



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2008 019 756 A1** 2009.11.05

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2008 019 756.4**

(22) Anmeldetag: **18.04.2008**

(43) Offenlegungstag: **05.11.2009**

(51) Int Cl.⁸: **G01P 5/20** (2006.01)

G01L 11/02 (2006.01)

G01K 13/02 (2006.01)

G01N 21/62 (2006.01)

(71) Anmelder:
LaVision GmbH, 37081 Göttingen, DE

(72) Erfinder:
Wieneke, Bernhard, 37085 Göttingen, DE

(74) Vertreter:
Fiedler, Ostermann & Schneider, 37073 Göttingen

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:
WO 01/06 216 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur simultanen Messung von Geschwindigkeits- und Zustandsparameterfeldern in einer Fluidströmung**

(57) Zusammenfassung: Verfahren zur simultanen Messung von Feldern einer Geschwindigkeit und eines Zustandsparameters in einem Messvolumen einer Fluidströmung (22).

- Beimpfen der Fluidströmung (22) mit lumineszierenden Partikeln (12), wobei die Partikel (12) jeweils mit wenigstens zwei Luminophoren belegt sind, deren spektrale Emissionseigenschaften (34, 36) in unterschiedlicher Weise von dem Zustandsparameter abhängen,

- Abbilden der Partikel (12) auf einer Mehrzahl von ersten Bildern (16a, b; t1), die gleichzeitig mittels einer Mehrzahl von Bilddetektoren (14a, b) mit unterschiedlichen spektralen Detektionseigenschaften (26a, b) aufgenommen werden,

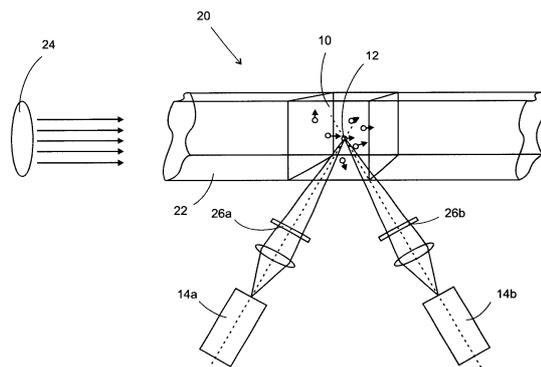
- Abbilden der Partikel (12) auf einer Mehrzahl von zweiten Bildern (16a, b; t2), die mittels der Bilddetektoren (14a, b) zueinander gleichzeitig und zu den ersten Bildern (16a, b; t1) zeitlich versetzt aufgenommen werden,

- Berechnen eines Geschwindigkeitsfeldes (40) auf Basis von räumlichen Unterschieden zwischen den ersten und zweiten Bildern (16a, b; t1, t2),

- Berechnen eines Zustandsparameterfeldes (50) auf Basis von spektralen Unterschieden zwischen gleichzeitig mit unterschiedlichen Bilddetektoren (14a, b) aufgenommenen Bildern (16a, b),

wobei die Bilddetektoren (14a, b) räumlich verteilt angeordnet sind und das Messvolumen (10) unter unterschiedlichen Blickwinkeln abbilden und dass durch Triangulation Partikel (12), die auf mehreren gleichzeitig und unter verschiedenen Blickwinkeln aufgenommenen Bildern (16a, b)

...



Beschreibung

Gebiet der Erfindung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur simultanen Messung von Feldern einer Geschwindigkeit und eines Zustandsparameters in einem Messvolumen einer Fluidströmung, umfassend die folgenden Schritte:

- Beimpfen der Fluidströmung mit lumineszierenden Partikeln, wobei die Partikel jeweils mit wenigstens zwei Luminophoren belegt sind, deren spektrale Emissionseigenschaften in unterschiedlicher Weise von dem Zustandsparameter abhängen,
- Abbilden der Partikel auf einer Mehrzahl von ersten Bildern, die gleichzeitig mittels einer Mehrzahl von Bilddetektoren mit unterschiedlichen spektralen Detektionseigenschaften aufgenommen werden,
- Abbilden der Partikel auf einer Mehrzahl von zweiten Bildern, die mittels der Bilddetektoren zu einander gleichzeitig und zu den ersten Bildern zeitlich versetzt aufgenommen werden,
- Berechnen eines Geschwindigkeitsfeldes auf Basis von räumlichen Unterschieden zwischen den ersten und zweiten Bildern,
- Berechnen eines Zustandsparameterfeldes auf Basis von spektralen Unterschieden zwischen gleichzeitig mittels unterschiedlicher Bilddetektoren aufgenommenen Bildern.

Stand der Technik

[0002] Ein derartiges Verfahren ist bekannt aus JP 2004/163180 A. Diese Druckschrift offenbart eine Erweiterung des allgemein als Particle-Imaging-Velocimetry (PIV) bekannten Verfahrens zur Messung von Geschwindigkeitsfeldern in Fluidströmungen.

