

(19)



Deutsches  
Patent- und Markenamt



(10) **DE 10 2014 011 480 B3** 2015.11.12

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2014 011 480.5**

(22) Anmeldetag: **31.07.2014**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **12.11.2015**

(51) Int Cl.: **G01P 5/26 (2006.01)**  
**G01P 21/00 (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:

**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 Patent- und  
Rechtsanwälte PartGmbH, 38122 Braunschweig,  
DE**

(72) Erfinder:

**Eichler, Thomas, Dr., 13585 Berlin, DE; Straka,  
Martin, 10967 Berlin, DE; Juling, Markus, 13591  
Berlin, DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

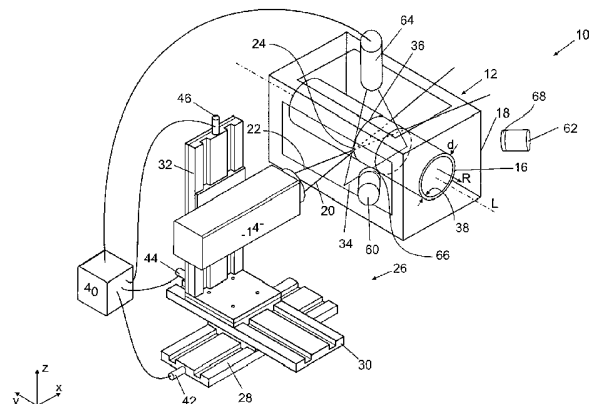
**US 2006 / 0 206 255 A1**  
**US 2012 / 0 263 448 A1**  
**WO 2005/ 017 450 A1**

**Raffel, M. et al: Particle Image Velocimetry: A  
Practical Guide, 2. Ed.; Springer-Verlag, Berlin  
Heidelberg, 2007**

**Tsai, R.: A versatile Camera Calibration  
Technique for High-Accuracy 3D MachineVision  
Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras  
and Lenses, IEEE Journal of Robotics and  
Automation, Vol. RA-3, No. 4, p. 323-344**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Kalibrieren eines Teilchenbild-Velozimeters und Teilchenbild-Velozimeter**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kalibrieren eines Teilchenbild-Velozimeters (10), insbesondere eines Stereo-Teilchenbild-Velozimeters, das zumindest eine Kamera (60) und eine Durchleitung (12) für ein Fluid, umfasst, mit den Schritten: Kreuzen eines ersten Laserstrahls (20) mit einem zweiten Laserstrahl (22) in einem Überlagerungsbereich innerhalb der Durchleitung (12), Erfassen zumindest einer Position des Überlagerungsbereichs aus einer Strahl-Lage der Laserstrahlen (20, 22), Aufnehmen eines ersten Bilds und zumindest eines zweiten Bilds des Überlagerungsbereichs mittels der Kamera (60) und Kalibrieren des Teilchenbild-Velozimeters anhand der zumindest einen erfassten Position und des zumindest einen Bilds.



### Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kalibrieren eines Teilchenbild-Velozimeters, insbesondere eines Stereo-Teilchenbild-Velozimeters, das zumindest eine Kamera und eine Durchleitung für ein Fluid aufweist. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein Teilchenbild-Velozimeter, insbesondere ein Stereo-Teilchenbild-Velozimeter, mit (a) einer Durchleitung zum Durchleiten eines Fluids in einer Strömungsrichtung, (b) einer Laserlichtquelle, (c) einer Kamera zum Aufnehmen eines Bild des Fluids und (d) einer elektrischen Auswertereinheit.

**[0002]** Teilchenbild-Velozimeter sind auch unter ihrer englischen Bezeichnung particle image velocimeter (PIV) bekannt. Das Messprinzip beruht darauf, dass in einem Fluidstrom enthaltene kleine Partikel zu zwei zeitlich wenig beabstandeten Zeitpunkten fotografiert werden. Aus den beiden aufgenommenen Bildern wird die Wegstrecke berechnet, die das jeweilige Teilchen in der Zeitspanne zwischen den beiden Aufnahmen zurückgelegt hat. Daraus wird die Geschwindigkeit des Teilchens ermittelt. Auf diese Weise wird ein Geschwindigkeitsfeld über den Querschnitt der Durchleitung erhalten, in dem das Fluid strömt.

**[0003]** Basierend auf der Annahme, dass die lokale Strömungsgeschwindigkeit des Fluids identisch ist mit der lokalen Teilchengeschwindigkeit, wird so das Geschwindigkeitsfeld erhalten. Teilchenbild-Velozimeter können daher zur Messung der Geschwindigkeitsfelder beispielsweise in Windkanälen oder in Kapillaren eingesetzt werden.

**[0004]** Aus diesem Geschwindigkeitsfeld kann durch Integration über die Querschnittsfläche der Durchleitung der Durchfluss an Fluid berechnet werden. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist das Teilchenbild-Velozimeter daher eine Durchflussmessvorrichtung.

**[0005]** Teilchenbild-Velozimeter müssen kalibriert werden. Es ist bekannt, dazu spezielle Messplatten in die Durchleitung einzubringen und mit der Kamera aufzunehmen. Auf der Messplatte sind Markierungen aufgebracht, die von der Kamera abgebildet werden. Es kann daher der Abstand der Markierungen auf der Messplatte in Pixeln bestimmt werden. Da die Abstände auf der Messplatte genau eingemessen sind, kann durch Vergleich der wahren Abstände mit dem von der Kamera in Pixeln gemessenen Abstand die Kamera kalibriert werden. Bei der späteren Messung der Teilchengeschwindigkeit ergibt sich eine Geschwindigkeit in Pixeln pro Sekunde, die wegen der Kalibrierung in eine absolute Längeneinheit, insbesondere eine Si-Längeneinheit, umgerechnet wird.

**[0006]** Nachteilig an bekannten Verfahren zum Kalibrieren von Teilchenbild-Velozimetern ist, dass diese aufwendig sind. Es ist nämlich notwendig, die Messplatte in die Durchleitung einzubringen, die nachher mit dem Fluid durchströmt werden soll. Das ist besonders dann nachteilig, wenn der Durchfluss durch eine Durchleitung gemessen werden soll, die schlecht zugänglich ist oder gefährliche Fluide transportiert. Im Kalibrierzustand sind sehr schwer die Bedingungen des Messzustandes herzustellen, wodurch es zu Abweichungen kommen kann wie zum Beispiel unterschiedliche Brechungsindizes aufgrund unterschiedlicher Temperaturen, was die Messunsicherheit erhöht.

**[0007]** Nachteilig ist zudem, dass die Kalibrierung häufig nicht unter den gleichen Bedingungen durchgeführt werden kann wie die spätere Messung. Soll beispielsweise der Durchfluss eines giftigen Gases bestimmt werden, kann das Teilchenbild-Velozimeter nur unter großem Aufwand damit kalibriert werden. Wird ein anderes Fluid verwendet, kann es zu systematischen Messunsicherheiten kommen. Ein Ausbau der Messplatte bzw. Umbau des Setups trägt immer mechanische Einflüsse in das Gesamtsystem ein, die wiederum zu einer Erhöhung der Messunsicherheit führen.

**[0008]** Aus der US 2012/0263448 A1 sind eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Ausrichten mehrerer Kameras bekannt, sodass deren Foki auf einer Geraden liegen. Dazu werden Objekte im Sichtfeld mit zwei Lichtebenen beleuchtet. Danach wird zunächst die erste Lichtebenen so ausgerichtet, dass zwei Kameras zwei Geraden aufnehmen, die durch das Beleuchten mit der ersten Lichtebene sichtbar werden. Nachfolgend wird die zweite Lichtebenen so ausgerichtet, dass die zwei Kameras zwei weitere Geraden aufnehmen, die durch das Beleuchten mit der zweiten Lichtebene sichtbar werden. Abschließend wird eine dritte Kamera so ausgerichtet, dass die Lichtebenen auf den Objekten als zwei weitere Linien sichtbar sind. Ein derartiges Vorgehen ist zum Kalibrieren von Teilchenbild-Velozimetern wenig geeignet, da diese in der Regel weniger als drei Kameras aufweisen und diese relativ zur Durchleitung ausgerichtet werden müssen, nicht aber zueinander.

