

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
20. August 2020 (20.08.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2020/165026 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G01P 5/26 (2006.01) G01K 13/02 (2006.01)
G01S 17/58 (2006.01)

(72) Erfinder: BÜTTNER, Lars; Klopstockstraße 26, 01157
Dresden Sachsen (DE). CZARSKE, Jürgen; Eibenstocker
Straße 101, 01277 Dresden Sachsen (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2020/053054

(74) Anwalt: RAUSCHENBACH PATENTANWÄLTE
PARTGMBB; Bienertstraße 15, 01187 Dresden (DE).

(22) Internationales Anmeldedatum:

06. Februar 2020 (06.02.2020)

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DJ, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,
HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP,
KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME,
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,
OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA,
SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

10 2019 103 882.0

15. Februar 2019 (15.02.2019) DE

(71) Anmelder: TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
[DE/DE]; Mommsenstr. 13, 01069 Dresden (DE).

(54) Title: METHOD FOR DETERMINING FLUID TEMPERATURE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR ERMITTLUNG DER FLUIDTEMPERATUR

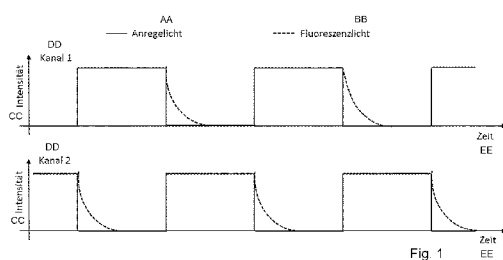


Fig 1

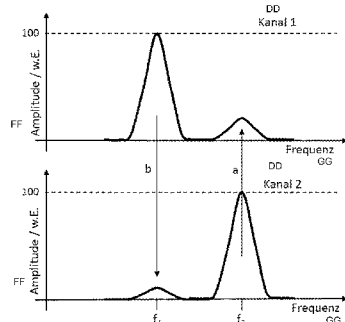


Fig 2

AA Excitation light
BB Fluorescence light
CC Intensity
DD Channel
EE Time
FF Amplitude / a. u.
GG Frequency

(57) Abstract: The invention concerns the field of measurement technology and relates to a method for determining fluid temperature, as can be used for example for characterizing the heat transfer of cooling or heating elements with keyhole access. The problem addressed by the present invention consists in specifying a simple and cost-effective method with which fluid temperature can be determined directly together with a spatially resolved speed measurement. The problem is solved by a method for determining fluid temperature in which at least two laser beams, which have at least light at a wavelength which excites at least the fluorescence of particles or a fluorescent substance in a flowing fluid and are amplitude-modulated and time-division-multiplexed, are directed through a flowing fluid containing particles, and a laser Doppler speed profile sensor is used to measure a spatially resolved speed of the flowing fluid, and at the same time or directly afterwards the fluid temperature is determined from the luminescence of the fluorescent particles and/or of the fluorescent substance.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Messtechnik und betrifft ein Verfahren zur Ermittlung der Fluidtemperatur, wie es beispielsweise für die Wärmeübertragungscharakterisierung von Kühl- oder Heizelementen mit Schlüsselloch-Zugang eingesetzt werden kann. Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht in der Angabe eines einfachen und kostengünstigen Verfahrens, mit dem die Fluidtemperatur unmittelbar gemeinsam mit einer orts aufgelösten Geschwindigkeitsermittlung bestimmbar ist. Gelöst wird die Aufgabe durch ein Verfahren zur Ermittlung der Fluidtemperatur, bei dem mindestens zwei Laserstrahlen, die mindestens Licht einer Wellenlänge aufweisen, das mindestens die Fluoreszenz von Partikeln oder einem Fluoreszenzstoff in einem strömenden Fluid anregt, und die amplitudenmoduliert sind und die im Zeitmultiplexbetrieb betrieben werden, durch ein strömendes Fluid mit Partikeln geleitet werden, und mit einem Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofil-Sensor an dem

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

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

strömenden Fluid eine orts aufgelöste Geschwindigkeitsmessung durchgeführt wird, und gleichzeitig oder unmittelbar nachfolgend die Fluidtemperatur über das Nachleuchten der fluoreszierenden Partikel und/oder des Fluoreszenzstoffes ermittelt wird.

Verfahren zur Ermittlung der Fluidtemperatur

Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Messtechnik und betrifft ein Verfahren zur Ermittlung der Fluidtemperatur, wie es beispielsweise für die Wärmeübertragungscharakterisierung von Kühl- oder Heizelementen mit Schlüsseloch-Zugang oder für die Wärmemengenmessung durch Rohrleitungen mittels gleichzeitiger Durchfluss- und Temperaturmessung eingesetzt werden kann.

Die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) ist ein etabliertes und kommerziell erfolgreiches Lasermessverfahren (H. Albrecht, et al: Laser-Doppler and phase-Doppler measurement techniques, Heidelberg: Springer, 2002).

Hierbei wird ein Laserstrahl mit einem Strahlteiler in zwei kohärente Teilstrahlen aufgespalten. Diese werden nach Durchlaufen einer Optik unter einem definierten Winkel zur Überschneidung gebracht. Im Schnittbereich der Strahlen bildet sich ein Interferenzmuster aus, das aus abwechselnden hellen und dunklen Flächen besteht, wobei die Ebenen senkrecht zu der von den Teilstrahlen aufgespannten Ebene und parallel zur optischen Achse verlaufen. Ausgehend von einer Schnittdarstellung spricht man vereinfachend von Interferenzstreifen mit einem charakteristischen Streifenabstand d .

Die Geschwindigkeit des Partikels (genauer: die Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur optischen Achse) kann dann aus folgendem Zusammenhang berechnet werden:

$$v = f_D \cdot d \quad (1)$$

wobei f_D die gemessene Dopplerfrequenz und d der (in guter Näherung als konstant betrachtete) Abstand der Interferenzstreifen ist.

Die Geschwindigkeitsermittlung ist demnach in dem Bereich möglich, in dem Interferenz zwischen den beiden Strahlen auftritt, d.h. in dem Bereich, in dem sich beide Strahlen überschneiden. Dieser Überschneidungsbereich wird daher kurz als Messvolumen bezeichnet und hat die Form eines Ellipsoids.

Wird ein Interferenzstreifenmuster in ein strömendes Fluid als Messvolumen geleitet, welches Partikel enthält, die entweder natürlich enthalten sind oder künstlich zugesetzt wurden, und die der Strömung möglichst ohne Schlupf folgen, wird durch die Bewegung eines Partikels durch den Schnittbereich der Strahlen das Licht an den Flächen konstruktiver Interferenz gestreut. Dadurch ist das ausgesendete Streulicht mit einer bestimmten Frequenz, der Doppler-Frequenz f_D , amplitudenmoduliert. Durch elektrooptische Detektion mit einem Photoempfänger kann dieses Streulicht registriert und mittels eines Signalverarbeitungsalgorithmus' die Dopplerfrequenz f_D bestimmt werden.

