

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50395/2015 (51) Int. Cl.: **G01N 15/06** (2006.01)  
 (22) Anmeldetag: 12.05.2015 **G01N 15/02** (2006.01)  
 (43) Veröffentlicht am: 15.09.2016 **G01N 21/17** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:  
 WO 2006137090 A1  
 CN 101329249 A  
 JP 2008128888 A  
 RU 2148812 C1  
 AT 509883 A4  
 EP 2012108 A2  
 WO 9616325 A1  
 US 6784990 B1

(71) Patentanmelder:  
 AVL List GmbH  
 8020 Graz (AT)

(72) Erfinder:  
 Cresnoverh Martin  
 8020 Graz (AT)  
 Bergmann Alexander Dr.  
 8052 Graz (AT)

(74) Vertreter:  
 Patentanwälte Pinter & Weiss OG  
 1040 Wien (AT)

(54) **Vorrichtung und Verfahren zur Zählung und/oder Messung von Partikeln in einem Fluidstrom**

(57) Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Zählung und/oder Messung von Partikeln (1) in einem Fluidstrom (3). Die Vorrichtung weist eine Lichtquelle (4) zur Durchleuchtung des Fluidstroms (3) in einem Bereich eines Messkanals (2), der vom Fluidstrom (3) durchflossen wird, und einen Lichtsensor (6) mit einer Vielzahl an Sensorelementen (7), die in dem von der Lichtquelle (4) ausgestrahlten Lichtbündel und an der der Lichtquelle (4) gegenüberliegenden Seiten des Messkanals (2) angeordnet sind, auf. Es ist eine Auswerteeinheit (12) vorgesehen, die eine Vielzahl an zeitlich aufeinanderfolgenden Sensormessungen (13) zu einem Sensorbild (9) zusammensetzt und zur Messung und/oder Zählung der Partikel (1) Interferenzmuster (10) in dem Sensorbild (9), die von den Partikeln (1) verursacht werden, auswertet.

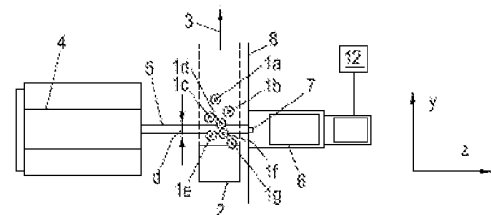


Fig. 3

### Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Zählung und/oder Messung von Partikeln (1) in einem Fluidstrom (3). Die Vorrichtung weist eine Lichtquelle (4) zur Durchleuchtung des Fluidstroms (3) in einem Bereich eines Messkanals (2), der vom Fluidstrom (3) durchflossen wird, und einen Lichtsensor (6) mit einer Vielzahl an Sensorelementen (7), die in dem von der Lichtquelle (4) ausgestrahlten Lichtbündel und an der der Lichtquelle (4) gegenüberliegenden Seiten des Messkanals (2) angeordnet sind, auf. Es ist eine Auswerteeinheit (12) vorgesehen, die eine Vielzahl an zeitlich aufeinanderfolgenden Sensormessungen (13) zu einem Sensorbild (9) zusammensetzt und zur Messung und/oder Zählung der Partikel (1) Interferenzmuster (10) in dem Sensorbild (9), die von den Partikeln (1) verursacht werden, auswertet.

Fig. 3

## Vorrichtung und Verfahren zur Zählung und/oder Messung von Partikeln in einem Fluidstrom

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Zählung und/oder Messung von Partikeln in einem Fluidstrom, wobei die Vorrichtung eine Lichtquelle zur Durchleuchtung des Fluidstroms in  
5 einem Bereich eines Messkanals, der vom Fluidstrom durchflossen wird, und einen Lichtsensor mit einer Vielzahl an Sensorelementen, die in dem von der Lichtquelle ausgestrahlten Lichtbündel und an der der Lichtquelle gegenüberliegenden Seiten des Messkanals angeordnet sind, aufweist.