[0009] Aus der US2006/0206255 A1 ist eine Vorrichtung zum Vermessen eines Zündfunken einer Zündkerze bekannt. Eine derartige Vorrichtung ist als Teilchenbild-Velozimeter ungeeignet.

[0010] Die WO 2005/017450 A1 beschreibt einen Kalibrierkörper für 3D-Scanner. Bei einem solchen 3D-Scanner tritt das Problem nicht auf, dass die Lichtstrahlen zunächst durch eine Glasscheibe treten müssen, sodass der Kalibrierkörper für Teilchenbild-Velozimeter keine Vorteile bietet.

[0011] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Nachteile im Stand der Technik zu vermindern.

[0012] Die Erfindung löst das Problem durch ein Verfahren mit den Schritten (a) Kreuzen eines ersten Laserstrahls mit einem zweiten Laserstrahl in einen Überlagerungsbereich innerhalb der Durchleitung, (b) Erfassen von zumindest zwei Positionen des Überlagerungsbereichs aus einer Strahl-Lage der Laserstrahlen, (c) Aufnahmen von zumindest zwei Bildern des Überlagerungsbereichs mittels der Kamera und (d) Kalibrieren des Teilchenbild-Velozimeters anhand der zumindest zwei erfassten Positionen und der zumindest zwei Bilder.

[0013] Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein gattungsgemäßes Teilchenbild-Velozimeter, dessen Laserlichtquelle eingerichtet ist zum Erzeugen von zwei Laserstrahlen, die einander in einem Überlappungsbereich überlagern, wobei die Kamera zum Aufnehmen des Bilds im Überlagerungsbereich ausgerichtet ist und wobei die elektrische Auswerteeinheit ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten: (i) Berechnen von zumindest zwei Positionen des Überlagerungsbereichs aus einer Laserlichtquellen-Position der Laserlichtquelle, (ii) Aufnahmen von zumindest zwei Bildern des Überlagerungsbereichs mittels der Kamera und (iii) Kalibrieren des Teilchenbild-Velozimeters anhand der zumindest zwei erfassten Positionen und der zumindest zwei Bilder.

[0014] Vorteilhaft an der Erfindung ist, dass die Kalibrierung durchgeführt werden kann, ohne dass die Durchleitung geöffnet werden muss. Der Überlagerungsbereich der Laserstrahlen dient als die Markierungen, anhand derer das Teilchenbild-Velozimeter kalibriert wird. In anderen Worten ersetzen die Überlagerungsbereiche die Markierungen auf der Messplatte, die im Stand der Technik zur Kalibrierung verwendet wurde. Die Kalibrierung kann daher unter den gleichen Bedingungen durchgeführt werden wie beim späteren Einsatz. Das vermindert die systematische Messunsicherheit.

[0015] Vorteilhaft ist zudem, dass der Überlagerungsbereich grundsätzlich an jede beliebige Stelle in der Durchleitung positioniert werden kann. Die Lage des Rasters der Kalibrierpunkte kann daher so gewählt werden, wie es für die jeweilige Messaufgabe günstig ist. Auch so kann die systematische Messunsicherheit verringert werden.

[0016] Günstig ist zudem, dass die Kalibrierung automatisiert durchgeführt werden kann. Das ermöglicht es, den zeitlichen Abstand zwischen zwei Kalibrierungen zu verringern, was insbesondere dann von Vorteil ist, wenn sich die Messbedingungen ändern.

[0017] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem Laserstrahl insbesondere ein Laserstrahl verstanden, der eine Halbwertsbreite von weniger als 250 Mikrometer, insbesondere weniger als 100 Mikrometer, hat. Je kleiner die Halbwertsbreite des Laserstrahls ist, desto kleiner ist der Überlagerungsbereich, so dass eine hohe Ortsauflösung erreicht werden kann. Die Laserstrahlen sind so intensiv und so breit gewählt, dass der Überlagerungsbereich sicher mit der Kamera erfasst werden kann.

[0018] Ein Fluid ist insbesondere ein Gas, ein Aerosol, ein Rauch oder eine partikelhaltige Flüssigkeit.

[0019] Unter dem Merkmal, dass die Position des Überlagerungsbereichs aus einer Strahl-Lage der Laserstrahlen erfasst wird, wird insbesondere verstanden, dass zunächst die Lage der Laserstrahlen außerhalb der Durchleitung bestimmt wird und dass danach aus dieser Lage der Laserstrahlen die Lage des Überlagerungsbereichs berechnet wird. Diese Art der Berechnung ist als Strahlverfolgungsrechnung bekannt und wird auch bei Laser-Doppler-Velozimetern eingesetzt. Bei der Strahlverfolgungsrechnung wird der Verlauf jedes Laserstrahls durch ein Fenster in der Durchleitung mithilfe des Berechnungsgesetzes berechnet.

[0020] Weiter unten wird zudem ein Verfahren beschrieben, das alternativ oder zusätzlich dazu verwendet werden kann und das es erlaubt, die Position des Überlagerungsbereichs mittels einer Kalibrierung, die eine bevorzugte Ausführungsform des Verfahrens darstellt, ausschließlich aus der Lage der Laserquelle zu berechnen.

**[0021]** Darunter, dass die Position des Überlagerungsbereichs erfasst wird, wird sowohl ein Bestimmen der absoluten Position als auch ein Bestimmen einer relativen Position verstanden. Die absolute Position des Überlagerungsbereichs ist die Position in einem Koordinatensystem, in dem auch die Lage der Durchleitung bekannt ist. Die relative Position ist die Position bezogen auf einen vorgegebenen Punkt in der Durchleitung.

**[0022]** Damit die zumindest eine Kamera Bilder von Partikeln oder Tröpfchen im Fluid aufnehmen kann, besteht die Durchleitung zumindest abschnittsweise aus einem Material, das in dem Wellenlängenbereich durchsichtig ist, in dem die Kamera das Bild aufnimmt.

**[0023]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform werden der erste Laserstrahl und der zweite Laserstrahl mittels einer Laserlichtquelle erzeugt, wobei das Erfassen der Position des Übergangsbereichs aus einer Strahl-lage der Laserstrahlen ein Berechnen der Position des Überlagerungsbereichs anhand einer Laserlichtquelle-Lage der Laserlichtquelle umfasst. Unter dem Berechnen der Position des Überlagerungsbereichs wird insbesondere eine Strahlverfolgungsrechnung verstanden.

**[0024]** Unter der Lage wird die Gesamtheit aus der Position, die durch drei kartesische Koordinaten angegeben werden kann, und der Orientierung, die durch drei Winkel, beispielsweise die Eulerwinkel, angegeben werden kann, verstanden. Die Lage der Laserlichtquelle relativ zur Durchleitung legt die Lage des Überlagerungsbereichs relativ zur Durchleitung eindeutig fest. Weiter unten wird ein Verfahren beschrieben, wie aus der Laserlichtquellen-Lage die Position des Überlagerungsbereichs berechnet werden kann.

**[0025]** Es ist möglich, dass die Laserlichtquelle mehrere Laser umfasst. Diese sind vorzugsweise starr miteinander verbunden. Grundsätzlich ist es auch möglich, dass zwei Laser verwendet werden, die relativ zueinander beweglich sind, das erhöht aber den apparativen Aufwand.

**[0026]** Vorzugsweise umfasst das Verfahren die Schritte: (a) Kreuzen der Laserstrahlen in einem zweiten Überlagerungsbereich innerhalb der Durchleitung, (b) Erfassen einer zweiten Position des zweiten Überlagerungsbereichs aus einer zweiten Strahl-Lage der Laserstrahlen und (c) Aufnehmen zumindest eines zweiten Bilds des Überlagerungsbereichs mit der Kamera, wobei (d) das Kalibrieren des Teilchenbild-Velozimeters das Errechnen einer Positionsänderung der ersten Position und der zweiten Position aus den jeweiligen Laserlichtquellen-Lagen, ein Bestimmen einer Bild-Positionsänderung zwischen der ersten Position und der zweiten Position des Überlagerungsbereichs aus dem ersten Bild und dem zweiten Bild und ein Kalibrieren des Teilchenbild-Velozimeters anhand der Positionsänderung und der Bild-Positionsänderung umfasst. Dadurch wird das Finden der absoluten Position in der Durchleitung, was sehr aufwändig sein kann, entbehrlich.

