz
I	Licht-Intensität des Streulichts
L	Längsachse
L_I	Interferenzstreifenabstand
M	Mittelpunkt des Rohrs
P	Laserlichtquellen-Position
Q	Querfluss
S	Stelle
x_M	Lichtfeld-Mittelpunkt

Patentansprüche

1. Laser-Durchflussmessgerät (10) mit
 - (i) einer Durchleitung (12) zum Durchleiten eines Fluids, dessen Durchfluss zu bestimmen ist, in einer Strömungsrichtung (R) und
 - (ii) einer Laserlichtquelle (14) zum Erzeugen von zwei Laserstrahlen (20, 22), die einander in einem Lichtfeld (24) überlagern und ein Interferenzmuster bilden,
dadurch gekennzeichnet, dass
 - (iii) die Durchleitung (12) an zumindest drei Stellen (S) eine Markierung (36) aufweist,
 - (iv) die Laserlichtquelle (14) relativ zur Durchleitung (12) quer zur Strömungsrichtung (R) verfahrbar ist und
 - (v) das Laser-Durchflussmessgerät eine Positions-Messvorrichtung, mittels der eine Laserlichtquellen-Position der Laserlichtquelle (15) relativ zur Markierung (36) messbar ist, aufweist.
2. Laser-Durchflussmessgerät (10) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Markierungen (36) auf nur einer axialen Höhe bezüglich einer Längsachse (L) der Durchleitung (12) angeordnet sind.
3. Laser-Durchflussmessgerät (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 - die Durchleitung (12) ein transparentes Rohr (16) umfasst, dessen Innendurchmesser (d_{innen}) und/oder Außendurchmesser eine Abweichung von einem idealen Kreis von weniger als 200 Mikrometer hat und/oder dass
 - die Markierung (36) an einem Umfang des Rohrs (16) ausgebildet ist.

4. Laser-Durchflussmessgerät (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Positioniervorrichtung (26), mittels der die Laserlichtquelle (14) automatisch auf eine vorgegebene Laserlichtquellen-Position (P) relativ zur Markierung (36) positionierbar ist.

5. Laser-Durchflussmessgerät (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine elektrische Ansteuereinheit (40), die ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten:

- (a) Verfahren der Laserlichtquelle (14) auf eine Laserlichtquellen-Position (P),
- (b) Messen einer Partikelgeschwindigkeit entlang einer Längsachse der Durchleitung (12) mittels der Laserlichtquelle (14),
- (c) Wiederholen der Schritte (a) und (b) für andere Laserlichtquellen-Positionen (P),
- (d) Berechnen der Lagen des Lichtfelds (24) aus den Laserlichtquellen-Positionen (P) anhand von Kalibrierparametern, die durch Einmessen der Markierungen (36) erhalten wurden, und
- (e) Berechnen des Durchflusses aus den Partikelgeschwindigkeiten.

6. Laser-Durchflussmessgerät (10) nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die elektrische Ansteuereinheit (40) ausgebildet ist zum Durchführen eines Verfahrens, das die folgenden Schritte umfasst:

- (a) Erfassen einer Laserlichtquellen-Position der Laserlichtquelle (14) relativ zur Markierung (36),
- (b) Bestrahlen der Markierung (36) mit zumindest einem der Laserstrahlen (20, 22),
- (c) Erfassen einer Licht-Intensität (I) an von der Markierung (36) gestreutem Licht, (d) Bewegen der Laserlichtquelle (14) relativ zur Markierung (36), sodass sich die Licht-Intensität (I) ändert,
- (e) Wiederholen der Schritte (a) bis (d) für die zumindest drei Markierungen, sodass Licht-Intensitäten (I) für zumindest drei Laserlichtquellen-Positionen erhalten werden, und
- (f) Ermitteln einer Lage des Lichtfelds (24) relativ zu den Markierungen (36) aus den Licht-Intensitäten (I) und den zugehörigen Laserlichtquellen-Positionen, sodass aus einer vorgegebenen Laserlichtquellen-Position (P) die Lage des Lichtfelds (24) in der Durchleitung (12) berechenbar ist.