Weiters betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Zählung und/oder Messung von Partikeln in  
10 einem Fluidstrom, wobei der Fluidstrom in einem Bereich eines Messkanals, der vom Fluidstrom durchflossen wird, von einer Lichtquelle durchleuchtet wird, wobei das von der Lichtquelle ausgestrahlte Licht an der der Lichtquelle gegenüberliegenden Seite des Messkanals von einem Lichtsensor mit einer Vielzahl an Sensorelementen erfasst wird.

Mit den gewachsenen Anforderungen an die Umweltverträglichkeit von Verbrennungskraft-  
15 maschinen kommt der Entwicklung zuverlässiger Vorrichtungen für die Messung der Anzahl an Feststoffpartikeln bei der Entwicklung und den Tests solcher Maschinen eine stetig steigende Bedeutung zu. Dabei unterscheidet man zwischen einer integralen Partikelmessung, bei der aufgrund eines Detektionsergebnisses mithilfe statistischer Berechnungen auf die gesamte Partikeldichte geschlossen wird, und einer Partikelzählung, bei der jedes einzelne  
20 Partikel im Fluidstrom detektiert und die Gesamtanzahl der im Fluidstrom vorhandenen Partikel gezählt wird.

Um die Partikelanzahl über ein großes Partikelgrößenspektrum von wenigen nm bis in den Mikrometerbereich bestimmen zu können, durchlaufen diese vor einer Zählinheit eine Kon-  
25 densationseinheit, in der sich um jedes Partikel ein Kondensattröpfchen bildet, das durch seine Größe leichter zu detektieren ist. Für die Genauigkeit der Zählung ist es dabei wichtig, dass die Kondensattröpfchen eine möglichst einheitliche Größe aufweisen, was den technischen Aufwand und die Kosten der Kondensationseinheit erhöht. Es ist auch technisch aufwendig, die Qualität der Kondensation und die Gleichmäßigkeit der Kondensationspartikel zu überprüfen, etwa bei der Wartung bestehender Kondensationspartikelzähler oder bei der  
30 Entwicklung neuer Kondensationspartikelzähler.

Um eine zuverlässige Zählung aller Partikel zu gewährleisten, sind Partikelzähler des Standes der Technik üblicher Weise als eindimensionale Partikelzähler ausgeführt, bei denen der Partikelstrom nach der Kondensationseinheit durch eine Vereinzelungsdüse geführt wird. Die Partikel können daher mit einer ausreichend hohen Wahrscheinlichkeit vereinzelt, d. h. eines

nach dem anderen, aus der Düse austreten, um eine Zählung der einzelnen Partikel möglichst ohne Koinzidenzen zu ermöglichen. Aufgrund der Vereinzeldüse bewegen sich dabei die zu messenden Partikel in der Regel mit hohen Geschwindigkeiten von beispielsweise etwa 10 - 100 m/s durch das Detektionsvolumen. Die hohen Durchtrittsgeschwindigkeiten sowie die relativ kleine Dimension der aufkondensierten Tröpfchen (ca. 5-20µm) erfordern hier eine hohe Sensitivität und eine hohe zeitliche Auflösung der Sensoren.

Partikelzähler des Standes der Technik in der Ausführung als Vollstromgerät (der gesamte Probenstrom strömt durch die Messkammer) sind derzeit in der Lage, Fluida mit einer Partikeldichte von bis zu 20000 Partikeln / cm<sup>3</sup> zu bewältigen. Dieses Zähllimit wird in erster Linie durch die Koinzidenzwahrscheinlichkeit bestimmt. Koinzidenz tritt auf wenn zwei Partikel so knapp hintereinander den Laserstrahl passieren, dass statt zweier einzelner Impulse nur ein Impuls detektiert wird.