**[0027]** Vorzugsweise liegen die Überlagerungsbereiche in der Messebene. In der Messebene erfolgt später die Messung der Geschwindigkeitsverteilung von Partikeln in dem Fluid.

**[0028]** Besonders bevorzugt ist ein Verfahren, das mittels eines Teilchenbild-Velozimeters durchgeführt wird, dessen Durchleitung zumindest drei Markierungen aufweist, wobei das Verfahren 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, Wiederholen der Schritte (a) bis (d) für die zumindest drei Markierungen, sodass Licht-Intensitäten für zumindest drei Laserlichtquellen-Positionen erhalten werden, und Ermitteln der Position des Überlagerungsbereichs relativ zu den Markierungen aus den Licht-Intensitäten und den zugehörigen Laserlichtquellen-Positionen, sodass aus einer vorgegebenen Laserlichtquellen-Position die Lage des Überlagerungsbereichs in der Durchleitung berechenbar ist.

**[0029]** Mithilfe dieses Verfahrens kann der Überlagerungsbereich an einer vorgebbaren Stelle in der Durchleitung positioniert werden. Diese Position ist mit hoher Genauigkeit bekannt. Das ermöglicht eine Kalibrierung der Kamera mit einer geringen Messunsicherheit. Vorteilhaft ist zudem, dass lediglich zumindest drei Markierungen an der Durchleitung angebracht sein müssen, um das Partikelbild-Velozimeter automatisch kalibrieren zu können. Günstig ist es, wenn die Durchleitung mehr als drei Markierungen aufweist. Die Lage der Markierungen ist mit geringer Messunsicherheit bekannt, beispielsweise beträgt die Positions-Messunsicherheit weniger als 60 Mikrometer, insbesondere weniger als 30 Mikrometer.

**[0030]** Besonders bevorzugt ist ein Verfahren, bei dem das Bewegen der Laserlichtquelle ein Bewegen in zwei unabhängigen Raumdimensionen ist und bei dem das Ermitteln einer Lage des Überlagerungsbereichs die folgenden Schritte umfasst: (f1) für die Lichtintensitäten, die von der Streuung des ersten Laserstrahls

an einer vorgegebenen Markierung hervorgerufen werden, Berechnen eines Erstlaserstrahl-Mittelpunkts des ersten Laserstrahls, insbesondere durch Anpassen der Licht-Intensität mit einer Fit-Funktion ( $f_2$ ) für die Licht-Intensitäten, die von der Streuung des zweiten Laserstrahls an der vorgegebenen Markierung hervorgerufen werden, berechnen eines Zweitlaserstrahl-Mittelpunkts des zweiten Laserstrahls, insbesondere durch Anpassen der Lichtintensität mit einer Fit-Funktion, und ( $f_3$ ) Berechnen eines Überlagerungsbereich-Mittelpunkts aus den Erstlaserstrahl-Mittelpunkten und den Zweitlaserstrahl-Mittelpunkten, wobei dieses Berechnen des Überlagerungsbereich-Mittelpunkts vorzugsweise durch Anpassen der Erstlaserstrahl-Mittelpunkte mit einer ersten Geraden, ein Anpassen der Zweitlaserstrahl-Mittelpunkte mit einer zweiten Geraden und durch Berechnen des Überlagerungsbereichs-Mittelpunkts als Schnittpunkt der ersten Geraden und der zweiten Geraden durchgeführt wird. Auf diese Weise wird die Position des Überlagerungsbereichs mit hoher Genauigkeit bestimmt, was die Messgenauigkeit, die mit dem Teilchenbild-Velozimeter erreichbar ist, erhöht.

**[0031]** Günstig ist es, wenn die Laserlichtquelle eingerichtet ist zum Abgeben eines ersten Laserstrahls mit einer ersten Wellenlänge und eines zweiten Laserstrahls mit einer zweiten Wellenlänge, wobei die erste Wellenlänge und die zweite Wellenlänge gleich sein können, und wobei die Kamera einen Filter zum Herausfiltern von Licht anderer Wellenlängen besitzt. Auf diese Weise wird der Kontrast erhöht und die Messgenauigkeit beim Erfassen der Lage des Überlagerungsbereichs erhöht. Es ist selbstverständlich möglich, dass das Filterlicht andere Wellenlängen nicht vollständig herausfiltert. Maßgeblich ist, dass so viel Licht der anderen Wellenlängen herausgefiltert wird, dass die beiden Laserstrahlen mit höherem Kontrast zu erkennen sind.

**[0032]** Vorzugsweise besitzt die Durchleitung an zumindest drei Stellen eine Markierung, wobei die Laserlichtquelle relativ zur Durchleitung quer zur Strömungsrichtung verfahrbar ist. Dies ermöglicht es, das erfindungsgemäße Verfahren durchzuführen. Vorzugsweise ist die Laserlichtquelle automatisch relativ zur Durchleitung verfahrbar. Die elektrische Auswerte- und Ansteuereinheit ist dann eingerichtet zum automatischen Verfahren der Laserlichtquelle an eine vorgegebene Position.

**[0033]** Günstig ist es, wenn die Markierungen auf nur einer axialen Höhe bezüglich einer Längsachse der Durchleitung angeordnet sind. Das erhöht die erreichbare Genauigkeit bei der Kalibrierung.

**[0034]** Vorzugsweise umfasst die Durchleitung ein transparentes Rohr, dessen Innendurchmesser und/oder Außendurchmesser eine Abweichung von einem idealen Kreis von weniger als 200 Mikrometern hat, wobei die Markierung vorzugsweise an einem Umfang des Rohrs ausgebildet ist. Auf diese Weise ist die Lage der Markierungen mit hoher Genauigkeit bekannt, sodass eine hohe Messgenauigkeit beim Messen des Durchflusses erreichbar ist.

**[0035]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform besitzt das Teilchenbild-Velozimeter eine Positions-Messvorrichtung, mittels der eine Laserlichtquellen-Position der Laserlichtquelle relativ zur Markierung messbar ist. Alternativ oder zusätzlich weist das Teilchenbild-Velozimeter eine Positioniervorrichtung, mittels der die Laserlichtquelle automatisch auf eine vorgegebene Laserlichtquellen-Position relativ zur Markierung positionierbar ist, auf. Das ermöglicht ein automatisches Kalibrieren des Teilchenbild-Velozimeters.

**[0036]** Günstig ist es, wenn die elektrische Ansteuereinheit ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens, das die folgenden Schritte umfasst: (a) Erfassen einer Laserlichtquellen-Position der Laserlichtquelle relativ zur Markierung, (b) Ansteuern der Laserlichtquelle, sodass diese die Markierung mit zumindest einem der Laserstrahlen bestrahlt, (c) Erfassen einer Licht-Intensität an von der Markierung gestreutem Licht, (d) Ansteuern der Laserlichtquelle, sodass diese sich relativ zur Markierung bewegt, 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 Überlagerungsbereichs relativ zu den Markierungen aus den Licht-Intensitäten und den zugehörigen Laserlichtquellen-Positionen, sodass aus einer vorgegebenen Laserlichtquellen-Position die Lage des Überlagerungsbereichs in der Durchleitung berechenbar ist.

**[0037]** Es ist möglich, dass die Licht-Intensitäten mit der Kamera gemessen werden, vorzugsweise besitzt das Teilchenbild-Velozimeter aber eine Intensitätsmessvorrichtung, beispielsweise eine Fotodiode.

**[0038]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist das Teilchenbild-Velozimeter eingerichtet zum automatischen Berechnen eines Durchflusses des Fluids durch die Durchleitung. Dazu umfasst das Teilchenbild-Velozimeter eine elektrische Auswerteeinheit, die eingerichtet ist zum automatischen Berechnen des Durchflusses aus dem gemessenen Geschwindigkeitsfeld. Ein derartiges Teilchenbild-Velozimeter kann auch als Laser-Durchflussmessgerät bezeichnet werden.