7. Verfahren zum Kalibrieren eines Laser-Durchflussmessgeräts (10), das

- (i) eine Durchleitung (12) zum Durchleiten eines Fluids, dessen Durchfluss zu bestimmen ist, in einer Strömungsrichtung (R) und
- (ii) eine Laserlichtquelle (14) zum Erzeugen von zwei Laserstrahlen (20, 22), die einander in einem Lichtfeld (24) überlagern und ein Interferenzmuster bilden, aufweist,
- (iii) wobei die Durchleitung zumindest drei Markierungen aufweist, mit den Schritten:
 - (a) Erfassen einer Laserlichtquellen-Position der Laserlichtquelle (14) relativ zur Markierung,
 - (b) Bestrahlen der Markierung (36) mit zumindest einem der Laserstrahlen (20, 22),
 - (c) Erfassen einer Licht-Intensität (I) an von der Markierung (36) gestreutem Licht,
 - (d) Bewegen der Laserlichtquelle (14) relativ zur Markierung (36), sodass sich die Licht-Intensität (I) ändert,
 - (e) Wiederholen der Schritte (a) bis (d) für die zumindest drei Markierungen, sodass Licht-Intensitäten (I) für zumindest drei Laserlichtquellen-Positionen erhalten werden,
 - (f) Ermitteln einer Lage des Lichtfelds (24) relativ zu den Markierungen aus den Licht-Intensitäten (I) und den zugehörigen Laserlichtquellen-Positionen, sodass aus einer vorgegebenen Laserlichtquellen-Position die Lage des Lichtfelds (24) in der Durchleitung (12) berechenbar ist.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Bewegen der Laserlichtquelle (14) ein Bewegen in zwei unabhängigen Raumdimensionen ist und das Ermitteln einer Lage des Lichtfelds (24) die folgenden Schritte umfasst:

- (f1) für die Licht-Intensitäten (I), die von der Streuung des ersten Laserstrahls an einer vorgegebenen Markierung (36) hervorgerufen werden, Berechnen eines Erstlaserstrahl-Mittelpunkts ($y_{20,peak}$) des ersten Laserstrahls (20) durch Anpassen der Licht-Intensität (I) mit einer Fit-Funktion,
- (f2) für die Licht-Intensitäten (I), die von der Streuung des zweiten Laserstrahls (22) an der vorgegebenen Markierung hervorgerufen werden, Berechnen eines Zweitlaserstrahl-Mittelpunkts ($y_{22,peak}$) des zweiten Laserstrahls durch Anpassen der Licht-Intensität (I) mit einer Fit-Funktion und
- (f3) Berechnen eines Lichtfeld-Mittelpunkts (x_M) aus den Erstlaserstrahl-Mittelpunkten ($y_{20,peak}$) und den Zweitlaserstrahl-Mittelpunkten, insbesondere durch Anpassen der Erstlaserstrahl-Mittelpunkte ($y_{20,peak}$) mit einer ersten Geraden (g_{20}), Anpassen der Zweitlaserstrahl-Mittelpunkte ($y_{22,peak}$) mit einer zweiten Geraden (g_{22}) und Berechnen des Lichtfeld-Mittelpunkts (24) als Schnittpunkt der ersten Geraden (g_{20}) und der zweiten Geraden (g_{22}).

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 oder 8, gekennzeichnet durch den Schritt:

Berechnen des Winkels zwischen den beiden Laserstrahlen (**20, 22**) aus den Maxima der Intensitäten.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Berechnen der Lage des Lichtfelds (**24**) die folgenden Schritte umfasst:

(g1) für die Licht-Intensitäten (I), die von der Streuung des ersten Laserstrahls an einer vorgegebenen Markierung (**36**) hervorgerufen werden, Berechnen eines Erstlaserstrahl-Durchmessers des ersten Laserstrahls, insbesondere durch Anpassen der Licht-Intensität (I) mit einer Fit-Funktion, oder

(g2) für die Licht-Intensitäten (I), die von der Streuung des zweiten Laserstrahls an der vorgegebenen Markierung (**36**) hervorgerufen werden, Berechnen eines Zweitlaserstrahl-Durchmessers des zweiten Laserstrahls, insbesondere durch Anpassen der Licht-Intensität (I) mit einer Fit-Funktion und

(g3) Berechnen einer Lichtfeld-Strahltaile

aus den Erstlaserstrahl-Durchmessern, insbesondere durch Anpassen mit einer Anpassfunktion oder aus den Zweitlaserstrahl-Durchmessern, insbesondere durch Anpassen mit einer Anpassfunktion.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