Es ist ein Ziel der gegenständlichen Erfindung, das Zähllimit und gleichzeitig die Zuverlässigkeit der Zählung erheblich zu erhöhen. Gleichzeitig soll das Zählergebnis weitgehend unabhängig von der Qualität, Gleichmäßigkeit und Größenverteilung der zu messenden Partikel bzw. Kondensattröpfchen sein. Ein weiteres Ziel ist es, eine genaue Zählung von Partikeln ohne vorgelagert Kondensationseinheit und ohne das Vorsehen einer Vereinzeldüse zu ermöglichen.

Grundlegende Überlegungen zu holographischen Interferenzmustern von Aerosolpartikeln und Ansätze zu deren Auswertung sind im Artikel „In-line holography and the assessment of aerosols“, Optics and Laser Technology, August 1976, S. 161-165, R. Bexon et al., offenbart.

US 2010/0141945 A1 offenbart eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Ermittlung von Eigenschaften von Partikeln. Die Partikel werden von einer Vereinzeldüse an einer definierten Position einzeln durch einen Lichtstrahl geführt, wobei das vom Partikel bewirkte Streuungsmuster des Lichtstrahls zur Ermittlung der Partikeleigenschaften ausgewertet wird.

US 2011/0043607 A1 offenbart ein Verfahren zur Messung von Partikeleigenschaften, wobei eine Probe mit den Partikeln von einem kollimierten Laserstrahl beleuchtet, und das Streuungsmuster mit einem holographischen Mikroskop gemessen und ausgewertet wird.

US 2007/0285660 A1 offenbart ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Analyse von Partikeln in einem Fluidmedium. Die Partikel werden in einer Eingrenzung von Laserlicht beleuchtet und die von den Partikeln bewirkten Interferenzmuster werden in einer Detektorebene detektiert und zur Ermittlung von Partikeleigenschaften ausgewertet.

Die Ziele der Erfindung werden durch eine Vorrichtung der eingangs genannten Art erreicht, wobei eine Auswerteeinheit vorgesehen ist, die eine Vielzahl an zeitlich aufeinanderfolgenden Sensormessungen zu einem Sensorbild zusammensetzt und zur Messung und/oder Zählung der Partikel Interferenzmuster in dem Sensorbild, die von den Partikeln verursacht werden, ausgewertet. In einem solchen Sensorbild sind die in der Bildebene an sich kreisförmigen Interferenzmuster eines Partikels aufgrund der Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung des Partikels verzerrt als Ellipsen dargestellt, sodass anhand der Form nicht nur die Position und Größe eines Partikels, sondern auch dessen Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung ausgewertet werden können. Weiters kann ein Fluidstrom stetig überwacht werden, was mit einer Momentaufnahme nicht möglich ist. Das Sensorbild spiegelt dabei einen kontinuierlichen Verlauf des Partikelstroms wieder, wobei die einzelnen Sensormessungen vorzugsweise mit einer kontinuierlichen Frequenz aufgenommen werden.

In einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung entspricht die Kohärenzlänge der Lichtquelle mindestens dem Abstand zwischen der Lichtquelle und den Sensorelementen. Dies stellt eine zuverlässige Auswertbarkeit des Sensorbildes sicher. Dabei wird für die Bestimmung der Kohärenzlänge vorteilhafterweise der Abstand zwischen der Lichtquelle und dem der Lichtquelle nächstgelegenen Sensorelement herangezogen.

In vorteilhafter Weise kann die Vielzahl an Sensorelementen als Zeilendetektor ausgebildet sein. Dabei kann mit herkömmlichen, kostengünstigen und leicht verfügbaren Zeilensensoren eine hohe Messleistung erzielt werden.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform können mehrere in Fließrichtung hintereinander angeordnete Zeilendetektoren verwendet werden, um durch redundante Einzelzählungen die Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit der Vorrichtung weiter zu erhöhen.

Dabei können die Vielzahl an Zeilendetektoren in vorteilhafter Weise als Sensorfeld eines Bildsensors ausgebildet sein, sodass bekannte, kostengünstige und leicht verfügbare Sensoren genutzt werden können.