Da mit dem LDA jedoch keine Information über die Position der Streupartikel innerhalb des Messvolumens erhalten werden kann, wird die Messung als (quasi-) punktförmig bezeichnet. Die Ortsauflösung dieser quasi-punktförmigen Messung wird durch die Ausdehnung des Interferenzstreifensystems, d.h. des Schnittvolumens der beiden Teilstrahlen, bestimmt. Sie beträgt typischerweise $0,1 \times 0,1 \times 1 \text{ mm}^3$.

Die Unsicherheit der Ermittlung der Geschwindigkeit hängt von der Frequenzschätzung und von der Konstanz oder Variation des Streifenabstandes ab. Sie beträgt typischerweise zwischen 0,1 % bis 1 % je nach verwendetem Modell und Einsatzzweck.

Geschwindigkeitsprofile von Strömungen werden mit diesem punktförmigen Verfahren vermessen, indem unterschiedliche Punkte auf dem Geschwindigkeitsprofil angefahren und dort die lokalen Geschwindigkeiten bestimmt werden. Das Geschwindigkeitsprofil wird damit punktweise abgetastet. Dazu kommen üblicherweise motorisierte Präzisionsverstellische zum Einsatz, die den Messkopf mechanisch traversieren.

Zur Verbesserung der Ermittlung der Geschwindigkeitsprofile von Strömungen ist der Einsatz eines auf der Laser-Doppler-Anemometrie basierenden Laser-Doppler-Profilsensors bekannt (J. Czarske, et al: Meas. Sci. Technol. 13, S. 1979-1989, 2002: DE 10 2005 042 954 A1; DE 10 2009 055 799 A1; DE 10 2010 049 673 A1; DE 10 2011 009 675 A1).

Das Funktionsprinzip dieses Laser-Doppler-Profilsensors beruht auf der Erzeugung von zwei in einem gemeinsamen Messvolumen überlagerten Interferenzstreifensystemen, von denen mindestens eines fächerförmig ist. Idealerweise sind beide fächerförmig mit entgegengesetzten Ausrichtungen: Ein konvergentes Streifensystem, bei dem der Streifenabstand entlang der z-Achse (=optische Achse) kontinuierlich abnimmt, und ein divergentes Streifensystem, bei dem der Interferenzstreifenabstand entsprechend kontinuierlich ansteigt. Die Streifensysteme werden durch jeweils eine Streifenabstandsfunktion $d_{1,2}(z)$ beschrieben.

Durchquert ein Streupartikel das Messvolumen, so kann das Streulicht von beiden Streifensystemen getrennt und diesen zugeordnet werden, so dass sich zwei Dopplerfrequenzen f_1 und f_2 ermitteln lassen. Der Quotient dieser beiden Dopplerfrequenzen

$$q(z) = \frac{f_2(v, z)}{f_1(v, z)} = \frac{v(z)/d_2(z)}{v(z)/d_1(z)} = \frac{d_1(z)}{d_2(z)} \quad (2)$$

hängt nicht mehr von der Streuobjektgeschwindigkeit v ab und kann somit als Kalibrierfunktion zur Bestimmung der axialen Position z des Streupartikels innerhalb des Messvolumens verwendet werden.

Dies ist der wesentliche Fortschritt gegenüber dem konventionellen LDA.

Mit Hilfe der bekannten Durchtrittsposition z des Streupartikels durch das Messvolumen können dann die lokalen Streifenabstände $d_1(z)$ und $d_2(z)$ aus den durch die vorherige Sensorkalibrierung bekannten Streifenabstandsverläufen ermittelt werden. Zusammen mit den beiden Dopplerfrequenzen ergibt sich dann die Streuobjektgeschwindigkeit zu (analog zu Gl. 1):

$$v(z) = f_1(v, z)d_1(z) = f_2(v, z)d_2(z) \quad (3)$$

Da der Laser-Doppler-Profilsensor die Position der Streuobjekte innerhalb des Messvolumens ermitteln kann und diese statistisch verteilt in der Strömung vorliegen, wird durch eine Ensemblemessung das komplette im Messvolumen vorherrschende Geschwindigkeitsprofil ohne mechanische Traversierung des Sensors ermittelt.

Bei diesem Verfahren ist die Ortsauflösung entlang der optischen Achse nicht mehr durch die Ausdehnung des Interferenzstreifensystems in dieser Richtung bestimmt, sondern, da der axiale Ort der Streuteilchen bestimmt wird, durch die Unsicherheit der Ortsbestimmung. Diese wiederum hängt von der Steigung der Kalibrierfunktion und der Unsicherheit der Frequenzschätzung ab. Sie liegt typischerweise im Mikrometerbereich, was einer Verbesserung der Genauigkeit der Ortsbestimmung gegenüber einem konventionellen LDA um einen Faktor ca. 1000 entspricht.

Die Unsicherheit der Geschwindigkeitsbestimmung hängt damit, im Gegensatz zum konventionellen LDA, nur noch von der Frequenzschätzung und nicht mehr von der Konstanz oder Variation des Streifenabstandes ab. Sie beträgt bis zu 0,01 %.

Nachteilig bei den Lösungen des Standes der Technik ist, dass neben der orts aufgelösten Geschwindigkeitsermittlung keine weiteren Eigenschaften der Fluide auf einfache und kostengünstige Art und Weise unmittelbar bestimmbar sind.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht in der Angabe eines einfachen und kostengünstigen Verfahrens zur Ermittlung der Fluidtemperatur von

strömenden Fluiden, mit dem die Fluidtemperatur unmittelbar gemeinsam mit einer orts aufgelösten Geschwindigkeitsermittlung bestimmbar ist.

Gelöst wird die Aufgabe durch die in den Ansprüchen angegebene Erfindung. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche, wobei die Erfindung auch Kombinationen der einzelnen Ansprüche im Sinne einer und-Verknüpfung mit einschließt, solange sie sich nicht gegenseitig ausschließen.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Ermittlung der Fluidtemperatur werden mindestens zwei Laserstrahlen, die mindestens Licht einer Wellenlänge aufweisen, das mindestens die Fluoreszenz von Partikeln oder einem Fluoreszenzstoff in einem strömenden Fluid anregt, wobei die Laserstrahlen amplitudenmoduliert sind und die im Zeitmultiplexbetrieb betrieben werden, und die durch ein strömendes Fluid mit Partikeln, die mindestens fluoreszierende Eigenschaften oder Fluoreszenz aufweisen oder einen Fluoreszenzstoff enthalten, und bei denen die Fluoreszenzlebensdauer temperaturabhängig ist, geleitet werden, und mit einem Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofil-Sensor an dem strömenden Fluid eine orts aufgelöste Geschwindigkeitsmessung durchgeführt wird, und gleichzeitig oder unmittelbar nachfolgend die Fluidtemperatur über das Nachleuchten der fluoreszierenden Partikel und/oder des Fluoreszenzstoffes ermittelt wird.