[0039] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt:

[0040] Fig. 1 eine perspektivische Ansicht eines erfindungsgemäßen Teilchenbild-Velozimeters in Form eines Laser-Durchflussmessgeräts,

[0041] Fig. 2 das Teilchenbild-Velozimeter in Form des Laser-Durchflussmessgeräts gemäß Fig. 1 mit einem schematischen Vergleich zwischen der positionsabhängig gemessenen Streuintensität und der Lage des Überlagerungsbereichs relativ zu einer Markierung,

[0042] Fig. 3 eine Grafik zur Darstellung, wie die Lage des Überlagerungsbereichs bestimmt wird,

[0043] Fig. 4 eine Grafik mit der Darstellung, wie die Position der Strahlteile bestimmt wird,

[0044] Fig. 5a einen Querschnitt durch die Durchleitung und

[0045] Fig. 5b die Bestimmung der Lage des Überlagerungsbereichs in x-Richtung bei einer Kalibrierung gemäß der Erfindung.

[0046] Fig. 6a zeigt die Bestimmung des Überlagerungsbereichs mittels Filtern und Geraden und

[0047] Fig. 6b die Bestimmung des Überlagerungsbereichs mittels Acht-Punkt-Technik.

[0048] Fig. 1 zeigt ein erfindungsgemäßes Teilchenbild-Velozimeter **10**, im vorliegenden Fall in Form eines Laser-Durchflussmessgeräts **10**. Das Teilchenbild-Velozimeter **10** weist eine Durchleitung **12** und eine Laserlichtquelle **14** auf. 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. Dazu kann das Teilchenbild-Velozimeter **10** eine Druckregelung zum Regeln des Drucks auf einen Soll-Druck aufweisen.

[0049] Die Laserlichtquelle **14** erzeugt im Betrieb einen ersten Laserstrahl **20** und einen zweiten Laserstrahl **22**, die einander in einem Überlagerungsbereich **24** überlagern. Die Laserstrahlen **20**, **22** können aus kohärentem Licht bestehen und beispielsweise aus einem Laserstrahl durch Strahlteilung erzeugt werden. Dann bildet sich im Überlagerungsbereich **24** ein Interferenzmuster aus. Das ist aber nicht notwendig, es ist auch möglich, dass die Laserstrahlen **20**, **22** in keinerlei Phasenbeziehung zueinander stehen und/oder unterschiedliche Wellenlängen haben.

[0050] Das Rohr **16** ist aus einem Material hergestellt, das sowohl für das Laserlicht als auch für das durch die Doppler-Verschiebung entstehende Streulicht hinreichend transparent ist. Beispielsweise ist das Rohr **16** aus Glas aufgebaut.

[0051] 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-z-Ebene, was die Auswertung vereinfacht.

[0052] Für die absolute Positionsbestimmung zwischen der Rohrleitung und der Laserlichtquelle **14** liegen die Laserstrahlen vorzugsweise in der x-y-Ebene. Für eine Positionsbestimmung auf dem Kamerabild ist es von Vorteil, wenn die Laserstrahlen in der y-z-Ebene liegen, da so die Auswertung vereinfacht wird. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist die Laserlichtquelle daher um die x-Achse drehbar. Alternativ oder zusätzlich ist die Laserlichtquelle **14** ausgebildet zum Abgeben von vier Laserstrahlen, von denen jeweils zwei in einer Ebene liegen, wobei diese Ebenen vorzugsweise senkrecht zueinander verlaufen.

[0053] 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  $d_{\text{innen}}$ , der  $d_{\text{innen}} = 75 \text{ mm} \pm 30 \text{ } \mu\text{m}$  beträgt. Der Außendurchmesser  $d_{\text{außen}}$  beträgt  $d_{\text{außen}} = 89 \text{ mm} \pm 100 \text{ } \mu\text{m}$ .

[0054] 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.

[0055] Fig. 1 zeigt zudem, dass das Laser-Durchflussmessgerät **10** eine erste Kamera **60**, eine zweite Kamera **62** und eine Pulslichtquelle **64** besitzt. Die Pulslichtquelle **64** ist so angeordnet, dass sie die Durchleitung im Überlagerungsbereich **24** fächerförmig beleuchtet. Das von der Pulslichtquelle **64** erzeugte Lichtfeld ist in Strömungsrichtung  $R$  schmal. Es erstreckt sich vorzugsweise in der gleichen Ebene wie die Laserstrahlen **20**, **22**, im vorliegenden Fall also in der  $x$ - $z$ -Ebene. Die Kameras **60**, **62** sind so angeordnet, dass sie den von der Pulslichtquelle **64** ausgeleuchteten Bereich der Durchleitung erfassen.

[0056] Bei der Pulslichtquelle **64** handelt es sich vorzugsweise um einen Laser, dessen Laserstrahl mittels geeigneter Linsen fächerförmig ausgebildet wird, der ausgebildet ist zum Abgeben von zeitlich kurz beabstandeten Lichtpulsen. Das Betreiben eines Teilchenbild-Velozimeters gehört zum Stand der Technik und wird daher nicht weiter erläutert.

[0057] 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 beispielsweise an einer der Markierungen gestreutes Laserlicht in eine Lichtleitfaser **57** eingekoppelt, die das Streulicht zu einer Auswerteeinheit leitet.

[0058] 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 der Überlagerungsbereich **24**, der 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 Lichtintensität  $I$  für mehrere  $y$ -Positionen gemessen wird.

[0059] 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  $y_{\text{peak}}$  berechnet. Es ergibt sich folglich für jede  $x$ -Position eine  $y$ -Position  $y_{\text{peak}}$ , an der das Maximum der Lichtintensität  $I$  liegt.

[0060] In Fig. 3 sind für eine Vielzahl von  $x$ -Positionen die zugehörigen  $y_{\text{peak}}$ -Positionen des Maximums aufgetragen. Für den ersten Laserstrahl **20** liegen die Werte für  $y_{\text{peak}}$  auf einer ersten Geraden  $g_{20}$ , für den zweiten Laserstrahl **22** liegen die Maxima auf einer zweiten Geraden  $g_{22}$ . Die beiden Geraden  $g_{20}$ ,  $g_{22}$  schneiden sich an der  $x$ -Position  $x_M$ , an der sich der Mittelpunkt des Überlagerungsbereichs **24** befindet. In anderen Worten zeigt Fig. 3, wie die  $x$ -Koordinate  $x_M$  des Mittelpunkts des Überlagerungsbereichs **24** bestimmt wird. Die zugehörige  $y$ -Koordinate ist die  $Y$ -Koordinate  $y_M$  des Mittelpunkts des Überlagerungsbereichs **24**.

[0061] Beim Anpassen der Funktionen  $I(Y)$ , die in Fig. 2 gezeigt sind, kann zudem die Strahlbreite  $d$  erhalten werden. 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 Strahlmitte berechnen.

[0062] 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 der Überlagerungsbereich **24** an einer Stelle der Markierung **36** positioniert ist.

[0063] Das geschilderte Verfahren wird für eine Vielzahl an Stellen auf der Markierung durchgeführt. 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.

[0064] Fig. 5a zeigt, wie bei konstanter  $z$ -Koordinate an einer ersten Stelle  $S_1$  und einer zweiten Stelle  $S_2$  die Lage der Markierung **36** bestimmt wird.

[0065] Muss die Laserlichtquelle auf die Koordinaten  $(x_{M,1}, y_{M,1}, z_{M,1})$  gefahren werden, damit der Überlagerungsbereich 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 der Überlagerungsbereich die Markierung **36** an der Stelle  $S2 = (x_2, y_2, z_2)$  trifft, so liegt der Überlagerungsbereich an einer Stelle

$$S3 = (x_3, y_3, z_3) = (x_1, y_1, z_1) + a[(x_2, y_2, z_2) - (x_1, y_1, z_1)] \text{ mit } 0 < a < 1,$$

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

$$(x_{M,3}, y_{M,3}) = (x_{M,1}, y_{M,1}) + a_L(x_{M,2}, y_{M,2}) - (x_{M,1}, y_{M,1})$$

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.

[0066] **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.

[0067] 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.

[0068] Wenn die Laserlichtquelle zwei kohärente Laserstrahlen **20, 22** aussendet, kann das Laser-Durchflussmessgerät **10** als Laser-Doppler-Velozimeter betrieben werden. Die Geschwindigkeit  $v$  des Partikels am Ort des Überlagerungsbereichs **24** ergibt sich aus

$$v = L_I \cdot f_D,$$

wobei  $L_I$  der Interferenzstreifenabstand ist und  $f_D$  die Dopplerfrequenz. 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  $\varphi$ : Winkel zwischen den Laserstrahlen,  $x_M$ : x-Koordinate des Mittelpunkts des Überlagerungsbereichs,  $x_w$ : x-Koordinate der Strahltilde,  $\lambda$ : Wellenlänge des Laserstrahls,  $x_R$ : Rayleighlänge des Laserstrahls (Abstand zwischen der Strahltilde und dem Ort, an dem der Durchmesser des Laserstrahls auf das  $\sqrt{2}$ -fache zugenommen hat).