[0003] Bei der PIV wird allgemein eine zu vermessende Strömung mit einer großen Dichte an optisch detektierbaren Partikeln beimpft. Zeitlich versetzt zueinander werden mittels eines Bilddetektors zwei Bilder einer beleuchteten Schicht der Fluidströmung aufgenommen. Die Bilder repräsentieren die flächige Projektion der räumlichen Konstellation der Partikel in der beleuchteten Strömungsschicht zu zwei aufeinander folgenden Zeitpunkten. Bekannt sind Varianten, die unterschiedlichen Konstellationen auf zwei getrennten Bildern oder auf einer Überlagerung der beiden Bilder abzubilden. Durch bekannte Algorithmen der Kreuzkorrelation (im Fall separater Bilder) oder der Autokorrelation (im Fall der Überlagerung beider Bilder) lässt sich mit Subpixel-Auflösung ein Verschiebungsfeld der Partikel berechnen, aus welchem unter Hinzunahme der Information über den zeitlichen Abstand der Aufnahmen ein Geschwindigkeitsfeld berechnet werden kann.

[0004] Das in der oben genannten Druckschrift offenbarte Verfahren erweitert die PIV-Messung um eine simultane Messung der Verteilung der Temperatur sowie des Drucks in der Strömung.

[0005] Hierzu sind die Partikel mit unterschiedlichen Farbstoffen, nämlich einer so genannten drucksensitiven Farbe und einer so genannten temperatursensitiven Farbe belegt. Die drucksensitive Farbe ist so auf den Partikeln aufgebracht, dass sie mit dem freien Sauerstoff des Fluids Wechselwirken kann. Dabei kommt es zur Fluoreszenzlöschung (Quenching), deren Ausmaß abhängig ist von der Sauerstoffkonzentration. Die temperatursensitive Farbe ist so auf den Partikeln aufgebracht, dass sie keine chemische Wechselwirkung mit dem Fluid eingehen kann. Die spektralen Eigenschaften ihrer Emission sind daher im Wesentlichen nur temperaturabhängig. Die spektralen Eigenschaften der Emission der drucksensitiven Farbe sind zusätzlich zur oben erläuterten Druckabhängigkeit ebenfalls temperaturabhängig.

[0006] Um die Temperaturverteilung bzw. die Druckverteilung in der Strömung zu messen, wird das von der beleuchteten Strömungsschicht zu dem Bilddetektor fallende Licht hinter einer Abbildungsoptik geteilt und auf mehrere Bilddetektoren verteilt, die jeweils mit unterschiedlichen Detektionsfiltern ausgestattet sind. Auf diese Weise entstehen simultan mehrere Bilder der beleuchteten Strömungsschicht unter demselben Blickwinkel, jedoch unterschiedliche Spektralbereiche des Emissionsspektrums repräsentierend. Bei korrekter Justage der Apparatur entstehen somit mehrere geometrisch identische Bilder mit – abhängig vom jeweils repräsentierten Spektralbereich – unterschiedlichen Intensitäten, d. h. Pixelwerten. Ist die Abhängigkeit der spektralen Emissionseigenschaften der temperatursensitiven Farbe von der Temperatur und der drucksensitiven Farbe von Temperatur und Druck bekannt und sind weiter die Detektionsfilter der Bilddetektoren geeignet eingerichtet (z. B. als Bandpassfilter um die jeweiligen Emissionsmaxima der verwendeten Farbstoffe positioniert), lässt sich durch Quotientenbildung der Pixelwerte der in den Bildern einander jeweils entsprechenden Pixel die Temperatur und der Druck in jedem jeweils von einem Pixel repräsentierten Teilvolumen der beleuchteten Fluidschicht bestimmen. Es ergeben sich somit zusätzlich zu dem mittels PIV erzeugten Geschwindigkeitsfeld ein Temperaturfeld und ein Druckfeld der untersuchten Strömung.

[0007] Nachteilig bei dem bekannten Verfahren ist seine Beschränkung auf die Messung zweidimensionaler Geschwindigkeits- bzw. Zustandsparameterfelder, wobei in den Geschwindigkeitsfeldern nur zwei Geschwindigkeitskomponenten (in der Beleuchtungsebene) erfasst werden.

[0008] Die herkömmliche PIV ist als sog. Stereo-PIV

auch für die Messung zweidimensionaler Felder mit allen drei Geschwindigkeitskomponenten bekannt. Hierzu wird die beleuchtete Strömungsschicht mit mehreren, räumlich verteilten Bilddetektoren unter unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen. Diese stereoskopischen Aufnahmen werden zunächst wie einfache zweidimensionale Aufnahmen behandelt. Es wird jeweils ein Geschwindigkeitsfeld mit zwei Geschwindigkeitskomponenten ermittelt. Anschließend werden die ermittelten Geschwindigkeitsfelder zur Berechnung der dritten Geschwindigkeitskomponente durch bekannte stereoskopische Rekonstruktion miteinander kombiniert.

[0009] Nachteilig bei diesem Verfahren ist, dass es ebenfalls nicht für die Erfassung dreidimensionaler Felder geeignet ist.