Vorteilhafterweise wird die orts aufgelöste Geschwindigkeitsmessung nach einer Kalibrierung des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofil-Sensors in Abhängigkeit von dem Fluid und den Partikeln durchgeführt.

Weiterhin vorteilhafterweise werden als fluoreszierende Partikel Partikel aus organischen Farbstoffen, Rhodaminen, mit Europium dotierten Farbstoffen, wie Europium (III) thenoyltrifluoroacetate (EuTTa), oder Yttrium-Aluminaten, Cadmiumwolframat (CdWO_4), Zinkoxid dotiert mit Zink (ZnO:Zn), Alexa-488 oder Partikel, die einen Fluoreszenzstoff aus organischen Farbstoffen, Rhodaminen, mit Europium dotierten Farbstoffen, wie Europium (III) thenoyltrifluoroacetate (EuTTa), oder Yttrium-Aluminaten, Cadmiumwolframat (CdWO_4), Zinkoxid dotiert mit Zink (ZnO:Zn) oder Alexa-488 enthalten oder damit beschichtet sind, eingesetzt.

Ebenfalls vorteilhafterweise wird gleichzeitig zur orts aufgelösten Geschwindigkeitsmessung mittels des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofil-Sensors die Ermittlung der Fluidtemperatur durchgeführt.

Und auch vorteilhafterweise werden die mindestens zwei Laserstrahlen entweder von einem Laser ausgestrahlt und der Strahl mit einem Strahlteiler in zwei Laserstrahlen aufgeteilt, wobei dann jeder der Strahlen einen eigenen Amplitudenmodulator enthält, oder der nur eine Laser wird mit einem elektrooptischen Modulator gekoppelt, der den einen Laserstrahl je nach Schaltzustand in einen von zwei Ausgängen lenkt, so dass abwechselnd je ein Laserstrahl abgestrahlt wird.

Es ist auch vorteilhaft, wenn zur Erzeugung der mindestens zwei Laserstrahlen zwei oder mehr Laser eingesetzt werden, die Licht mit jeweils gleicher oder nahezu gleicher Wellenlänge erzeugen, wobei bei unterschiedlichen Wellenlängen die jeweiligen Laserstrahlen vorteilhafterweise alle die Fluoreszenz der Partikel oder des Fluoreszenzfarbstoffes anregen.

Und auch vorteilhaft ist es, wenn der oder die Laser zur Anregung der fluoreszierenden Eigenschaften der Partikel mit einer Wellenlänge von 350 bis 800 nm betrieben werden.

Vorteilhaft ist es auch, wenn die Amplitudenmodulation der die mindestens zwei Interferenzstreifensysteme erzeugenden Laserstrahlen durch direkte Modulation der Laser oder durch externe Modulatoren durchgeführt wird.

Weiterhin vorteilhaft ist es, wenn die Amplitudenmodulation der die mindestens zwei Interferenzstreifensysteme erzeugenden Laserstrahlen in Form einer Rechteckmodulation und einer Phasenverschiebung von 90° bis 240° , vorteilhafterweise von 180° , durchgeführt wird.

Von Vorteil ist es auch, wenn durch das Nachleuchten der fluoreszierenden Partikel oder des Fluoreszenzstoffes ein Übersprechen der amplitudenmodulierten mindestens zwei Laserstrahlen erzeugt wird, welches durch Übersprechkoeffizienten angegeben wird, und aus den Übersprechkoeffizienten, die unmittelbar abhängig sind von der

Fluoreszenzlebensdauer, die wiederum eine Funktion der Temperatur $\tau=\tau(T)$ ist, die Temperatur des Fluoreszenzstoffes und damit die Temperatur des Partikels und des Fluides bestimmt wird.

Und ebenfalls von Vorteil ist es, wenn die Übersprechkoeffizienten a und b von zwei Lasersignalen S_1 und S_2 bestimmt werden durch

$$\begin{pmatrix} S'_1(t) \\ S'_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1(t) + aS_2(t) \\ S_2(t) + bS_1(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a \\ b & 1 \end{bmatrix} \underline{S} = \begin{bmatrix} 1 & a \\ b & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \end{pmatrix}$$

Mit der erfindungsgemäßen Lösung wird es erstmals möglich, die Fluidtemperatur von strömenden Fluiden gemeinsam mit einer orts aufgelösten Geschwindigkeitsermittlung zu bestimmen.

Erreicht wird dies durch ein Verfahren zur Ermittlung der Fluidtemperatur von einem strömenden Fluid mit Partikeln, die mindestens fluoreszierende Eigenschaften oder Fluoreszenz aufweisen oder einen Fluoreszenzstoff enthalten, und deren Fluoreszenzlebensdauer temperaturabhängig ist.

Als fluoreszierende Partikel werden vorteilhafterweise Partikel aus organischen Farbstoffen, Rhodaminen, mit Europium dotierten Farbstoffen, wie Europium (III) thenoyltrifluoroacetate (EuTTa), oder Yttrium-Aluminaten, Cadmiumwolframat (CdWO_4), Zinkoxid dotiert mit Zink (ZnO:Zn) oder Alexa-488 eingesetzt.

Es ist ebenfalls erfindungsgemäß vorteilhaft Partikel einzusetzen, die einen Fluoreszenzstoff enthalten oder damit beschichtet sind, wobei der Fluoreszenzstoff aus den gleichen Materialien bestehen kann wie die fluoreszierenden Partikel.

Weiterhin werden bei dem erfindungsgemäßen Verfahren mindestens zwei Laserstrahlen eingesetzt, die mindestens Licht einer Wellenlänge aufweisen, das mindestens die Fluoreszenz der Partikel oder des Fluoreszenzstoffes im strömenden Fluid anregt, und deren Licht amplitudenmoduliert ist und die im Zeitmultiplexbetrieb betrieben werden.

Dabei ist es erfindungsgemäß von Bedeutung, dass die mindestens zwei Laserstrahlen mindestens zwei (Interferenz-)Streifensysteme erzeugen, damit die Messung der orts aufgelösten Geschwindigkeit der Partikel realisiert werden kann.

Vorteilhafterweise können die mindestens zwei Laserstrahlen entweder von einem Laser ausgestrahlt und der Strahl mit einem Strahlteiler in zwei Laserstrahlen aufgeteilt werden, wobei dann jeder der Strahlen einen eigenen Amplitudenmodulator enthält, oder der nur eine Laser wird mit einem elektrooptischen Modulator gekoppelt, der den einen Laserstrahl je nach Schaltzustand in einen von zwei Ausgängen lenkt, so dass abwechselnd je ein Laserstrahl abgestrahlt wird.