In einer bevorzugten Ausführungsform kann die Vorrichtung eine Zähleinheit eines Kondensationspartikelzählers sein. Durch die damit mögliche Auswertung der Größe, Geschwindigkeit und Position der Partikel kann das Anwachsen der Kondensationspartikel überprüft und eine Qualitätskontrolle durchgeführt werden. Weiters können Eigenschaften des Fluidstroms, wie etwa die Fließrate oder die Reynolds-Zahl überprüft werden.

Indem die Vorrichtung unmittelbar vor oder hinter einer Zählvorrichtung eines bestehenden Partikelzählers angeordnet wird, beispielsweise zwischen der Kondensationseinheit und der Vereinzelungsdüse eines Kondensationspartikelzählers, können die Funktionalität des Parti-

kelzählers und das Strömungsverhalten des Fluidstroms überwacht und Fehlerquellen gefunden werden. Dies kann insbesondere bei der Entwicklung neuer Partikelzähler oder für die Überprüfung der Funktionalität oder Wartung bestehender Partikelzähler verwendet werden.

- 5 Bei dem eingangs genannten erfindungsgemäßen Verfahren werden in vorteilhafter Weise eine Vielzahl an zeitlich aufeinanderfolgenden Sensormessungen zu einem Sensorbild zusammengesetzt und es werden Interferenzmuster in dem Sensorbild, die von den Partikeln verursacht werden, zur Messung und/oder Zählung der Partikel ausgewertet.

10 Als „Sensorbild“ wird im Zusammenhang mit der gegenständlichen Beschreibung ein Satz an Einzelmessungen angesehen, die in Kombination ein bildhaftes Muster ergeben können. Der Begriff „Sensorbild“ ist somit nicht auf eine bestimmte bildhafte Darstellung beschränkt sondern umfasst auch den entsprechenden Datensatz unabhängig von einer Darstellung.

15 In einer vorteilhaften Ausführungsform können aus dem Sensorbild eine Position und/oder eine Bewegungsrichtung und/oder eine Größe und/oder eine Geschwindigkeit eines Partikels errechnet werden. Dabei können beliebige analytische Verfahren und Algorithmen verwendet werden, die zur Auswertung holographischer Bilder geeignet sind. Beispielsweise können aus dem in der Sensorebene aufgenommenen Sensorbild mithilfe der an sich bekannten Angular Spectrum Method rekonstruierte Hologrammbilder in Hologrammebenen, die sich von der Sensorebene unterscheiden, errechnet werden. Aus rekonstruierten Hologrammbildern in Hologrammebenen, die die Partikelposition schneiden, können Größe, Geschwindigkeit, 20 Bewegungsrichtung und Position des Partikels ermittelt werden.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform kann anhand der Positions- und Bewegungsdaten mehrerer Partikel ein Fließprofil des Fluidstroms ermittelt werden. Dabei können Kennzahlen, wie etwa eine Reynoldszahl, aus den für die Partikel ermittelten Messwerten 25 errechnet und ausgewertet werden, oder Messwerte wie der Volumenstrom des Trägergases ermittelt werden.

In bevorzugter Weise sind die gezählten bzw. gemessenen Partikel ausgewählt aus festen Partikeln, flüssigen Partikeln, Aerosolen und/oder Kondensationspartikeln. Feste Partikel können beispielsweise Rußpartikel von Verbrennungsvorgängen, Feinstaub oder mechanischer Abrieb von Reifen oder Bremsbelägen sein. Größere Partikel können direkt gemessen werden, kleinere Partikel, die aufgrund der Wellenlänge des Lichts nicht mehr detektiert werden, können mittels bekannter Mittel und Verfahren vor der Messung zu Kondensationspartikeln vergrößert werden. 30

Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 9 näher erläutert, die beispielhaft, schematisch und nicht einschränkend vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung zeigen. Dabei zeigt