[0010] Ein bekanntes, auch für den dreidimensionalen Fall anwendbares Verfahren zur Geschwindigkeitsfeldmessung ist unter der Bezeichnung particle-tracking-velocimetry (PTV) bekannt. Bei der PTV wird die Fluidströmung mit einer wesentlich geringeren Dichte an detektierbaren Partikeln beimpft, als dies bei der PIV der Fall ist. Die Aufnahme der Teilchen im Messvolumen erfolgt im dreidimensionalen Fall mittels mehrerer räumlich verteilter Bilddetektoren, die das Messvolumen jeweils unter einem anderen Blickwinkel erfassen. Dies erlaubt eine individuelle Identifizierung und räumliche Positionsbestimmung der abgebildeten Partikel im Messvolumen, insbesondere mittels Triangulation. Durch zwei oder mehr solcher Gruppen von Aufnahmen, die zeitlich hintereinander erfolgen, kann das dreidimensionale Feld aller drei Geschwindigkeitskomponenten ermittelt werden.

[0011] Nachteilig bei der dreidimensionalen PTV ist, dass sie nur Geschwindigkeitsinformationen, nicht aber Informationen über die Verteilung interessierender Zustandsparameter, wie z. B. Druck und/oder Temperatur liefern kann.

[0012] Wollte man das eingangs erläuterte, simultane Messverfahren für Geschwindigkeits- und Zustandsparameterfelder durch Kombination mit dem zuletzt geschilderten dreidimensionalen PTV-Verfahren auf den dreidimensionalen Fall erweitern, würde dies eine Vervielfachung der Bilddetektoren zur Erzielung der erforderlichen spektralen Auflösung an jedem Detektorort bedeuten. Insbesondere wäre an jedem Detektorort eine Batterie von pixelgenau zueinander justierten Einzeldetektoren mit gemeinsamem optischem Eingang und unterschiedlichen spektralen Detektionseigenschaften erforderlich. Dies würde zu einem erheblichen Aufwand an Kosten und Justierarbeit führen. Ein derartiges Verfahren wäre somit teuer und wenig robust.

[0013] Zur Messung eines Temperaturfeldes in ei-

ner Fluidströmung ist das sog. LTC-(liquid crystal temperature) Verfahren bekannt, bei dem die Strömung mit spezielle Flüssigkristalle (liquid crystals) enthaltenden Teilchen beimpft wird. Das Reflexionsspektrum der Flüssigkristalle ist temperaturabhängig. Beleuchtung des Messvolumens mit Weißlicht und Detektion mit einer Farbkamera führt zu einer farbcodierten Darstellung des Temperaturfeldes. Das Verfahren ist allerdings recht ungenau und die zwingend erforderliche Weißlichtbeleuchtung muss aus mehreren Gründen, z. B. Dispersion, fehlende Reproduzierbarkeit für Weißlichtquellen etc., als nachteilig angesehen werden.

Aufgabenstellung

[0014] Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, das gattungsgemäße Verfahren bei reduziertem Zusatzaufwand auf die Messung dreidimensionaler Felder zu erweitern.

Darlegung der Erfindung

[0015] Diese Aufgabe wird in Verbindung mit den Merkmalen des Oberbegriffs von Anspruch 1 dadurch gelöst, dass die Bilddetektoren räumlich verteilt angeordnet sind und ein gemeinsames Strömungsvolumen unter unterschiedlichen Blickwinkeln abbilden und dass durch Triangulation Partikel, die auf mehreren gleichzeitig und unter verschiedenen Blickwinkeln aufgenommenen Bildern abgebildet sind, individuell identifiziert und ihre Positionen im Raum ermittelt werden.

[0016] Die Erfindung geht nicht den naheliegenden, oben erläuterten Weg, zur Erweiterung des bekannten Verfahrens auf den dreidimensionalen Fall einfach zusätzliche Detektorstationen unter neuen Beobachtungswinkeln zu installieren, die jeweils über mehrere Einzeldetektoren unterschiedlicher spektraler Detektionseigenschaften verfügt. Vielmehr werden die vorhandenen Bilddetektoren unterschiedlicher spektraler Detektionseigenschaften räumlich verteilt angeordnet, sodass sie sich sowohl in ihren spektralen Detektionseigenschaften als auch in ihrem Beobachtungswinkel unterscheiden. Simultan aufgenommene Bilder repräsentieren somit sowohl unterschiedliche Spektralbereiche des Partikel-Emissionsspektrums als auch unterschiedliche Beobachtungswinkel, unter denen die Partikelkonstellation aufgenommen wurde. Dies erscheint zunächst erstaunlich, da die gattungsbildende Druckschrift die Notwendigkeit zweier geometrisch identischer Bilder zur Durchführung einer ratiometrischen Berechnung lehrt.

[0017] Die vorliegende Erfindung vollzieht jedoch zusätzlich einen Übergang von der PIV zur PTV, die aufgrund der individuellen Identifizierung der abgebildeten Partikel auch eine individuelle Zuordnung von

unter unterschiedlichen Beobachtungswinkeln aufgenommenen Partikeln erlaubt. Es ist daher vorgesehen, dass Partikel, die sich auf mehreren gleichzeitig und unter verschiedenen Blickwinkeln aufgenommenen Bildern abgebildet sind, individuell identifiziert werden. Dies erfolgt mittels Triangulation, wobei gleichzeitig mit der individuellen Identifizierung der Partikel ihre Positionen bestimmt werden. Die so identifizierten und positionsbestimmten Partikel werden auf den einzelnen Bildern einander zugeordnet. Damit können Pixelwerte, die in den unterschiedlichen Bildern Intensitätsanteile desselben Partikels repräsentieren, zur Durchführung einer ratiometrischen Berechnung zur Ermittlung eines interessierenden Zustandsparameters verwendet werden.