Ebenfalls können erfindungsgemäß auch zwei oder mehr Laser eingesetzt werden, um die mindestens zwei Laserstrahlen zu erzeugen. Im Falle des Einsatzes von mehr als einem Laser ist es erfindungsgemäß vorteilhaft, wenn die Laser Licht mit jeweils gleicher oder nahezu gleicher Wellenlänge erzeugen, wobei bei unterschiedlichen Wellenlängen die jeweiligen Laserstrahlen vorteilhafterweise alle die Fluoreszenz der Partikel oder des Fluoreszenzfarbstoffes anregen.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren werden die mindestens zwei Laserstrahlen durch das strömende Fluid mit Partikeln geleitet, die mindestens fluoreszierende Eigenschaften oder Fluoreszenz aufweisen oder einen Fluoreszenzstoff enthalten, wobei die Fluoreszenzlebensdauer der Partikel oder des Fluoreszenzstoffes temperaturabhängig ist.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren wird an dem strömenden Fluid eine orts aufgelöste Geschwindigkeitsmessung mit einem Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofil-Sensor durchgeführt.

Dies erfolgt vorteilhafterweise derart, dass die orts aufgelöste Geschwindigkeitsmessung nach einer Kalibrierung des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofil-Sensors in Abhängigkeit von dem Fluid und den Partikeln durchgeführt wird.

Als Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofil-Sensor werden die nach dem Stand der Technik bekannten Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofil-Sensoren eingesetzt.

Gleichzeitig oder unmittelbar nachfolgend, vorteilhafterweise gleichzeitig, wird mit der orts aufgelösten Geschwindigkeitsmessung die Ermittlung der Fluidtemperatur über das Nachleuchten der fluoreszierenden Partikel bestimmt.

Ebenso werden erfindungsgemäß mindestens zwei Laserstrahlen eingesetzt deren Licht amplitudenmoduliert ist.

Die Modulation des Laserlichtes kann vorteilhafterweise durch direkte Modulation der Laser durchgeführt werden, aber auch durch externe Modulatoren realisiert werden.

Vorteilhafterweise wird die Modulation des Laserlichtes in Form einer Rechteckmodulation durchgeführt und/oder es kann eine Phasenverschiebung von 180° durchgeführt werden. Noch vorteilhafterweise wird sowohl eine Rechteckmodulation als auch eine Phasenverschiebung der mindestens zwei Laserstrahlen realisiert.

Erfindungsgemäß werden weiterhin die mindestens zwei Laserstrahlen im Zeitmultiplexbetrieb betrieben.

Dabei wird die für die Zweifachmessung notwendige physikalische Unterscheidbarkeit der Interferenzstreifensysteme der Laserstrahlen durch ein wechselseitiges Schalten der Laserstrahlen erreicht.

Dies ist von besonderer erfindungsgemäßer Bedeutung, da durch den Zeitmultiplexbetrieb der Laserstrahlen überhaupt erst ein Nachleuchten der fluoreszierenden Partikel oder des Fluoreszenzstoffes erfasst und damit die Ermittlung der Übersprechung und damit der Temperatur erreicht werden kann.

Weiter ist von erfindungsgemäßer Bedeutung, dass für den Zeitmultiplexbetrieb der Laserstrahlen eine Amplituden-Modulation der Laserstrahlen durchgeführt worden ist, da damit klar definierte Interferenzstreifensysteme ohne Nachleuchten erzeugt werden, von denen sich erfindungsgemäß das von den Interferenzstreifensystemen erzeugte Streulicht der fluoreszierenden Partikel oder des Fluoreszenzstoffes durch ihr Nachleuchten deutlich unterscheidet.

Das Nachleuchten der fluoreszierenden Partikel oder des Fluoreszenzstoffes ist abhängig von der Fluoreszenzlebensdauer des jeweils verwendeten fluoreszierenden

Materials, welche aus dem Stand der Technik bekannt ist. Dabei ist es auch erforderlich, dass das verwendete Material neben den fluoreszierenden Eigenschaften auch eine Temperaturabhängigkeit dieser fluoreszierenden Eigenschaften aufweist.

Das Nachleuchten der fluoreszierenden Partikel oder des Fluoreszenzstoffes erzeugt ein Übersprechen zwischen den mindestens zwei erfindungsgemäß durch die mindestens zwei amplitudenmodulierten Laserstrahlen im Zeitmultiplexbetrieb erzeugten Interferenzstreifensystemen.

Dieses Übersprechen kann vorteilhafterweise durch Übersprechkoeffizienten angegeben werden, die dann auch wie das Nachleuchten unmittelbar abhängig sind von der Fluoreszenzlebensdauer. Die Fluoreszenzlebensdauer ist wiederum eine Funktion der Temperatur $\tau=\tau(T)$ (mit $a=a(\tau)$, $b=b(\tau)$).

Somit können auf diesem Wege die Temperatur des Fluoreszenzstoffes und damit die Temperatur des Partikels und des Fluides bestimmt werden.

Es wird erfindungsgemäß davon ausgegangen, dass sowohl Fluoreszenzstoff und Partikel und Fluid die gleiche Temperatur aufweisen.

Vorteilhafterweise können die Übersprechkoeffizienten a und b von zwei Lasersignalen S_1 und S_2 bestimmt werden durch

$$\begin{pmatrix} S'_1(t) \\ S'_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1(t) + aS_2(t) \\ S_2(t) + bS_1(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a \\ b & 1 \end{bmatrix} \underline{S} = \begin{bmatrix} 1 & a \\ b & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \end{pmatrix}$$

Im Idealfall sind erfindungsgemäß die Signale der die Interferenzstreifensysteme erzeugenden Laserstrahlen rechteckförmig und um 180° phasenverschoben amplitudenmoduliert, so dass zu jedem Zeitpunkt immer nur ein Streifensystem aktiv ist. Die Ermittlung der Signale durch das nachgeschaltete Signalverarbeitungssystem erfolgt jeweils nur zu den Einschaltzeiten der Laserstrahlen, das heißt nicht auf den Flanken der Rechtecksignale, so dass bei jeder Ermittlung jeweils nur das Signal eines Streifensystems vorliegt.

Später werden in der Signalverarbeitung die Signale ausgewertet und zeitlich (mindestens zwei) Messkanälen zugeordnet (Demultiplex), in dem zum Beispiel alle

geraden Werte einem Interferenzstreifensystem 1 und alle ungeraden Werte dem anderen Interferenzstreifensystem 2 zugeordnet werden.

Im Idealfall der beschriebenen Rechteckmodulation enthält das Signal von Laserstrahl 1 nur Streulichtanteile des 1. Interferenzstreifensystems und das Signal von Laserstrahl 2 nur Streulichtanteile des 2. Interferenzstreifensystems. Das Übersprechen ist dann exakt Null, sofern keine fluoreszierenden Partikel untersucht werden.

Dieser Zustand entspricht sowohl der erfindungsgemäßen Amplitudenmodulation der Laserstrahlen als auch dem erfindungsgemäßen Zeitmultiplexbetrieb der Laserstrahlen.