- 5 Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Partikels in einer Laserlicht-Messanordnung, zur Erläuterung der Entstehung von Interferenzmustern;
- Fig. 2 ein beispielhaftes Interferenzmuster bei einer Momentaufnahme;
- Fig. 3 eine schematisierte schaubildliche Darstellung einer ersten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung in einer Seitenansicht;
- 10 Fig. 4 eine schematisierte schaubildliche Darstellung der Vorrichtung der Fig. 3 in einer Draufsicht;
- Fig. 5 eine schematische Darstellung eines Sensorbildes mit einer Vielzahl an Interferenzmustern;
- Fig. 6 ein einzelnes Interferenzmuster des Sensorbildes in einer vergrößerten Darstellung;
- 15 Fig. 7 ein rekonstruiertes Hologrammbild in einer parallel zur Laserstrahlrichtung verlaufenden Hologrammebene;
- Fig. 8 ein rekonstruiertes Hologrammbild in einer parallel zur Sensorebene verlaufenden, von der Sensorebene beabstandeten rekonstruierten Hologrammebene; und
- 20 Fig. 9 eine schematische Darstellung von Positionen, Bewegungsrichtungen und Geschwindigkeiten von Partikeln im Messkanal.

Fig. 1 zeigt die Änderung der Wellenausbreitung in einer Laserlicht-Wellenfront, die von einem einzelnen Partikel 1 bewirkt wird. Dabei wird kollimiertes Laserlicht von einer Lichtquelle 4 ausgesandt, trifft auf das Partikel 1 und wird dann von einem 2D-Lichtsensor 6 aufgenommen. Aufgrund der Interferenzen zwischen dem vom Partikel abgelenkten Licht und dem vom Partikel unbeeinträchtigten Licht bildet sich in der Sensorebene ein holographisches

25 Muster aus, das vom Lichtsensor 6 aufgenommen wird und in Fig. 2 dargestellt ist. Das Muster besteht aus einer Anzahl konzentrischer Kreise, aus deren Größe, Intensität und Breite Rückschlüsse auf Eigenschaften des Partikels 1 gezogen werden können. Die in Fig. 1 und 2 dargestellten Zusammenhänge sind im Stand der Technik bekannt, beispielsweise aus der

30 US2010/0141945, die Möglichkeiten der Auswertung solcher Momentaufnahmen sind jedoch beschränkt und für eine kontinuierliche Messung nicht geeignet.

In Fig. 3 und 4 ist eine erfindungsgemäße Vorrichtung in einer Seitenansicht (Fig. 3) und einer Draufsicht (Fig. 4) schematisch dargestellt.

Im Zusammenhang mit der nachfolgenden Beschreibung werden, gemäß der Darstellung in Fig. 1 bzw. 2, die x-Achse als Sensorachse, die y-Achse als Orthogonalachse und die z-Achse als Lichtachse bezeichnet. In Figuren, in denen mehrere Partikel 1 dargestellt sind, werden die Bezugszeichen dieser Partikel zur Unterscheidung mit Kleinbuchstaben ergänzt.

Die Vorrichtung zur Zählung von Partikeln 1a-1g weist einen Messkanal 2 auf, durch den ein Fluidstrom 3 geführt ist, in dem die zu zählenden Partikel 1a-1g mitgeführt sind. Der Fluidstrom 3 kann beispielsweise Abgas von einem Motor sein oder irgendein anderes Partikel mitführendes Fluid. Eine Lichtquelle 4 ist so angeordnet, dass sie einen flachen Lichtteppich 5 in einer Ebene parallel zur Sensor- und zur Lichtachse ausbildet, der im Wesentlichen quer zur Achse des Messkanals 2 verläuft, wobei die Lichtquelle 4 ein kohärentes Laserlicht abgibt. Der Lichtteppich 5 erstreckt sich somit quer über den Messkanal 2. Die Strömungsrichtung des Messkanals 2 verläuft unter einem vorteilhaften Winkel von  $90^\circ$  zum Lichtteppich 5, es wären jedoch auch andere Winkel möglich. Der Lichtteppich 5 trifft auf der dem Messkanal 2 gegenüberliegenden Seite auf einen Lichtsensor 6 auf, der eine Vielzahl an im Bereich des Lichtteppichs 5 angeordneten Sensorelementen 7 aufweist, die jeweils einem Pixel entsprechen. Die von dem Lichtsensor 6 aufgenommenen Signale werden zur Zählung der Partikel von einer Auswerteeinheit 12 ausgewertet.