[0018] Im Ergebnis stellt das erfindungsgemäße Verfahren somit ein im Hinblick auf Kosten, Bedienbarkeit, Datenmenge und Robustheit besonders vorteilhaftes, dreidimensionales, ratiometrisches PTV-Verfahren dar.

[0019] Die Berechnung des Zustandsparameterfeldes erfolgt auf Basis einer Quotientenbildung von Signalintensitäten in wenigstens zwei der gleichzeitig und unter unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommenen Bilder, die unter unterschiedlichen spektralen Detektionsbedingungen aufgenommen wurden, sowie unter Berücksichtigung der ermittelten räumlichen Partikelpositionen.

[0020] Die Quotientenbildung erfolgt dabei vorzugsweise einzeln für eine Mehrzahl identifizierter Partikel, wobei bevorzugt jeder Quotientenbildung ein die Lumineszenzintensität des jeweiligen Partikels repräsentierender Pixelwert jedes der berücksichtigten Bilder zugrundegelegt wird. Man beachte hier, dass der Begriff des Pixelwertes weit zu verstehen ist und auch einen Mittelwert oder Summationswert mehrerer Einzel-Pixelwerte umfassen kann.

[0021] Grundsätzlich ist jeder mittels ratiometrischer Messungen erfassbare Zustandsparameter einer Fluidströmung auf diese Weise messbar. Insbesondere wird bevorzugt, dass der Zustandsparameter ein Druck, eine Konzentration einer chemischen Substanz, ein pH-Wert oder eine Temperatur ist. Je nach Komplexität der Farbstoffkombination und/oder der Detektorkonstellation können auch mehrere dieser und/oder andere Zustandsparameter gemessen werden. Ein wesentlicher Vorteil der Erfindung ist es dabei, dass mit jedem zusätzlichen Detektor eine größere räumliche Genauigkeit der Messung und gleichzeitig ein zusätzlicher spektraler Freiheitsgrad gewonnen werden kann.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

[0022] Weitere Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgen-

den speziellen Beschreibung und den Zeichnungen.

[0023] Es zeigen:

[0024] [Fig. 1](#): eine schematische Darstellung zur Illustration des bekannten Triangulationsverfahrens;

[0025] [Fig. 2](#): eine schematische Darstellung eines Aufbaus zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens;

[0026] [Fig. 3](#): eine schematische Darstellung beispielhafter Anregungs- und Emissions- und Detektionsspektren;

[0027] [Fig. 4](#) eine schematische Darstellung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen

[0028] [Fig. 1](#) zeigt eine schematische Darstellung des an sich bekannten Triangulationsverfahrens, wie es z. B. im Rahmen von dreidimensionalen PTV-Messungen einsetzbar ist. In einem geeignet beleuchteten Messvolumen **10** bewegen sich Partikel **12** mit der Strömung eines das Messvolumen durchströmenden Fluids. Mittels einer Mehrzahl von in [Fig. 1](#) nur als Linsen angedeuteten Bilddetektoren **14a**, **14b**, **14c** und **14d** werden Bilder **16a**, **16b**, **16c** und **16d** des Messvolumens unter unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen. Jedes Bild **16a**, **16b**, **16c**, **16d** stellt somit eine zweidimensionale Projektion des Messvolumens dar. Die jeweiligen Konstellationen der Partikel **12** auf den Bildern **16a**, **16b**, **16c** und **16d** unterscheiden sich entsprechend. Insbesondere unterscheiden sich die Winkel, die eine Sichtlinie **18a**, **18b**, **18c** bzw. **18d** zwischen dem Detektor **14a**, **14b**, **14c** bzw. **14d** und einem ausgewählten Partikel **12x** zu einer beliebigen Referenzlinie, z. B. der Hauptströmungsrichtung, einnimmt. Diese Winkelunterschiede manifestieren sich in unterschiedlichen Abbildungsarten des ausgewählten Partikels **12x** auf den Bildern **16a**, **16b**, **16c** und **16d**. Kenntnis der (relativen) Ausrichtung der Detektoren **14a**, **14b**, **14c** und **14d** erlaubt somit eine individuelle Identifizierung der Partikel und die Bestimmung ihrer räumlichen Position im Messvolumen.

[0029] Zur Durchführung eines solchen Triangulationsverfahrens sind wenigstens zwei Bilddetektoren **14a**, **14b** erforderlich. Eine größere Anzahl von Detektoren – in [Fig. 1](#) als Detektoren **14c** und **14d** gestrichelt dargestellt – verringert die Unsicherheit des Verfahrens und erlaubt die Verwendung einer größeren Partikeldichte im Messvolumen.