Bei der Verwendung fluoreszierender Partikel oder Fluoreszenzstoffe leuchten diese noch nach, auch wenn das Anregelicht der Laserstrahlen abgeschaltet wurde. Das Nachleuchten der Fluoreszenz klingt exponentiell ab:

$$I(t) = I_0 \exp\left\{-t/\tau\right\}$$

Dabei ist τ die Fluoreszenz-Lebensdauer. Die Fluoreszenz-Lebensdauer ist bei den erfindungsgemäß eingesetzten Fluoreszenzstoffen eine Funktion der Temperatur, d.h. $\tau=\tau(T)$. Damit kann erfindungsgemäß aus dem Nachleuchten der fluoreszierenden Partikel oder des Fluoreszenzstoffes die Temperatur des Fluids bestimmt werden.

Das Nachleuchten führt nun zu einem Übersprechen zwischen den mindestens zwei erfindungsgemäß erzeugten Interferenzstreifensystemen, indem Signalanteile von Laserstrahl 2 in Zeitintervalle gelangen, die für die Signale von Laserstrahl 1 vorgesehen sind, und umgekehrt.

Das Übersprechen kann definiert werden als:

- Sind $S_{1,2}(t)$ die ursprünglichen, ungestörten Signale und
- a, b die Stärken des Übersprechens (Übersprech-Koeffizienten),
- dann sind die mit Übersprechen behafteten Signale $S'_{1,2}(t)$:

$$\begin{pmatrix} S'_1(t) \\ S'_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1(t) + aS_2(t) \\ S_2(t) + bS_1(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a \\ b & 1 \end{bmatrix} \underline{S} = \begin{bmatrix} 1 & a \\ b & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \end{pmatrix}$$

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Ermittlung der Fluidtemperatur wird unter Einsatz des bekannten Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors durchgeführt. Durch diesen Sensor wird die Position und die Geschwindigkeit von in der Strömung mitgeführten Partikeln ermittelt und damit das im Messvolumen vorherrschende Geschwindigkeitsprofil ermittelt.

Erfindungsgemäß werden nun mindestens zwei amplitudenmodulierte Laserstrahlen im Zeitmultiplexbetrieb betrieben, wodurch durch direkte oder indirekte Bestimmung der Fluoreszenz-Lebensdauer von fluoreszierenden Partikeln oder des Fluoreszenzstoffes die Temperatur der Partikeln und des Fluids ermittelt werden kann. Ein Vorteil der erfindungsgemäßen Lösung besteht darin, dass das erfindungsgemäße Verfahren ohne Änderung des opto-mechanischen Aufbaus und des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors durchgeführt werden kann.

Mit der erfindungsgemäßen Lösung sind nun erstmals hochaufgelöste rückwirkungsfreie kombinierte Strömungsgeschwindigkeits- und Fluidtemperatur-Ermittlungen mit nur einem Gerät, insbesondere in Grenzschichten wandnaher Strömungen für zum Beispiel die Wärmeübertragungscharakterisierung von Kühl- oder Heizelementen mit Schlüsselloch-Zugang möglich.

Erfindungsgemäß werden durch die mindestens zwei amplitudenmodulierten Laserstrahlen im Zeitmultiplexbetrieb zwei alternierende Interferenzstreifensysteme erzeugt. Fluoreszierende Partikel oder Fluoreszenzstoffe werden zunächst von dem Streifensystem des ersten Laserstrahls beleuchtet und anschließend von dem zweiten. Die detektierten Signale können zeitlich getrennt werden und damit über den bekannten Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor die hoch aufgelöste Strömungsgeschwindigkeitsmessung durchgeführt werden.

Wenn zwischen den beiden Beleuchtungsschritten ein zeitlicher Abstand besteht, leuchten die Partikel oder der Fluoreszenzstoff gemäß ihrer Fluoreszenzlebensdauer nach. Der zeitliche Abfall dieses Lichtes hängt von der Temperatur ab.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren kann von beobachteten Partikeln in dem strömenden Fluid die Position innerhalb des Messvolumens, die Strömungsgeschwindigkeit lateral zur Beobachtungsrichtung und die Temperatur gemäß der Fluoreszenzlebensdauer zugeordnet werden.

Durch Messung und Bestimmung der Position der Partikel, ihrer Strömungsgeschwindigkeit lateral zur Beobachtungsrichtung und ihrer Temperatur gemäß der Fluoreszenzlebensdauer an einer Vielzahl an Partikeln kann auch über eine statistische Auswertung ein mittlerer Temperaturwert über eine bestimmte Klasse oder Anzahl von Partikeln angegeben werden.

Die zur Realisierung des Verfahrens notwendige Vorrichtung, die mindestens zwei Laserstrahlen und einem Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensor beinhaltet, ist eine kompakte, portable und einfach zu handhabende Vorrichtung, durch die der Einsatz des erfindungsgemäßen Verfahrens einfach und kostengünstig wird.

Der Grundansatz basierend auf dem Laser-Doppler-Profilsensor bietet die Möglichkeit, mit nur einem optischen Zugang eine sehr hohe axiale Auflösung für das Strömungs- und Temperaturprofil zu erreichen und gleichzeitig eine Implementierung einer Temperaturbestimmung ohne Änderungen oder Erweiterungen des optischen Aufbaus zu realisieren.

Nachfolgend wird die Erfindung an einem Ausführungsbeispiel näher erläutert.

Dabei zeigen

Fig. 1 die Zeitabhängigkeit der beiden Interferenzstreifensysteme der beiden Laserstrahlen mit dem Übersprechen des Fluoreszenzstoffes

und

Fig. 2 die im Frequenzspektrum auftretenden Signale eines Partikels mit deutlich sichtbarem Übersprechen, das aus dem Nachleuchten des Fluoreszenzfarbstoffs resultiert

Beispiel 1

Der Strahl eines Lasers mit 480 nm Wellenlänge wird durch einen elektrooptischen Modulator (EOM) geleitet. Der EOM wird mit einem Signal von 150 MHz geschaltet, so dass der einlaufende Laserstrahl mit dieser Frequenz zwischen zwei beiden Ausgängen den EOM hin- und herwechselt. Die Amplituden der beiden austretenden Laserstrahlen sind dann mit 150 MHz rechteckmoduliert und weisen untereinander eine Phasenverschiebung von 180° auf (Fig. 1). Jeder der Strahlen durchläuft eine Optik, die aus ihm ein fächerförmiges Interferenzstreifensystem erzeugt, wobei das Streifensystem des einen Strahls konvergiert, das des anderen Strahls divergiert. Zu jedem Zeitpunkt ist also nur ein Streifensystem vorhanden (Multiplex). Die beiden Streifensysteme sind überlagert, d. h. befinden sich an der gleichen Stelle im Raum, und bilden so das Messvolumen.