Als Messkanal 2 wird jener Bereich bezeichnet, in dem die Fluidströmung verläuft. Der in Fig. 1 dargestellte Messkanal 2 hat einen runden Querschnitt, er kann jedoch auch einen beliebigen anderen Querschnitt aufweisen. Die Strömungsrichtung des Fluidstroms 3 im Messkanal verläuft im Wesentlichen parallel zur Orthogonalachse y. Der Messkanal 2 kann eine durchgängige Außenwandung aufweisen, die im Bereich des Lichtteppichs 5 ein lichtdurchlässiges Fenster aufweist. Andererseits kann der Verlauf der Außenwandung des Messkanals 2 im Bereich des Lichtteppichs 5 (bzw. der Lichtquelle 4 und des Lichtsensors 6) verbreitert sein, um die Lichtquelle 4 und den Lichtsensor 6 aufzunehmen. Unmittelbar vor dem Lichtteppich 5 kann auch eine Auslassdüse vorgesehen sein, die den Fluidstrom 3 in kontrollierter Weise durch den Lichtteppich 5 leitet (eine solche Auslassdüse ist in der Ausführungsform der Fig. 3 und 4 nicht vorgesehen und daher auch nicht dargestellt). Dabei kann die Auslassdüse je nach Anwendungserfordernis den Fluidstrom 3 durch eine Verengung des Strömungsquerschnitts beschleunigen, oder durch eine Ausweitung des Strömungsquerschnitts verlangsamen.

Die Sensorelemente 7 des Lichtsensors 6 weisen in der Art einer Zeilenkamera eine lineare Anordnung auf, wobei die Zeilenlänge sich im Wesentlichen über den gesamten Querschnitt des Messkanals oder auch darüber hinaus erstreckt.

Im in Fig. 3 dargestellten Moment befinden sich drei Partikel 1f, 1d und 1e im Bereich des Lichtteppichs 5 und drei weitere Partikel 1a, 1b und 1c haben den Lichtteppich 5 bereits durchquert und werden vom Fluidstrom 3 in Strömungsrichtung weitergeführt. Ein Partikel 1g befindet sich noch vor dem Lichtteppich 5. Die Größenverhältnisse der Vorrichtung und der dargestellten Partikel sind stark verzerrt und die Anzahl der dargestellten Partikel 1a-1g und der Sensorelemente 7 sind der Übersichtlichkeit halber eingeschränkt. Jedes Partikel 1d, 1e, 1f im Lichtteppich 5 erzeugt in einer Sensorebene 8 ein ähnliches Interferenzmuster, wie es in Fig. 2 dargestellt ist, was sich in der Sensorebene 8 als eine Vielzahl konzentrischer Kreise mit jeweils unterschiedlichem Durchmesser und unterschiedlicher Intensität darstellt. Entsprechende Interferenzmuster werden sowohl von tröpfchenförmigen Partikeln, als auch von Feststoffpartikeln ausgebildet, wobei die Interferenzmuster unterschiedliche Qualitäten aufweisen können.