[0030] [Fig. 2](#) zeigt einen zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens geeigneten Aufbau **20**. Die Vorrichtung **20** umfasst eine Strömungsanordnung **22**, die beispielsweise ein Strömungskanal oder

Teil einer freien Strömung sein kann. Ein Messvolumen **10** ergibt sich aus den überlappenden Blickfeldern zweier räumlich versetzt zueinander angeordneter Detektoren **14a**, **14b**. Das Messvolumen **10** wird von einer Lichtquelle **24** beleuchtet. Die Lichtquelle **24** kann beispielsweise ein Laser mit einer geeigneten Strahlformungsoptik sein. Die Strömung **22** ist mit Partikeln **12** beimpft, die sich mit der Strömung mitbewegen und insbesondere die lokalen Strömungsgeschwindigkeiten anzeigen, wie durch die Pfeile an den Partikeln **12** symbolisiert. Die Partikel **12** können z. B. Kunststoff- oder Glaspartikel sein und werden bevorzugt in Abstimmung auf die Dichte des Fluids ausgewählt. Bewährt haben sich z. B. in Wasser Polystyren- oder Polyethylenpartikel, von denen insbesondere letztere eine Dichte vergleichbar der Dichte von Wasser aufweisen. Auch hohle Partikel, deren Inneres mit einer Flüssigkeit oder einem Gas zur Dichteanpassung gefüllt ist, können verwendet werden.

[0031] Die Partikel **12** sind mit mindestens zwei unterschiedlichen Lumineszenzfarbstoffen belegt. Die Belegung kann beispielsweise durch Auftragen auf die Oberfläche, Einarbeiten von Luminophoren in die Matrix des Partikelkörpers oder Befüllen eines Hohlraums der Partikel mit dem Farbstoff erfolgen. Auch Kombinationen dieser Techniken zur Belegung der Partikel mit zwei unterschiedlichen Farbstoffen ist möglich. Beispielsweise können die Fluoreszenzfarbstoffe Rhodamin und Fluorescein oder Nilblau und Rhodamin **6G** verwendet werden. Je nach Anwendungsfall sind auch andere Farbstoffe oder Kombinationen von mehr als zwei Farbstoffen möglich. Die Farbstoffpaarungen werden in Abhängigkeit von dem oder den zu bestimmenden Zustandsparametern der Fluidströmung **12** ausgewählt. Wesentlich dabei ist, dass die Farbstoffe voneinander trennbare Emissionsspektren aufweisen, deren Spektraleigenschaften in unterschiedlicher Weise von dem oder den zu bestimmenden Zustandsparametern abhängen. Beispielsweise kann ein Druck- oder ph-sensitiver Farbstoff in Kombination mit einem nicht druck- bzw. ph-sensitiven Farbstoff verwendet werden. Auch ist es möglich, die Partikel so mit den Farbstoffen zu belegen, dass ein Indikatorfarbstoff dem zu messenden Zustandsparameter ausgesetzt ist, während ein anderer, als Referenzfarbstoff dienender Farbstoff den interessierenden Zustandsparameter nicht "spürt". Dies kann beispielsweise bei Hohlpartikeln dadurch erfolgen, dass der Indikatorfarbstoff außen auf den Partikel aufgetragen ist und so mit dem Fluid in Kontakt kommt, während der Referenzfarbstoff in das Innere des Hohlpartikels eingefüllt ist und so von dem Fluid abgeschirmt ist.

[0032] Die Lichtquelle **24** ist so zu wählen, dass beide Farbstoffe zu Lumineszenz angeregt werden. Die Anregungswellenlängen der verwendeten Farbstoffe sind typischerweise bekannt. Vorzugsweise wird eine

Anregungswellenlänge gewählt, die gut von jedem der Emissionsspektren der verwendeten Farbstoffe trennbar ist. In [Fig. 2](#) ist schematisch ein Spektrum **30** dargestellt, das ein Anregungsspektrum **32** und resultierende Emissionsspektren **32** und **34**, die jeweils einem der Farbstoffe zuzuordnen sind, dargestellt. Bei geeigneter Wahl der Farbstoffe sind die Abhängigkeiten der Einzelspektren **34** und **36** von dem zu messenden Zustandsparameter bekannt, sodass eine Quotientenbildung oder allgemeiner eine ratiometrische Messung der Einzelspektren **34**, **36** eine Aussage über den Wert des Zustandsparameters am Ort des jeweiligen Partikels **18** zulässt. Hierzu sind den Bilddetektoren **14a**, **14b** jeweils geeignete Detektionsfilter **26a**, **26b** vorgeschaltet, die bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel als Bandpassfilter um die Maxima der Emissionsspektren **34**, **36** der Farbstoffe eingestellt sind. Der Vorteil der Quotientenbildung im Vergleich zu der Aufnahme nur eines von dem zu messenden Zustandsparameter abhängigen Spektrums liegt in der Tatsache, dass der Quotient unabhängig von der absoluten Beleuchtungsstärke und anderen optischen Faktoren ist, da beide Spektren **34**, **36** gleichermaßen verstärkt oder abgeschwächt werden.

[0033] Das Messvolumen **10** wird mittels der Bilddetektoren **14a** und **14b** beobachtet. [Fig. 2](#) zeigt der Übersichtlichkeit halber den Fall, dass nur zwei Bilddetektoren Einsatz finden. Es kann jedoch grundsätzlich eine beliebige, größere Anzahl von Detektoren verwendet werden. Wie erwähnt, erfolgt die Aufnahme durch jeweils einen der Detektionsfilter **26a**, **26b**, um die Einzelspektren **34**, **36** der einzelnen Farbstoffe gesondert zu beobachten.