[0069] Nachdem durch das oben beschriebene Verfahren die Position des Überlagerungsbereichs **24** aus der Laserlichtquellen-Lage berechnet werden kann, werden die Kameras **60, 62** wie folgt kalibriert.

[0070] Zunächst wird eine Menge an Kalibrierpunkten gewählt, die vorzugsweise in dem Bereich liegen, der von der Pulslichtquelle **64** beleuchtet werden kann. Beispielsweise wird ein schachbrettartiges Raster an Kalibrierpunkten gewählt. Danach steuert die Ansteuereinheit **40** die Positioniervorrichtung **26** so an, dass der Überlagerungsbereich **24** auf die erste Position der Vielzahl an Kalibrierpositionen gebracht wird. Danach wird mit den Kameras **60, 62** ein Bild aufgenommen, auf dem der Überlagerungsbereich zu erkennen ist.

[0071] Günstig ist es, wenn die Kameras Filter **66, 68** aufweisen, die Fremdlicht schwächen und das Laserlicht der Laserlichtquelle möglichst ungehindert passieren lassen, sodass ein besonders kontrastreiches Bild aufgenommen werden kann. Die Abbildungsgeometrie der Kamera ist bekannt, sodass die Position des Überlagerungsbereichs im Kamera-Koordinatensystem bekannt ist. Im Kamera-Koordinatensystem wird die Position des Überlagerungsbereichs in Pixeln erfasst. Da wegen der oben beschriebenen Kalibrierung die Position des Überlagerungsbereichs auch im Koordinatensystem der Durchleitung bekannt ist, kann die in Pixel-Einheiten gemessene Position des Überlagerungsbereichs für die Koordinaten der Durchleitung umgerechnet werden.



[0072] Die Kamerakalibrierung wird beispielsweise in Raffel, M. et al: Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, 2. Ed.; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007 oder Tsai, R.: A versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 4, p. 323–344 beschrieben und wird hier daher nicht weiter erläutert.

[0073] Für die Erstellung des Kalibrierbildes werden gemäß einer bevorzugten Ausführungsform mindestens zwei Einzelbilder verwendet, welche die gekreuzten Laserstrahlen an verschiedenen Positionen innerhalb der Messebene enthalten. Um die Genauigkeit zu erhöhen ist es vorteilhaft, eine wesentlich höhere Anzahl von Bildern der gekreuzten Laserstrahlen an verschiedenen Positionen zu verwenden.

[0074] Jedes einzelne Bild wird zunächst in ein Schwarzweißbild umgewandelt und hinterher einem Kanten-detektor-Algorithmus unterzogen. Als Beispiel werden die Bilder mittels eines Canny- oder eines Sobel-Filters gefiltert. Anschließend werden die vier Geradengleichungen ermittelt, welche die jeweils oberen und unteren Kanten der zwei Laserstrahlen beschreiben. Dazu kann beispielsweise die Hough-Transformation verwendet werden, wobei für die Eindeutigkeit des Verfahrens verschiedene Parameter wie etwa die Linienlänge oder der Kreuzungswinkel der Strahlen berücksichtigt werden können. Mithilfe der vier Geraden (siehe Fig. 6a oben) können die Koordinaten des Mittelpunktes des Überlagerungsbereichs **24** der Strahlen genau ermittelt werden, wie in Fig. 6a im unteren Teilbild gezeigt ist.

[0075] Fig. 6b zeigt, dass der Mittelpunkt auch alternativ mithilfe der 8-Punkte-Technik ermittelt werden kann. Dazu werden auf den vier Kanten der zwei Laserstrahlen jeweils zwei Punkte gesucht und jeweils eine Geradengleichung ermittelt. Die Punktpaare auf dem oberen und unteren Rand des Laserstrahls müssen dabei alle den gleichen Abstand besitzen. Darüber hinaus sollte der Abstand der Punktpaare auf einem Laserstrahl sinnvoll gewählt werden, sodass die Geradengleichung den Verlauf der Strahlenkante gut darstellt. Mithilfe der vier Geraden wird auch hier der Mittelpunkt des Überlagerungsbereiches **24** genau ermittelt.

[0076] Diese Prozedur wird für jedes Einzelbild durchgeführt. Anschließend wird aus allen so erhaltenen Mittelpunkten das Kalibrierbild für das Teilchenbild-Velozimeter erstellt, in dem eine Vielzahl an Überlagerungsbereichen abgebildet ist. Aus den Koordinaten dieser Überlagerungsbereiche im Kamera-Koordinatensystem einerseits und im Koordinatensystem der Durchleitung andererseits, wird ermittelt, wie eine vorgegebene Position im Kamera-Koordinatensystem in das Koordinatensystem der Durchleitung umgerechnet werden kann.

#### Bezugszeichenliste

10	Teilchenbild-Velozimeter, Laser-Durchflussmessgerät
12	Durchleitung
14	Laserlichtquelle
16	Rohr
18	Druckkammer
20	erster Laserstrahl
22	zweiter Laserstrahl
24	Überlagerungsbereich
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
57	Lichtleitfaser
60	erste Kamera

<b>62</b>	zweite Kamera
<b>64</b>	Pulslichtquelle
<b>66</b>	Filter
<b>68</b>	Filter
<b>d<sub>innen</sub></b>	Innen-Durchmesser
<b>d</b>	Strahldurchmesser
<b>f<sub>D</sub></b>	Dopplerfrequenz Licht-Intensität des Streulichts
<b>L</b>	Längsachse
<b>L<sub>I</sub></b>	Interferenzstreifenabstand
<b>M</b>	Mittelpunkt des Rohrs
<b>P</b>	Laserlichtquellen-Position
<b>Q</b>	Querfluss
<b>S</b>	Stelle
<b>x<sub>M</sub></b>	Überlagerungsbereich-Mittelpunkt

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Kalibrieren eines Teilchenbild-Velozimeters (**10**), insbesondere eines Stereo-Teilchenbild-Velozimeters, das

- (i) zumindest eine Kamera (**60**) und
- (ii) eine Durchleitung (**12**) für ein Fluid,

umfasst,

mit den Schritten:

- (a) Kreuzen eines ersten Laserstrahls (**20**) mit einem zweiten Laserstrahl (**22**) in einem Überlagerungsbereich innerhalb der Durchleitung (**12**),
- (b) Erfassen zumindest einer Position des Überlagerungsbereichs aus einer Strahl-Lage der Laserstrahlen (**20, 22**),
- (c) Aufnehmen eines ersten Bilds und zumindest eines zweiten Bilds des Überlagerungsbereichs mittels der Kamera (**60**) und
- (d) Kalibrieren des Teilchenbild-Velozimeters anhand der zumindest einen erfassten Position und zumindest eines der beiden Bilder.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- (i) der erste Laserstrahl (**20**) und der zweite Laserstrahl (**22**) mittels einer Laserlichtquelle erzeugt werden und
- (ii) das Erfassen der Position des Überlagerungsbereichs aus einer Strahl-Lage der Laserstrahlen (**20, 22**) ein Berechnen anhand einer Laserlichtquellen-Lage der Laserlichtquelle (**14**) umfasst.

3. Verfahren nach Anspruch 2, gekennzeichnet durch die folgenden Schritte

- (a) Kreuzen der Laserstrahlen (**20, 22**) in einem zweiten Überlagerungsbereich innerhalb der Durchleitung (**12**),
- (b) Erfassen einer zweiten Position des zweiten Überlagerungsbereichs aus einer zweiten Strahl-Lage der Laserstrahlen (**20, 22**) und
- (c) Aufnehmen zumindest des zweiten Bilds des zweiten Überlagerungsbereichs mittels der Kamera (**60**),
- (d) wobei das Kalibrieren des Teilchenbild-Velozimeters die folgenden Schritte umfasst:
  - (d1) Errechnen einer Positionsänderung der ersten Position und der zweiten Position aus den jeweiligen Laserlichtquellen-Lagen,
  - (d2) Bestimmen einer Bild-Positionsänderung zwischen der ersten Position und der zweiten Position des Überlagerungsbereichs aus dem ersten Bild und dem zweiten Bild und
  - (d3) Kalibrieren des Teilchenbild-Velozimeters anhand der Positionsänderung und der Bild-Positionsänderung.