Da jedoch der Lichtsensor 6 nur eine lineare Anordnung an Sensorelementen 7 aufweist, wobei ein an sich bekannter Zeilendetektor verwendet werden kann, kann zu jedem Zeitpunkt jeweils nur eine Linie des Interferenzmusters mit dem Lichtsensor 6 aufgenommen werden. Während sich die Partikel 1a-1g mit dem Fluidstrom 3 durch den Lichtteppich 5 bewegen, werden von dem Lichtsensor 6 mit einer bestimmten Aufnahme Frequenz Zeilenaufnahmen erfasst, die sich - Zeile für Zeile - zu einem Sensorbild 9 zusammensetzen lassen, wie es in Fig. 5 beispielhaft dargestellt ist. Für die Ermittlung der geeigneten Aufnahme Frequenz können unter anderem die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids, die Breite des Lichtteppichs 5 und/oder die Pixelgröße des Sensorelements 7 in Strömungsrichtung berücksichtigt werden. Die Dicke  $d$  des Lichtteppichs 5 ist so gewählt, dass sich für jedes Partikel beim Durchqueren des Lichtteppichs 5, d.h. zwischen dem Moment, wenn das Partikel 1 in den Lichtteppich 5 eintritt (wie z.B. das Partikel 1e in Fig. 3) und dem Moment, wenn es den Lichtteppich 5 wieder verlässt (z.B. Partikel 1d in Fig. 3), ein ausreichend großes Interferenzmuster, d.h. ein Interferenzmuster mit auswertbarer Größe und mit einer ausreichenden Anzahl an Ringen im Sensorbild ergibt.

Fig. 5 zeigt beispielhaft die zu einem Sensorbild 9 zusammengesetzten Zeilenaufnahmen in einem Zeitbereich von etwa 23 ms bei einer Sensorbreite von etwa 10 mm. Die Abszisse zeigt die Sensorachse  $x$ , die Ordinate die Zeitachse  $t$ . Das Sensorbild 9 hat Ähnlichkeiten mit einer Momentaufnahme, wie sie etwa mit einem 2D-Bildsensor gemacht werden kann, und die Interferenzmuster 10 sind im Sensorbild klar zu erkennen. Da es sich jedoch nicht um eine Momentaufnahme, sondern um zeitlich versetzt aufgenommene Zeilenbilder handelt,

die zu dem Sensorbild 9 zusammengesetzt wurden, hat zusätzlich auch die zeitliche Komponente Auswirkungen auf die Form der Interferenzmuster 10, die jeweils zu einer elliptischen Form verzerrt sind. Insbesondere hat die Geschwindigkeit der Partikel eine Auswirkung auf die Form des jeweiligen Interferenzmusters. Die Geschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen der zu den Interferenzmustern 10 gehörenden Partikeln 1 sind in Fig. 5 durch Vektorpfeile angedeutet.

Das Referenzmuster 10a und das Referenzmuster 10b jeweils eine annähernd kreisrunde Form auf. Diese Form entsteht, wenn das Partikel sich zwischen zwei Aufnahmen um genau eine Pixelbreite der Sensorelemente weiterbewegt hat. Schnellere Partikel durchqueren den Lichtteppich 5 in einer kürzeren Zeit und dies führt daher zu einer in der Zeitachse  $t$  gestauchten Darstellung des entsprechenden Interferenzmusters, wie dies etwa bei den Interferenzmustern 10c und 10d zu sehen ist. Langsamere Partikel hingegen bewirken eine in der Zeitachse  $t$  gestreckte Form des Interferenzmusters, wie etwa bei den Interferenzmustern 10e und 10f. Auch eine Bewegung schräg zur Strömungsrichtung des Fluidstroms 3 wirkt sich auf die Form des Interferenzmusters durch eine Schrägstellung der Ellipsenhauptachsen aus.

Es können auch mehrere Reihen an Sensorelementen 7 im Bereich des Lichtteppichs 5 angeordnet sein. Dadurch könnte die Zählung der Partikel auch bei einer höheren Partikelgeschwindigkeit, bzw. mit einer geringeren erforderlichen Aufnahmefrequenz erfolgen. Dabei wären jedoch auch die Auswirkungen, die diese Art der Aufnahme auf die Formen der Interferenzmuster hat, bei der Auswertung zu berücksichtigen. Im Grunde könnte das erfindungsgemäße Verfahren auch mit einer Vorrichtung gemäß Fig. 1 (mit einem 2D-Bildsensor) ausgeführt werden, wobei jeweils nur eine Zeile des 2D-Bildsensors, oder nur eine begrenzte Anzahl an Zeilen ausgewertet werden.