[0034] [Fig. 4](#) zeigt schematisch die Zusammenhänge des erfindungsgemäßen Verfahrens. Die Detektoren **14a**, **14b** betrachten das Messvolumen **10** unter unterschiedlichen Beobachtungswinkeln, sodass sich auf den erzeugten, zweidimensionalen Bildern **16a**, **b** unterschiedliche Konstellationen der abgebildeten Partikel **12** ergeben. Zusätzlich unterscheiden sich die Bilder **16a** und **16b** aufgrund der unterschiedlichen Detektionsfilter auch spektral. Dies ist in [Fig. 4](#) durch die volle bzw. hohle Darstellung der Partikel **12** angedeutet.

[0035] Zu unterschiedlichen Zeitpunkten t_1 und t_2 wird jeweils ein Bilderpaar **16a**, **16b** aufgenommen. Aus jedem Bilderpaar **16a**, **16b** wird mittels des oben erläuterten Triangulationsverfahrens eine dreidimensionale Rekonstruktion **10'** des Messvolumens, d. h. der Positionen der darin enthaltenen Partikel **12** berechnet. Dabei ergibt sich auch eine individuelle Identifizierung der Partikel **12**. Die Positionen desselben Partikels in zwei die unterschiedlichen Zeitpunkte t_1 und t_2 repräsentierenden, dreidimensionalen Rekonstruktionen **10'** des Messvolumens können somit einander zugeordnet werden. Vergleich dieser Rekonst-

raktionen, z. B. durch Bildung von Differenzquotienten der Positionsdifferenz der einzelnen Partikel durch die zeitliche Differenz t_2-t_1 , ergibt ein dreidimensionales Geschwindigkeitsfeld **40**.

[0036] Die im Rahmen der Triangulation gewonnene Information zu individueller Identifikation der Partikel **12** erlaubt es, die spektral unterschiedlichen Intensitätssignale in den zugrunde liegenden Bildern **16a** und **16b** den einzelnen, identifizierten Partikeln **12** zuzuordnen. Somit kann für jedes Partikel **12** eine ratiometrische Bestimmung, in **Fig. 4** als "Q" dargestellt, des am Ort dieses Partikels **12** herrschenden Zustandsparameters erfolgen. Kombination mit der ebenfalls aus der Triangulation gewonnenen Positionsinformation jedes Partikels **12** erlaubt die Erstellung eines dreidimensionalen Zustandsparameterfeldes **50**.

[0037] Bei der Darstellung von **Fig. 4** wird das Zustandsparameterfeld **50** auf Basis der zum Zeitpunkt t_2 aufgenommenen Bilder **16a**, **16b** berechnet. Selbstverständlich kann es jedoch alternativ oder zusätzlich aus den zum Zeitpunkt t_1 aufgenommenen Bildern ermittelt werden. Im Fall, der Ermittlung je eines dreidimensionalen Zustandsparameterfeldes **50** aus den zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 aufgenommenen Bildern **16a**, **16b** erlaubt ein Vergleich dieser Zustandsparameterfelder z. B. eine Messung der zeitlichen Entwicklung des Zustandsparameters oder, bei postulierter Stationarität des Feldes, eine Abschätzung des Messfehlers.

[0038] Natürlich stellen die in der speziellen Beschreibung diskutierten und in den Figuren gezeigten Ausführungsformen nur illustrative Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung dar. Dem Fachmann ist im Lichte der hiesigen Offenbarung ein breites Spektrum an Variationsmöglichkeiten anhand gegeben. Insbesondere kann die Anzahl der Detektoren die Anzahl der Zeitpunkte, zu denen simultane Bilder der Detektoren unter unterschiedlichen Beobachtungswinkeln aufgenommen werden und die verwendeten Algorithmen dem einzelnen Spezialfall angepasst werden. Auch die Wahl und Paarungen der Farbstoffe sind vom Fachmann im Einzelfall in Abhängigkeit von der speziellen experimentellen Interessenlage zu wählen.

24	Lichtquelle
26a, b	Detektionsfilter
30	Spektrum
32	Anregungsspektrum
34	erstes Emissionsspektrum
36	zweites Emissionsspektrum
40	Geschwindigkeitsfeld
50	Zustandsparameterfeld

Bezugszeichenliste

10	Messvolumen
10	Rekonstruktion von 10
12	Partikel
12x	ausgewähltes Partikel
14a-d	Detektor
16a-d	Bild
18a-d	Sichtlinie
20	Messvorrichtung
22	Strömung

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

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

Zitierte Patentliteratur

- JP 2004/163180 A [[0002](#)]

Patentansprüche

1. Verfahren zur simultanen Messung von Feldern einer Geschwindigkeit und eines Zustandsparameters in einem Messvolumen einer Fluidströmung (22), umfassend die folgenden Schritte:

- Beimpfen der Fluidströmung (22) mit lumineszierenden Partikeln (12), wobei die Partikel (12) jeweils mit wenigstens zwei Luminophoren belegt sind, deren spektrale Emissionseigenschaften (34, 36) in unterschiedlicher Weise von dem Zustandsparameter abhängen,
- Abbilden der Partikel (12) auf einer Mehrzahl von ersten Bildern (16a, b; t1), die gleichzeitig mittels einer Mehrzahl von Bilddetektoren (14a, b) mit unterschiedlichen spektralen Detektionseigenschaften (26a, b) aufgenommen werden,
- Abbilden der Partikel (12) auf einer Mehrzahl von zweiten Bildern (16a, b; t2), die mittels der Bilddetektoren (14a, b) zueinander gleichzeitig und zu den ersten Bildern (16a, b; t1) zeitlich versetzt aufgenommen werden,
- Berechnen eines Geschwindigkeitsfeldes (40) auf Basis von räumlichen Unterschieden zwischen den ersten und zweiten Bildern (16a, b; t1, t2),
- Berechnen eines Zustandsparameterfeldes (50) auf Basis von spektralen Unterschieden zwischen gleichzeitig mittels unterschiedlicher Bilddetektoren (14a, b) aufgenommenen Bildern (16a, b),

dadurch gekennzeichnet,

dass die Bilddetektoren (14a, b) räumlich verteilt angeordnet sind und das Messvolumen (10) unter unterschiedlichen Blickwinkeln abbilden und dass durch Triangulation Partikel (12), die auf mehreren gleichzeitig und unter verschiedenen Blickwinkeln aufgenommenen Bildern (16a, b) abgebildet sind, individuell identifiziert und ihre Positionen im Raum ermittelt werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Berechnung des Zustandsparameterfeldes (50) auf Basis einer Quotientenbildung von Signalintensitäten in wenigstens zwei der gleichzeitig und unter unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommenen Bilder (16a, b), die unter unterschiedlichen spektralen Detektionsbedingungen (26a, b) aufgenommen wurden, sowie unter Berücksichtigung der ermittelten räumlichen Partikelpositionen erfolgt.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Quotientenbildung jeweils einzeln für eine Mehrzahl identifizierter Partikel (12) erfolgt.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass jeder Quotientenbildung ein die Lumineszenzintensität des jeweiligen Partikels (12) repräsentierender Pixelwert jedes der berücksichtigten Bilder (16a, b) zugrunde gelegt wird.

5. Verfahren nach einem der vorangehenden An-

sprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Zustandsparameter ein Druck, eine Konzentration einer chemischen Substanz, ein pH-Wert oder eine Temperatur ist.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