4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- (i) ein Teilchenbild-Velozimeter verwendet wird, dessen Durchleitung (**12**) zumindest drei Markierungen (**36**) aufweist, und dass
- (ii) das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:
  - (a) Erfassen einer Laserlichtquellen-Position (P) der Laserlichtquelle (**14**) relativ zu einer der zumindest drei Markierungen (**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 anderen der zumindest drei Markierungen (**36**), sodass Licht-Intensitäten (I) für zumindest drei Laserlichtquellen-Positionen (P) erhalten werden, und

(f) Ermitteln der Position des Überlagerungsbereichs (24) relativ zu den Markierungen aus den Licht-Intensitäten (I) und den zugehörigen Laserlichtquellen-Positionen, sodass aus einer vorgegebenen Laserlichtquellen-Position (P) die Lage des Überlagerungsbereichs (24) in der Durchleitung (12) berechenbar ist.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Bewegen der Laserlichtquelle (14) ein Bewegen in zwei unabhängigen Raumdimensionen ist und das Ermitteln einer Lage des Überlagerungsbereichs (24) die folgenden Schritte umfasst:  
 (f1) für die Licht-Intensitäten (I), die von der Streuung des ersten Laserstrahls (20) an einer vorgegebenen Markierung (36) hervorgerufen werden, Berechnen eines Erstlaserstrahl-Mittelpunkts ( $y_{20,peak}$ ) des ersten Laserstrahls (20), insbesondere 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 (36) hervorgerufen werden, Berechnen eines Zweitlaserstrahl-Mittelpunkts ( $y_{22,peak}$ ) des zweiten Laserstrahls (22), insbesondere durch Anpassen der Licht-Intensität (I) mit einer Fit-Funktion, und  
 (f3) Berechnen eines Überlagerungsbereich-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 Überlagerungsbereichs-Mittelpunkts (24) als Schnittpunkt der ersten Geraden ( $g_{20}$ ) und der zweiten Geraden ( $g_{22}$ ).

6. Teilchenbild-Velozimeter, insbesondere Stereo-Teilchenbild-Velozimeter, mit  
 (a) einer Durchleitung zum Durchleiten eines Fluids,  
 (b) einer Laserlichtquelle (14),  
 (c) einer Kamera (60) zum Aufnehmen eines Bilds des Fluids und  
 (d) einer elektrischen Auswerteeinheit,  
**dadurch gekennzeichnet**, dass  
 (e) die Laserlichtquelle (14) eingerichtet ist zum Erzeugen von zwei Laserstrahlen (20, 22), die einander in einem Überlagerungsbereich überlagern,  
 (f) die Kamera zum Aufnehmen des Bilds im Überlagerungsbereich ausgerichtet ist und dass  
 (g) die elektrische Auswerteeinheit ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten:  
 (i) Berechnen einer Position des Überlagerungsbereichs aus einer Laserlichtquellen-Position (P) der Laserlichtquelle (14),  
 (ii) Aufnehmen eines ersten Bilds und zumindest eines zweiten Bilds des Überlagerungsbereichs mittels der Kamera (60) und  
 (iii) Kalibrieren des Teilchenbild-Velozimeters anhand der zumindest einen erfassten Position und des zumindest einen Bildes.

7. Teilchenbild-Velozimeter nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die elektrische Auswerteeinheit ausgebildet ist zum automatischen Durchführen eines Verfahrens mit den Schritten:  
 (a) Positionieren der Laserlichtquelle (14), so dass sich der erste Laserstrahl (20) mit dem zweiten Laserstrahl (22) in einem zweiten Überlagerungsbereich innerhalb der Durchleitung kreuzt, und  
 (b) Aufnehmen zumindest des zweiten Bilds des zweiten Überlagerungsbereichs mittels der Kamera (60),  
 (c) Errechnen einer Positionsänderung der ersten Position und der zweiten Position aus den jeweiligen Laserlichtquellen-Lagen,  
 (d) Bestimmen einer Bild-Positionsänderung zwischen der ersten Position und der zweiten Position des Überlagerungsbereichs aus dem ersten Bild und dem zweiten Bild und  
 (e) Kalibrieren des Teilchenbild-Velozimeters anhand der Positionsänderung und der Bild-Positionsänderung.

8. Teilchenbild-Velozimeter nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass  
 (i) die Laserlichtquelle (14) eingerichtet ist zum Abgeben des ersten Laserstrahls (20) mit einer ersten Wellenlänge und zum Abgeben des zweiten Laserstrahls (22) mit der ersten Wellenlänge oder einer zweiten Wellenlänge, und  
 (ii) die Kamera (60) ein Filter (66) zum Herausfiltern von Licht anderer Wellenlängen besitzt.

9. Teilchenbild-Velozimeter nach einem der Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass  
 (a) die Durchleitung (12) an zumindest drei Stellen (S) eine Markierung (36) aufweist und  
 (b) die Laserlichtquelle (14) relativ zur Durchleitung (12) quer zur Strömungsrichtung (R) verfahrbar ist.

10. Teilchenbild-Velozimeter nach einem der Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass es eingerichtet ist zum automatischen Berechnen eines Durchflusses des Fluids durch die Durchleitung (12).