Das Messvolumen wird nun in das zu untersuchende strömende Fluid gerichtet, welches eine durch ein Glasfenster zu beobachtende Grenzschicht eines wasserdurchströmten Rohres ist. Das Wasser führt mikroskopische Partikel mit sich, die den Fluoreszenzfarbstoff Alexa-488 enthalten, der eine mittlere Fluoreszenzlebensdauer von $\tau = 4,1$ ns aufweist. Strömt ein Partikel durch das Messvolumen, so streut es Licht, das mit einer Streulichtoptik aufgefangen und auf eine Photodiode geführt wird. Etwaiges elastisch gestreutes Licht der Anregewellenlänge wird mit einem Farbfilter blockiert. Das Detektorsignal der Photodiode wird mit einem Analog/Digitalwandler digitalisiert und mit einem Rechner weiterverarbeitet. Die Bandbreite sowohl des Detektors wie auch der nachfolgenden Elektronik und des Wandlers beträgt das Fünffache der Modulationsfrequenz des EOMs. Das Schaltsignal des EOMs ist mit der Abtastung des Analog/Digitalwandlers synchronisiert. Im Rechner findet das Demultiplexing statt, d. h. es werden die Abtastwerte so auf zwei Messkanäle verteilt, dass sie den einzelnen Interferenz-Streifensystemen zugeordnet sind.

In der auf dem Rechner implementierten Signalverarbeitungssoftware werden zunächst die Signale von einzelnen Partikeln („Burstsignale“) identifiziert und einzeln weiterverarbeitet. Jedes Partikel führt zu zwei gleichzeitig auftretenden, pulsformigen Signalen, einem auf Kanal eins vom konvergenten, einem auf Kanal zwei vom divergenten Streifensystem. Für jedes Signal wird mittels einer Fourier-Transformation das Frequenzspektrum berechnet. Die Signale weisen im Spektrum einen markanten Peak auf, den Doppler-Peak. Von jedem Peak werden nun die Mittenfrequenz und die Peakhöhe bestimmt. Auf diese Weise werden zwei Dopplerfrequenzen f_1 und f_2 erhalten, die wegen der unterschiedlichen Streifenabstände entlang der Trajektorie des Partikels im Allgemeinen unterschiedlich sind (Fig. 2). Aus diesen beiden Frequenzen können nun zunächst nach dem Prinzip des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofilsensors die axiale Position und die laterale Geschwindigkeitskomponente des das Messvolumen durchquerenden Partikels bestimmt werden. Durch die Auftragung sehr vieler ausgewerteter Partikel ergibt sich das Geschwindigkeitsprofil der Strömung

Die Fluoreszenz des in den Partikeln enthaltenen Farbstoffs klingt exponentiell ab, was zu einem Nachleuchten führt: $I(t) = I_0 \cdot \exp\{-t/\tau\}$, wobei erfindungsgemäß die Fluoreszenz-Lebensdauer von der Temperatur abhängt $\tau = \tau(T)$. Wegen des Nachleuchtens der Partikel kommt es zu einem Übersprechen beim Demultiplex. Ein Partikel vom 1. Streifensystem (Kanal 1) wird dabei zum Leuchten angeregt und emittiert durch das Nachleuchten aufgrund der endlichen Fluoreszenz-Lebensdauer auch noch Licht zu einem späteren Zeitpunkt, an dem das 1. Streifensystem bereits wieder abgeschaltet und nun das 2. Streifensystem aktiv ist (Fig. 1). Damit werden Lichtanteile vom 1. Kanal nun dem 2. Kanal zugeordnet und umgekehrt (Übersprechen). Dieser Umstand ist in der Fig. 2 im Frequenzbereich dargestellt. Es ist zu sehen, dass Kanal 1 sowohl den eigentlichen Peak zu Frequenz f_1 besitzt als auch – zu einem geringeren Anteil – den Signalpeak des 2. Kanals mit der Frequenz f_2 , und umgekehrt.

Als Messeffekt wird nun ausgenutzt, dass eine Veränderung der Fluoreszenz-Lebensdauer das Übersprechen verändert: Eine höhere Lebensdauer führt zu einem größeren Übersprechen. Zur Temperaturbestimmung wird das Übersprechen

quantifiziert, indem zunächst die Übersprechkoeffizienten a, b bestimmt werden. Dies geschieht, indem die Amplituden der vier auftretenden Signalpeaks ermittelt werden und die Quotienten von Haupt- und Übersprechpeak berechnet werden. So ist der Koeffizient a das Verhältnis der Peakhöhe von Übersprechpeak des Signals f_2 auf Kanal 1 bezogen auf die Peakhöhe von f_2 auf Kanal 2; entsprechend Koeffizient b . Mit den derart bestimmten Koeffizienten und einer zuvor bestimmten Kalibriervorschrift kann die Temperatur des Partikels bestimmt werden. Auf diese Weise kann für jedes Partikel ein Positionswert, ein Geschwindigkeitswert und ein Temperaturwert ermittelt werden.

Zur Verringerung der Unsicherheit der Temperaturmessung kann die Auswertesoftware um eine statistische Analyse ergänzt werden.

So kann für die Bestimmung nur eines mittleren Temperaturwertes der gesamten Strömung eine Mittelung durchgeführt werden, indem über eine gewünschte Anzahl N von ausgewerteten Burstsignalen der Partikel die bestimmte Temperatur gemittelt wird.

Ein Temperaturprofil kann bestimmt werden, indem zunächst für eine ausreichend große Anzahl N von Burstsignalen Position, Geschwindigkeit und Temperatur ausgewertet und abgespeichert werden. Diese Daten werden dann bestimmten Positionsintervallen („Slots“) zugeordnet, so dass jedes Intervall nur die Daten von einem bestimmten Positionsbereich enthält. Anschließend wird für jedes Intervall eine statistische Auswertung durchgeführt und die mittlere Geschwindigkeit und die mittlere Temperatur errechnet. Trägt man die so bestimmte mittlere Temperatur jedes Intervalls über seiner Position auf, so erhält man das Temperaturprofil.