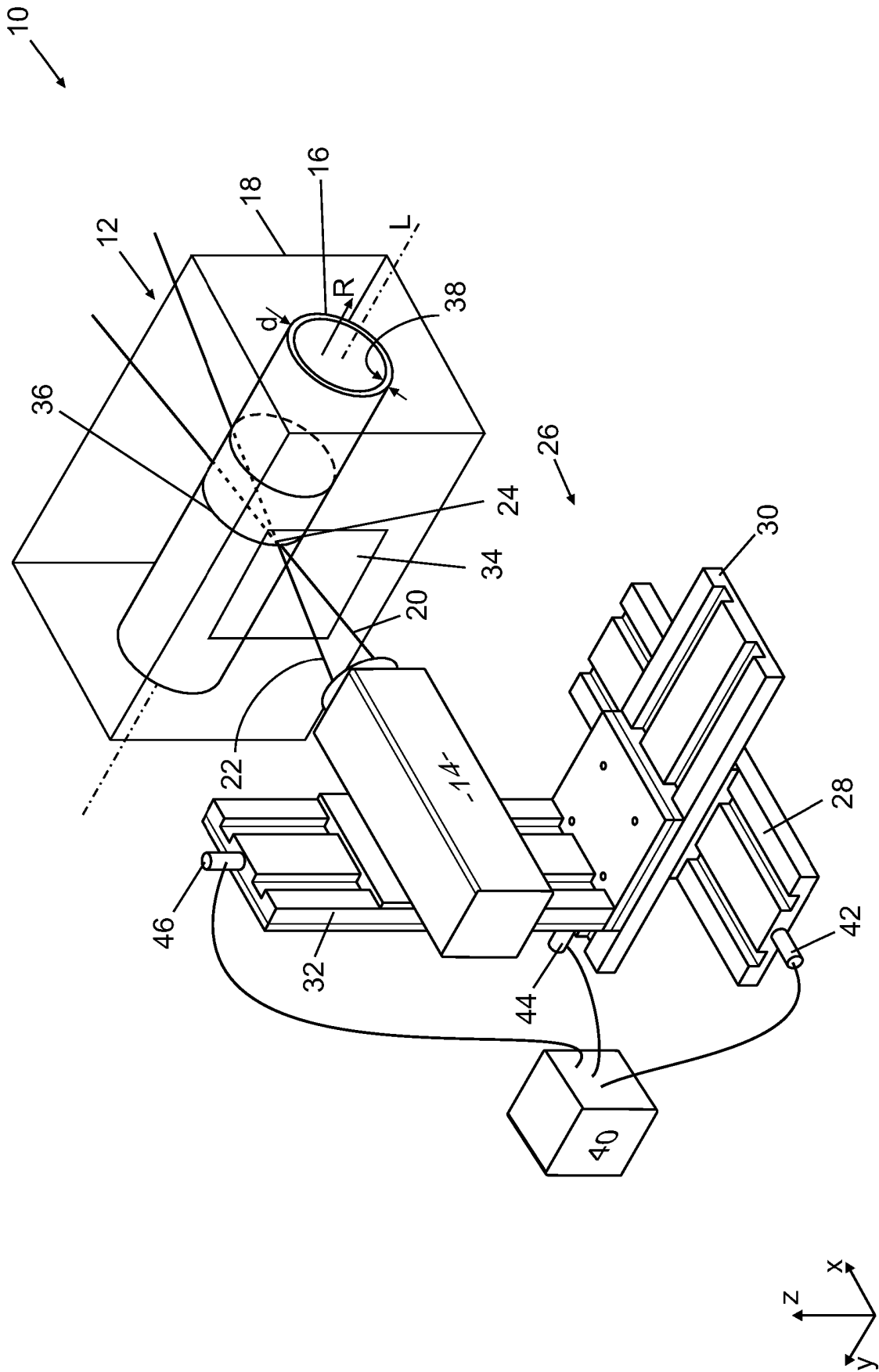


Fig. 1

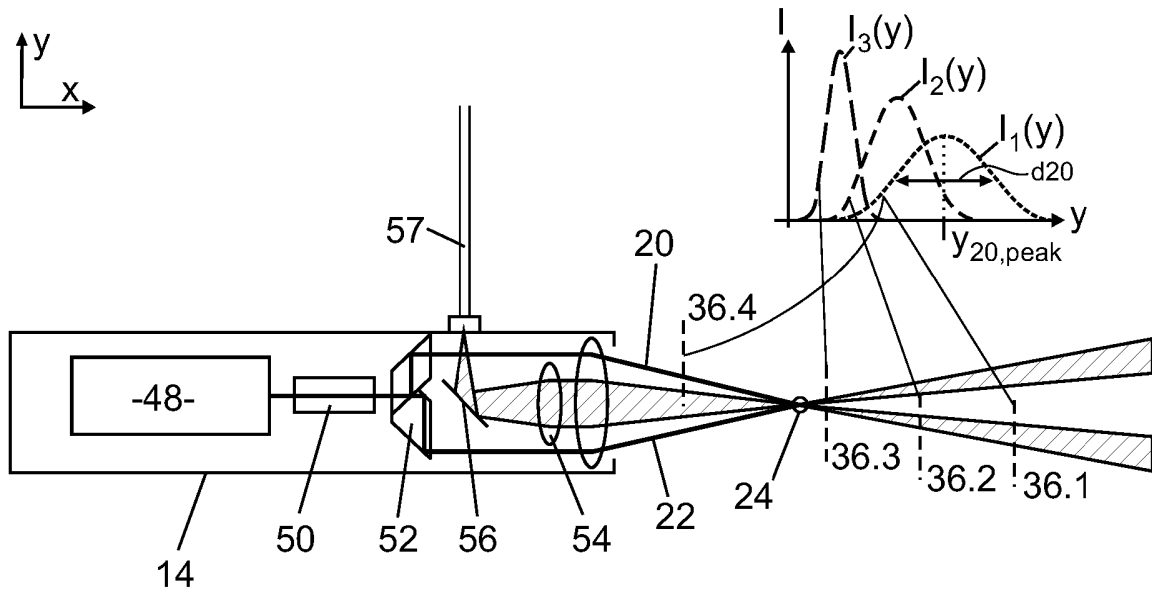


Fig. 2