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

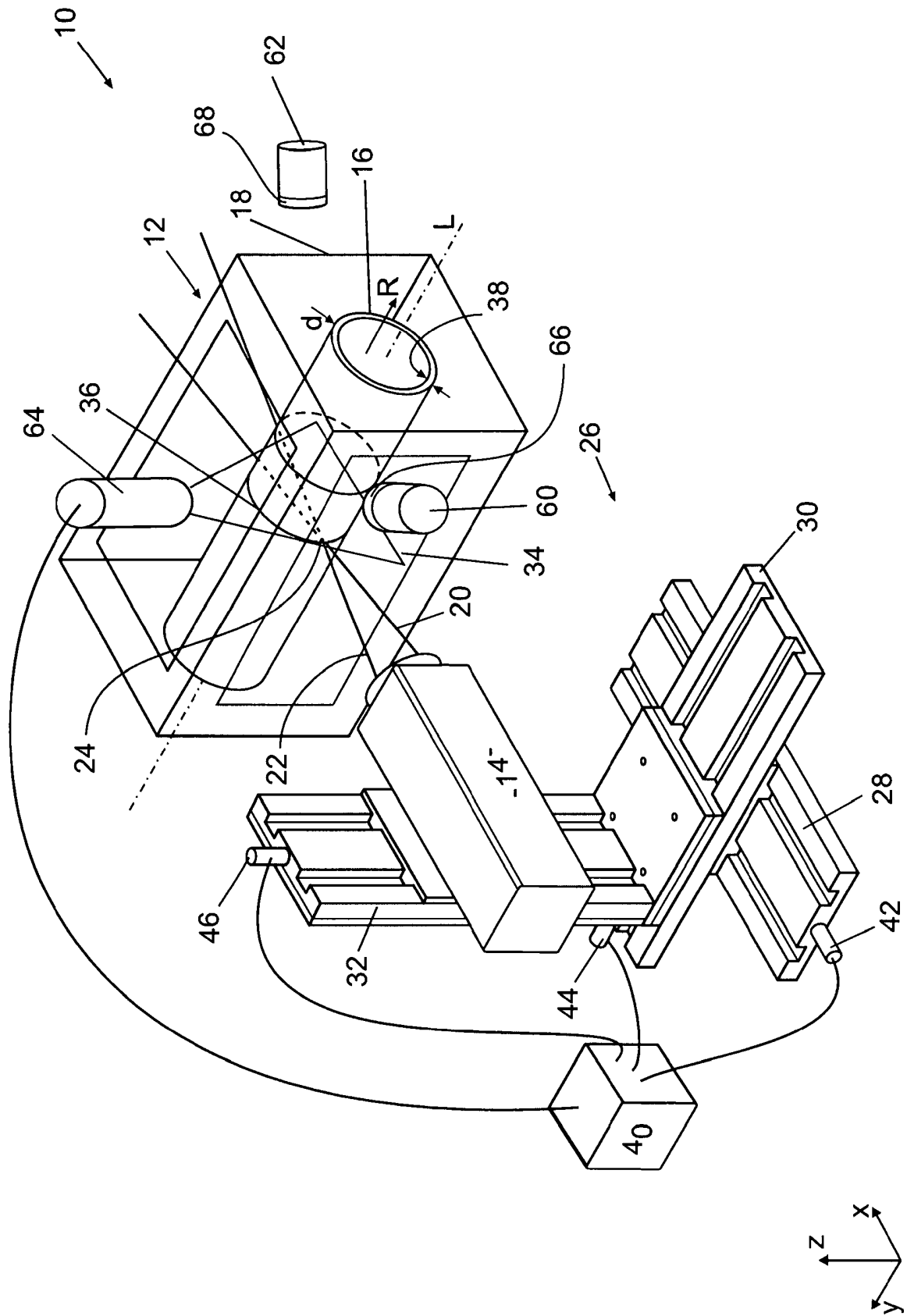


Fig. 1

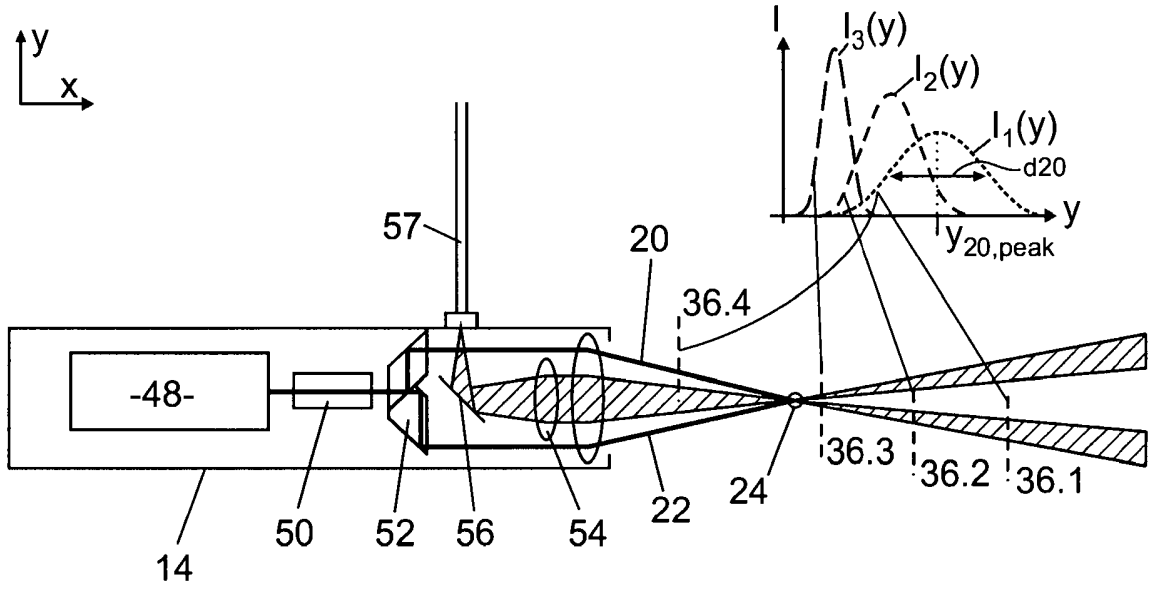


Fig. 2

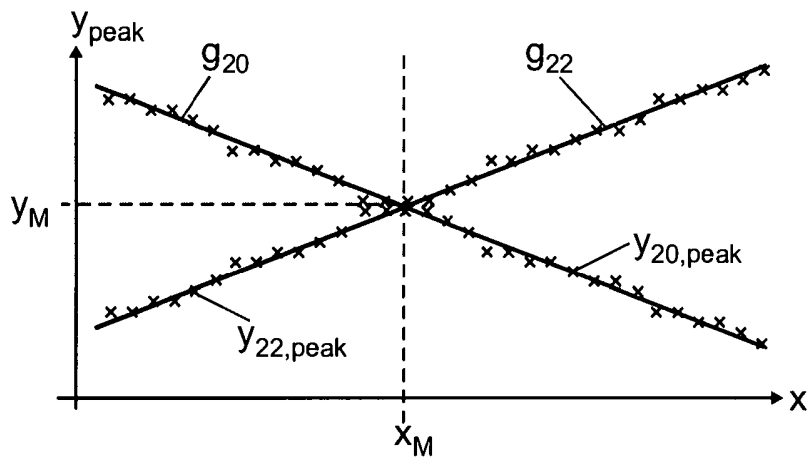


Fig. 3

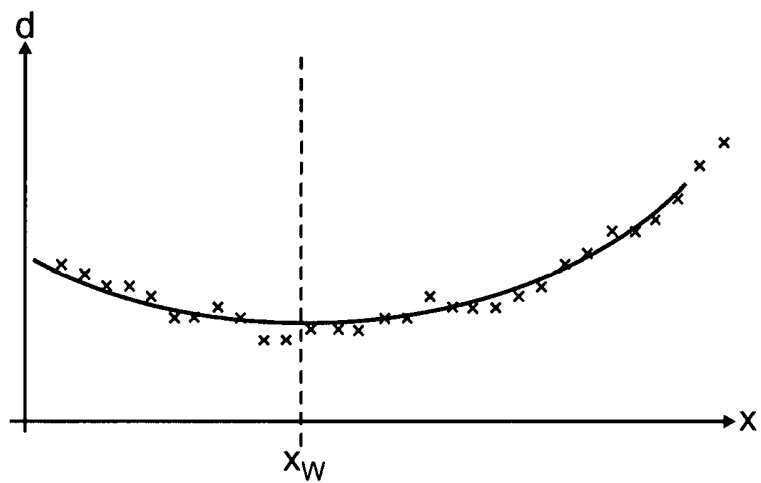