Für das vorliegende strömende Fluid in dem Rohr und die darin enthaltenen Partikel ist eine orts aufgelöste Geschwindigkeit von (0...5) m/s gemessen und ermittelt worden. Weiterhin wurde eine Fluidtemperatur von 30 °C ermittelt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung der Fluidtemperatur, bei dem mindestens zwei Laserstrahlen, die mindestens Licht einer Wellenlänge aufweisen, das mindestens die Fluoreszenz von Partikeln oder einem Fluoreszenzstoff in einem strömenden Fluid anregt, und die amplitudenmoduliert sind und die im Zeitmultiplexbetrieb betrieben werden, durch ein strömendes Fluid mit Partikeln, die mindestens fluoreszierende Eigenschaften oder Fluoreszenz aufweisen oder einen Fluoreszenzstoff enthalten, und bei denen die Fluoreszenzlebensdauer temperaturabhängig ist, geleitet werden, und mit einem Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofil-Sensor an dem strömenden Fluid eine orts aufgelöste Geschwindigkeitsmessung durchgeführt wird, und gleichzeitig oder unmittelbar nachfolgend die Fluidtemperatur über das Nachleuchten der fluoreszierenden Partikel und/oder des Fluoreszenzstoffes ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die orts aufgelöste Geschwindigkeitsmessung nach einer Kalibrierung des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofil-Sensors in Abhängigkeit von dem Fluid und den Partikeln durchgeführt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem als fluoreszierende Partikel Partikel aus organischen Farbstoffen, Rhodaminen, mit Europium dotierten Farbstoffen, wie Europium (III) thenoyltrifluoroacetate (EuTTa), oder Yttrium-Aluminaten, Cadmiumwolframat (CdWO_4), Zinkoxid dotiert mit Zink (ZnO:Zn), Alexa-488 oder Partikel, die einen Fluoreszenzstoff aus organischen Farbstoffen, Rhodaminen, mit Europium dotierten Farbstoffen, wie Europium (III) thenoyltrifluoroacetate (EuTTa), oder Yttrium-Aluminaten, Cadmiumwolframat (CdWO_4), Zinkoxid dotiert mit Zink (ZnO:Zn) oder Alexa-488 enthalten oder damit beschichtet sind, eingesetzt werden.
4. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem gleichzeitig zur orts aufgelösten Geschwindigkeitsmessung mittels des Laser-Doppler-Geschwindigkeitsprofil-Sensors die Ermittlung der Fluidtemperatur durchgeführt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die mindestens zwei Laserstrahlen entweder von einem Laser ausgestrahlt und der Strahl mit einem Strahlteiler in zwei Laserstrahlen aufgeteilt werden, wobei dann jeder der Strahlen einen eigenen

Amplitudenmodulator enthält, oder der nur eine Laser wird mit einem elektrooptischen Modulator gekoppelt, der den einen Laserstrahl je nach Schaltzustand in einen von zwei Ausgängen lenkt, so dass abwechselnd je ein Laserstrahl abgestrahlt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem zur Erzeugung der mindestens zwei Laserstrahlen zwei oder mehr Laser eingesetzt werden, die Licht mit jeweils gleicher oder nahezu gleicher Wellenlänge erzeugen, wobei bei unterschiedlichen Wellenlängen die jeweiligen Laserstrahlen vorteilhafterweise alle die Fluoreszenz der Partikel oder des Fluoreszenzfarbstoffes anregen.

7. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der oder die Laser zur Anregung der fluoreszierenden Eigenschaften der Partikel mit einer Wellenlänge von 350 bis 800 nm betrieben werden.

8. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Amplitudenmodulation der die mindestens zwei Interferenzstreifensysteme erzeugenden Laserstrahlen durch direkte Modulation der Laser oder durch externe Modulatoren durchgeführt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Amplitudenmodulation der die mindestens zwei Interferenzstreifensysteme erzeugenden Laserstrahlen in Form einer Rechteckmodulation und einer Phasenverschiebung von 90° bis 240° , vorteilhafterweise von 180° , durchgeführt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem durch das Nachleuchten der fluoreszierenden Partikel oder des Fluoreszenzstoffes ein Übersprechen der amplitudenmodulierten mindestens zwei Laserstrahlen erzeugt wird, welches durch Übersprechkoeffizienten angegeben wird, und aus den Übersprechkoeffizienten, die unmittelbar abhängig sind von der Fluoreszenzlebensdauer, die wiederum eine Funktion der Temperatur $\tau=\tau(T)$ ist, die Temperatur des Fluoreszenzstoffes und damit die Temperatur des Partikels und des Fluides bestimmt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem die Übersprechkoeffizienten a und b von zwei Lasersignalen S_1 und S_2 bestimmt werden durch

$$\begin{pmatrix} S_1'(t) \\ S_2'(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1(t) + aS_2(t) \\ S_2(t) + bS_1(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a \\ b & 1 \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} 1 & a \\ b & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \end{pmatrix}$$