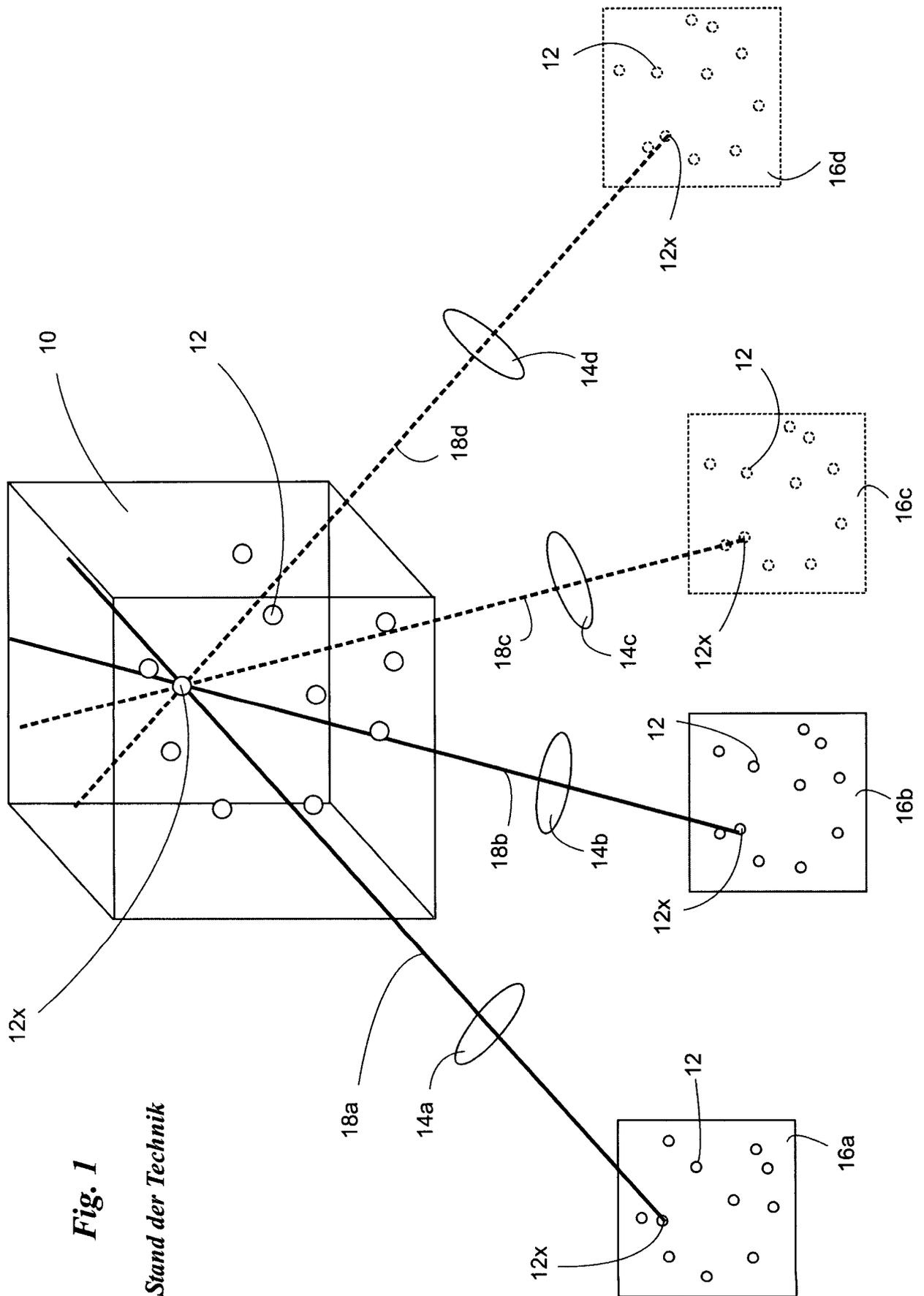


Fig. 1

Stand der Technik

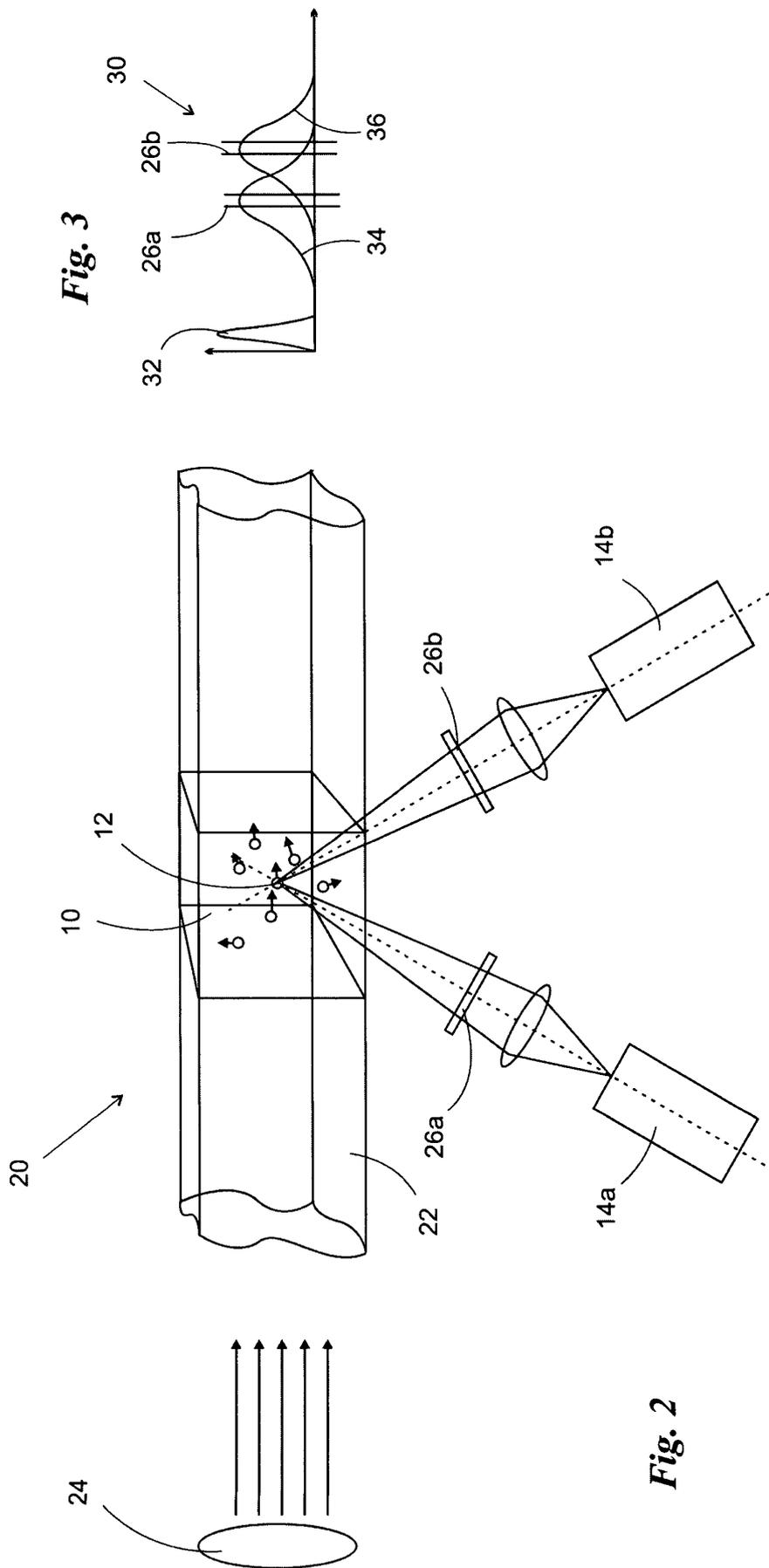


Fig. 2

Fig. 3