Fig. 4

Stand der Technik

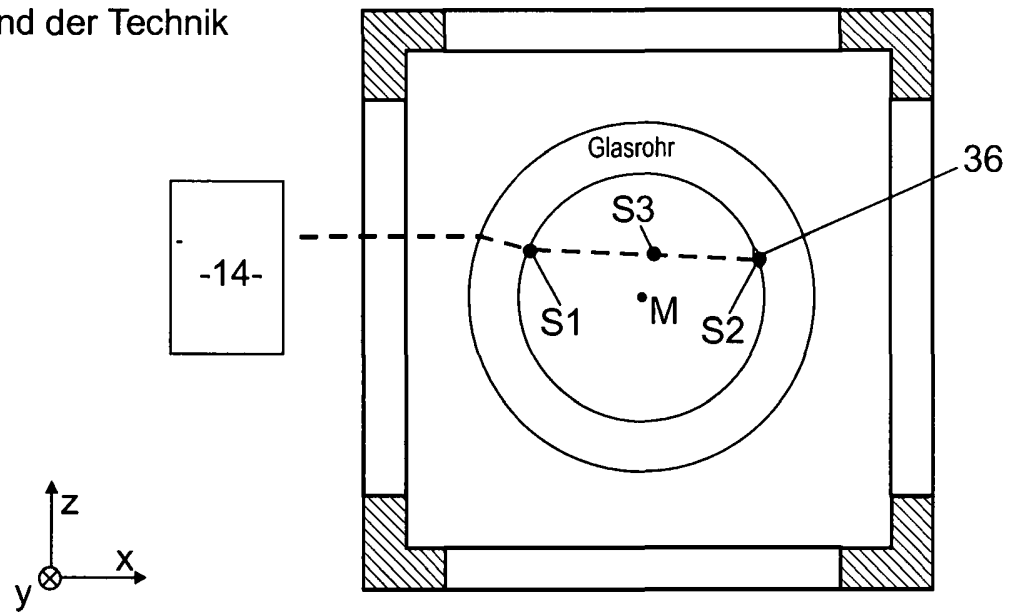


Fig. 5a

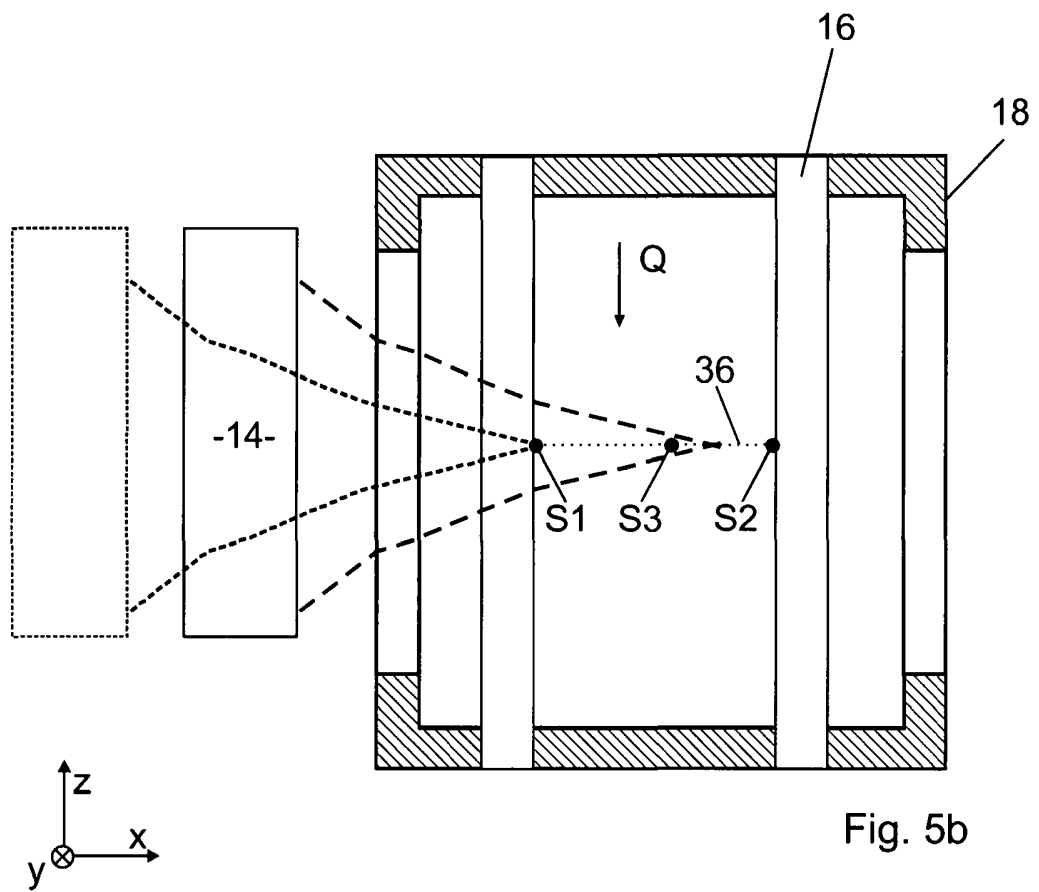


Fig. 5b

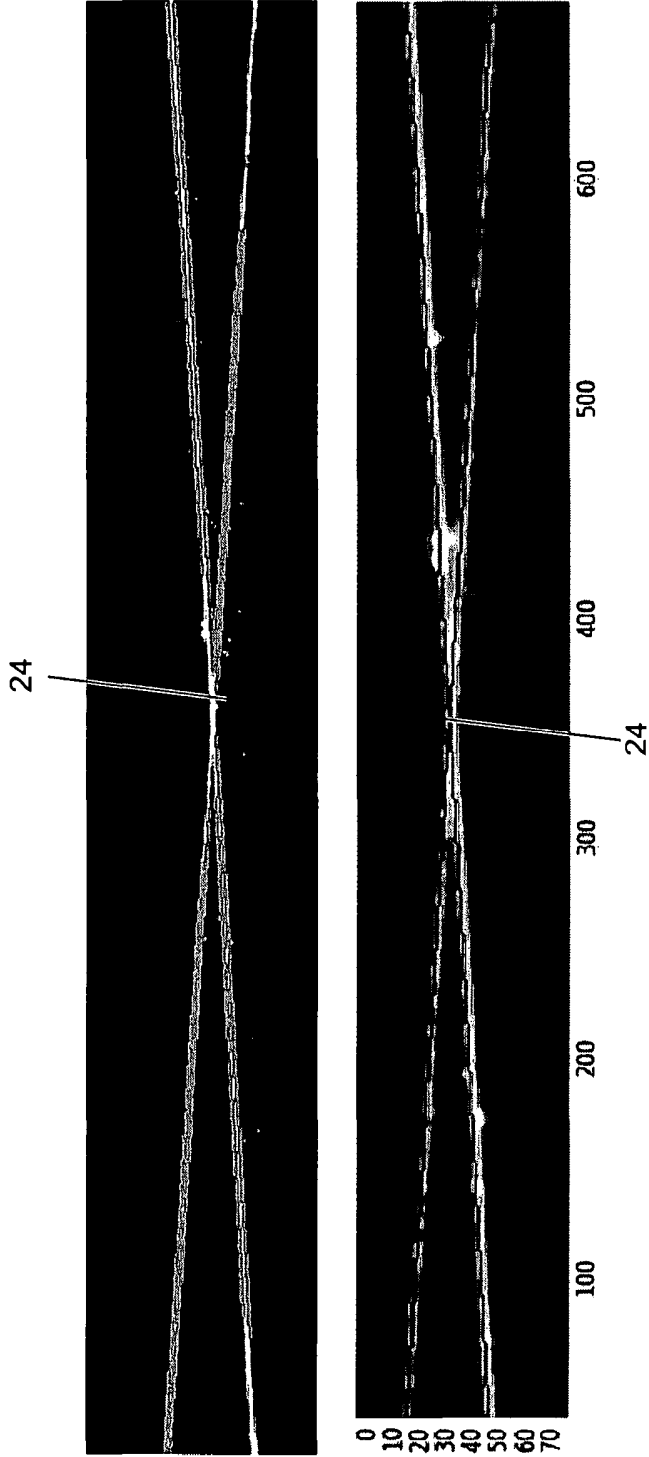


Fig. 6a

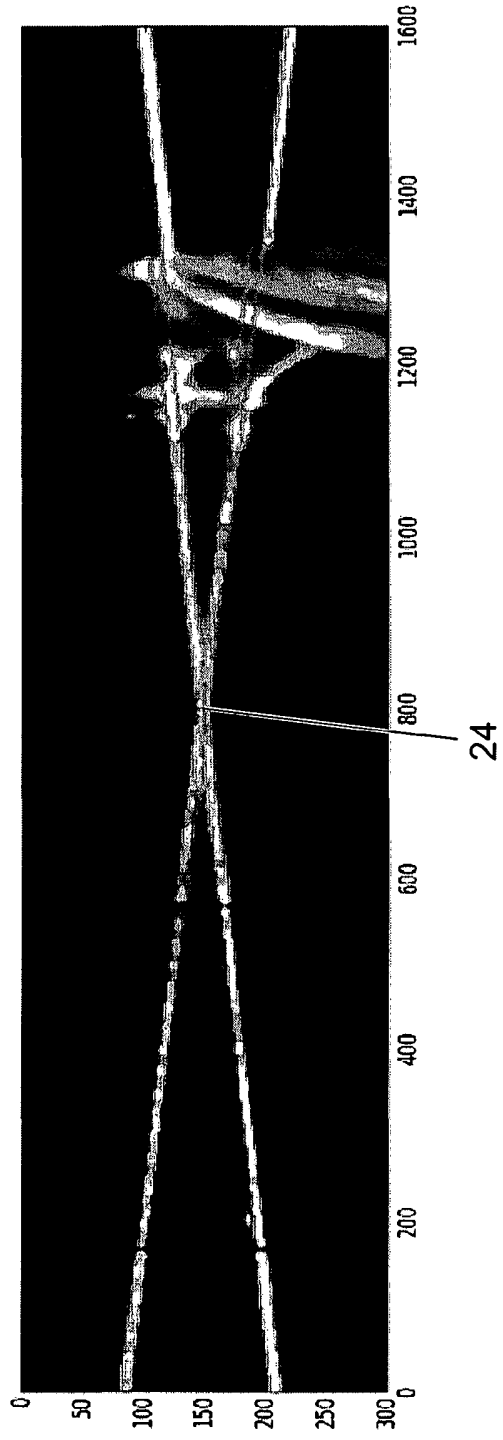


Fig. 6b