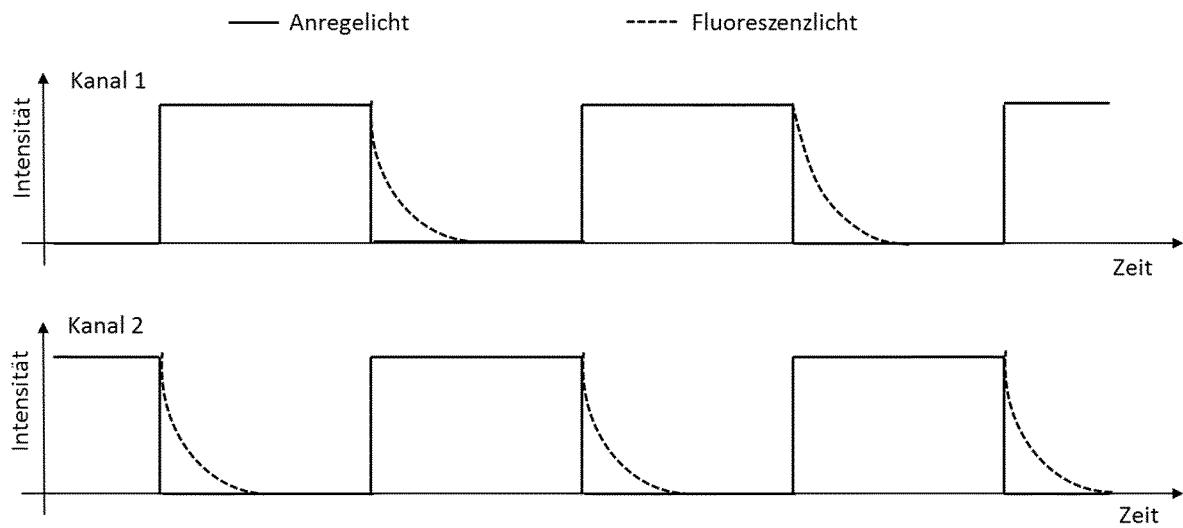


Fig. 1

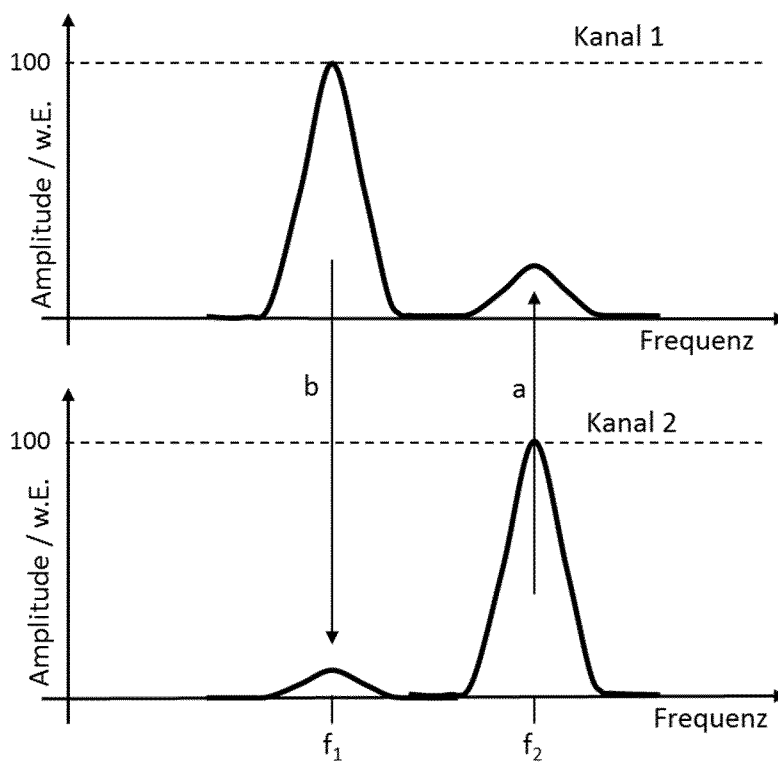


Fig. 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2020/053054

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**G01P 5/26**(2006.01)i; **G01S 17/58**(2006.01)i; **G01K 13/02**(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01P; G01S; G01K

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

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	F. LEMOINE ET AL. "Simultaneous temperature and 2D velocity measurements in a turbulent heated jet using combined laser-induced fluorescence and LDA" <i>EXPERIMENTS IN FLUIDS.</i> , DE, Vol. 26, No. 4, 05 March 1999 (1999-03-05), pages 315-323 DOI: 10.1007/s003480050294 ISSN: 0723-4864, XP055688545 2. Temperature dependence of the fluorescence emission & 3. Combined temperature and velocity measurements; page 316 - page 318; figures 1-2	1-11
A	Jörg König ET AL. "Laser Techniques to Fluid Mechanics Laser Doppler velocity profile sensor with time division multiplexing for microscale investigations" <i>15th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 05-08 July 2010</i> , 05 July 2010 (2010-07-05), pages 1-9, Retrieved from the Internet: http://lces.dem.ist.utl.pt/lxaser/lxaser2010/upload/1616_ztezuc_1.8.3.Full_1616.pdf [retrieved on 2020-04-22] XP055688269 2. The laser Doppler velocity profile sensor; page 2 - page 4; figures 1-3	1-11



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

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

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

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

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

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

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

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

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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

23 April 2020

Date of mailing of the international search report

08 May 2020

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Rosello Garcia, M

Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JÖRG KOENIG ET AL. "Velocity measurements inside the concentration boundary layer during copper-magneto-electrolysis using a novel laser Doppler profile sensor" <i>ELECTROCHIMICA ACTA, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL</i>, Vol. 56, No. 17, 09 April 2011 (2011-04-09), pages 6150-6156, [retrieved on 2011-04-27] DOI: 10.1016/J.ELECTACTA.2011.04.034 ISSN: 0013-4686, XP028096483 2. Measurement technique & 3. Experimental setup; page 6151 - page 6153; figures 1-5	1-11
A	JÖRG KOENIG. "Precise micro flow rate measurements by a laser Doppler velocity profile sensor with time division multiplexing" <i>MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, IOP, BRISTOL, GB</i>, Vol. 21, No. 7, 17 May 2010 (2010-05-17), page 74005 DOI: 10.1088/0957-0233/21/7/074005 ISSN: 0957-0233, XP020194396 2.2. Modulation technique and crosstalk investigations; page 4 - page 5; figures 5-6	1-11
A	JÜRGEN CZARSKE ET AL. "Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution; Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor" <i>MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, IOP, BRISTOL, GB</i>, Vol. 13, No. 12, 01 December 2002 (2002-12-01), pages 1979-1989 DOI: 10.1088/0957-0233/13/12/324 ISSN: 0957-0233, XP020063674 cited in the application 2. Laser Doppler profile sensor; page 1981 - page 1983; figures 2-5	1-11

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. G01P5/26 G01S17/58 G01K13/02 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) G01P G01S G01K		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, INSPEC		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	F. LEMOINE ET AL: "Simultaneous temperature and 2D velocity measurements in a turbulent heated jet using combined laser-induced fluorescence and LDA", EXPERIMENTS IN FLUIDS., Bd. 26, Nr. 4, 5. März 1999 (1999-03-05), Seiten 315-323, XP055688545, DE ISSN: 0723-4864, DOI: 10.1007/s003480050294 2. Temperature dependence of the fluorescence emission & 3. Combined temperature and velocity measurements; Seite 316 - Seite 318; Abbildungen 1-2 ----- -/-	1-11
☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☐ Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche		Absenddatum des internationalen Recherchenberichts
23. April 2020		08/05/2020
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Rosello Garcia, M

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	Jörg König ET AL: "Laser Techniques to Fluid Mechanics Laser Doppler velocity profile sensor with time division multiplexing for microscale investigations", 15th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 05-08 July 2010, 5. Juli 2010 (2010-07-05), Seiten 1-9, XP055688269, Gefunden im Internet: URL:http://ltces.dem.ist.utl.pt/lxaser/lxaser2010/upload/1616_ztezuc_1.8.3.Full_16.pdf [gefunden am 2020-04-22] 2. The laser Doppler velocity profile sensor; Seite 2 - Seite 4; Abbildungen 1-3 -----	1-11
A	JÖRG KOENIG ET AL: "Velocity measurements inside the concentration boundary layer during copper-magneto-electrolysis using a novel laser Doppler profile sensor", ELECTROCHIMICA ACTA, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, Bd. 56, Nr. 17, 9. April 2011 (2011-04-09), Seiten 6150-6156, XP028096483, ISSN: 0013-4686, DOI: 10.1016/J.ELECTACTA.2011.04.034 [gefunden am 2011-04-27] 2. Measurement technique & 3. Experimental setup; Seite 6151 - Seite 6153; Abbildungen 1-5 -----	1-11
A	JÖRG KOENIG: "Precise micro flow rate measurements by a laser Doppler velocity profile sensor with time division multiplexing", MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, IOP, BRISTOL, GB, Bd. 21, Nr. 7, 17. Mai 2010 (2010-05-17), Seite 74005, XP020194396, ISSN: 0957-0233, DOI: 10.1088/0957-0233/21/7/074005 2.2. Modulation technique and crosstalk investigations; Seite 4 - Seite 5; Abbildungen 5-6 ----- -/--	1-11

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	JÜRGEN CZARSKIE ET AL: "Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution; Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor", MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, IOP, BRISTOL, GB, Bd. 13, Nr. 12, 1. Dezember 2002 (2002-12-01), Seiten 1979-1989, XP020063674, ISSN: 0957-0233, DOI: 10.1088/0957-0233/13/12/324 in der Anmeldung erwähnt 2. Laser Doppler profile sensor; Seite 1981 - Seite 1983; Abbildungen 2-5 -----	1-11