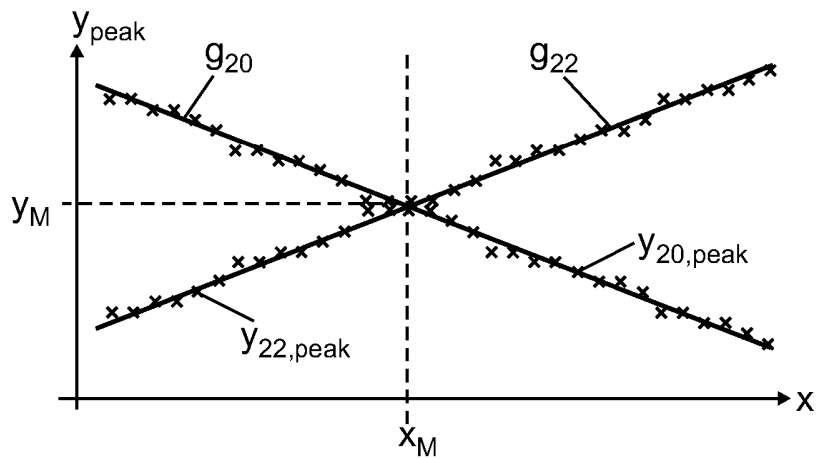


Fig. 3

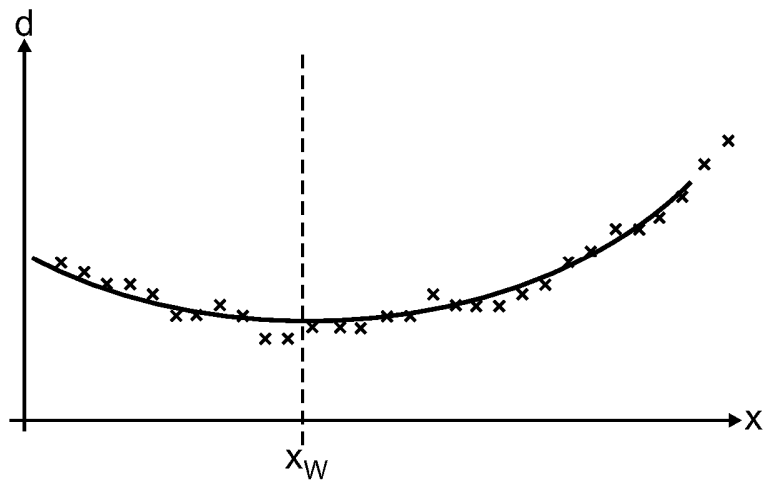


Fig. 4

Stand der Technik

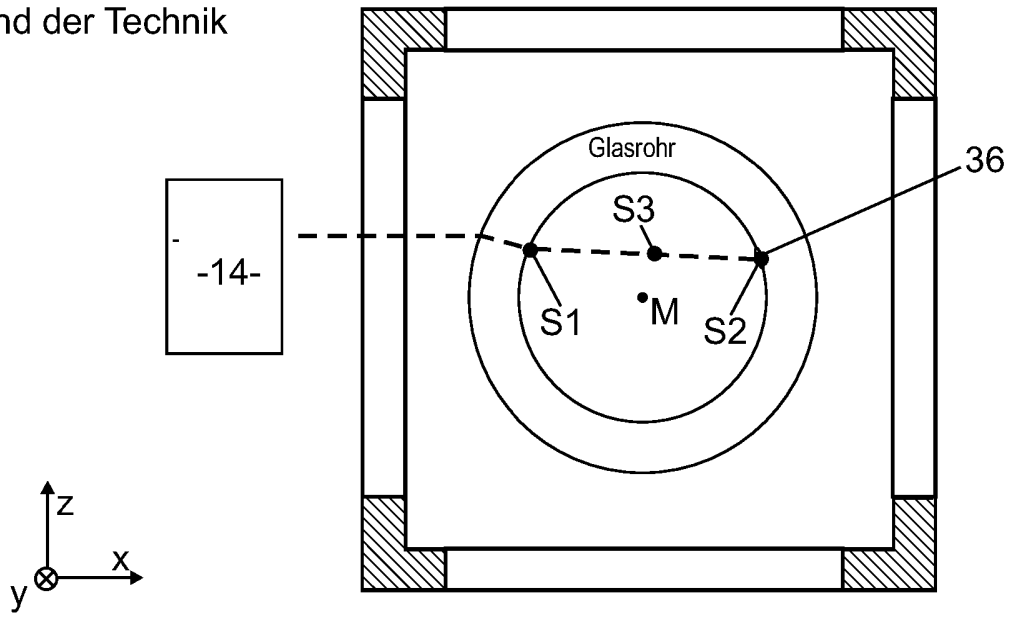


Fig. 5a

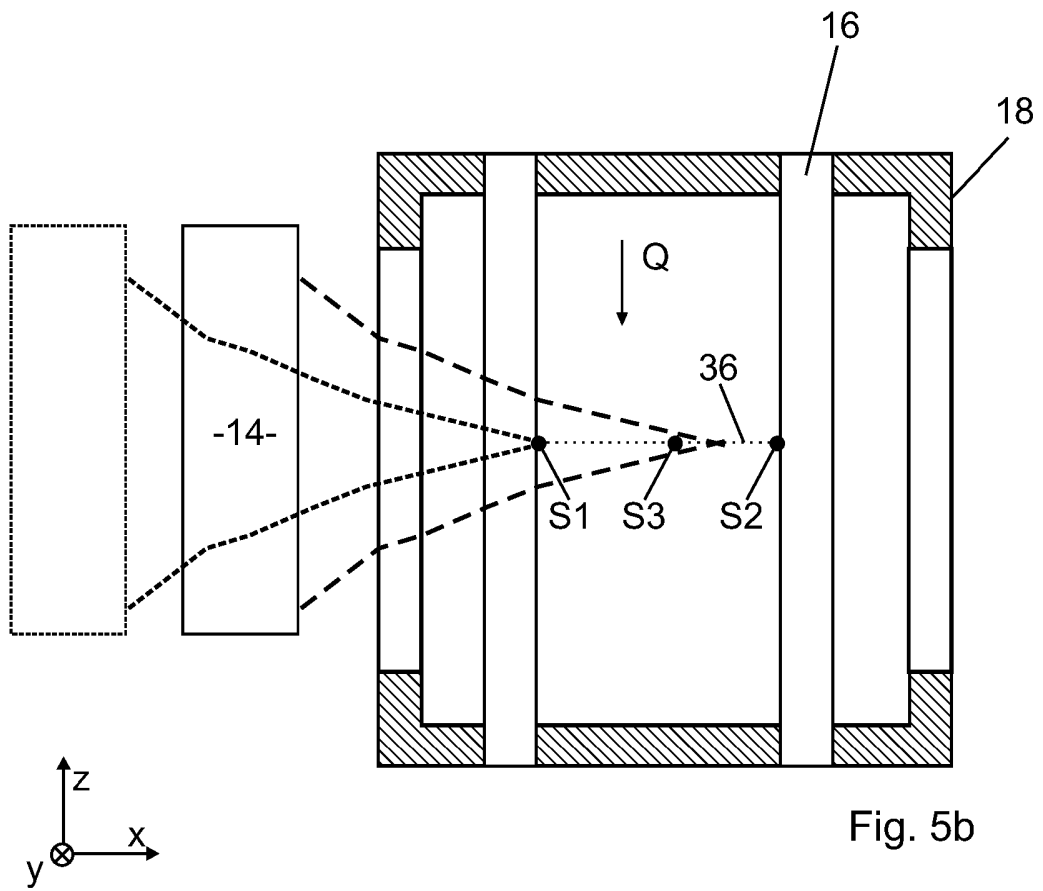


Fig. 5b