Unabhängig von der Ausführungsform der Vorrichtung kann die automatisierte Zählung der Interferenzmuster beispielsweise mit bekannten Bilderkennungsalgorithmen (z.B. der modellabhängigen Segmentierung) erfolgen, wobei eine sehr genaue Zählung der Partikelanzahl im Fluid erreicht werden kann.

Informationen zur Geschwindigkeit der Partikel lassen sich aus der Verzerrung bzw. Abweichung von der Kreisform des Interferenzmusters ermitteln, wobei eine Bewertung anhand des Hauptachsenverhältnisses oder anderer Parameter der Ellipsenform (Höhe  $h$ , Durchmesser  $d$ , Scheitelpunkte A und B, seitlicher Versatz  $W$  der Scheitelpunkte, Hauptachsenlängen, etc.) erfolgen kann. Beispiele solcher Parameter sind in Fig. 6 dargestellt.

- Da die Partikelgeschwindigkeit und die Bewegungsrichtung sich überlagernde Auswirkungen auf die Ellipsenform haben können, kann eine Auswertung der Ellipsenform im in der Sensorebene aufgenommenen Sensorbild 9 für eine hohe Messauflösung zu ungenau sein. Um die Genauigkeit zu erhöhen, können die Größe, als auch die Position der Interferenzmuster
- 5 10 durch Rekonstruktionsalgorithmen in anderen Ebenen rekonstruiert und ausgewertet werden. Ein Beispiel für einen Rekonstruktionsalgorithmus ist das Verfahren „Angular Spectrum Method“, dieses wird unter anderem beschrieben in T. Shimobaba, J. Weng, T. Sakurai, N. Okada, T. Nishitsuji, N. Takada, A. Shiraki, N. Masuda, und T. Ito, veröffentlicht in dem Artikel „Computational wave optics library for C++,CWO++ library“ in Computer Physics
- 10 Communications 183 (Mai 2012), Seiten 1124-1138. Mit der Angular Spectrum Method können aus einem in der Sensorebene aufgezeichneten holographischen Muster bei bekannter Lichtwellenlänge die holographischen Muster in anderen, rekonstruierten Hologrammebenen berechnet werden. Somit ist es möglich, Hologrammebenen durch die Position einzelner Partikel zu legen und die holographischen Muster dort zu ermitteln und auszuwerten.
- 15 Die Rekonstruktionsalgorithmen können erfindungsgemäß im Wesentlichen mit denselben mathematischen Algorithmen durchgeführt werden, wie sie für holographische Momentaufnahmen verwendet werden, wobei die Auswertung des zeitlich versetzt aufgenommenen Sensorbildes 9 gegenüber einer herkömmlichen Auswertung einer holographischen Momentaufnahme einige Besonderheiten aufweist.
- 20 Fig. 7 zeigt ein Teil eines rekonstruierten Hologrammbilds in einer Hologrammebene, die parallel zur Zeitachse  $t$  und zur Lichtachse (also vertikal parallel zur Lichtachse  $z$ ) durch die Position eines Partikels 1 gelegt wurde (das heißt durch den Mittelpunkt eines der in Fig. 5 dargestellten elliptischen Interferenzmuster 10). Die Ordinatenachse (Lichtachse  $z$ ) in Fig. 7 gibt die Entfernung zur Sensorebene 8 an. Aus dem in Fig. 7 dargestellten rekonstruierten
- 25 Hologrammbild kann die Position des Partikels hinsichtlich der Lichtachse  $z$  an dem Punkt ermittelt werden, an dem das länglich gestreckte Interferenzmuster 10 eine minimale Ausdehnung aufweist. Die Position des Partikels 1 beim Durchqueren des Lichtteppichs 5 (bzw. der durch Sensorachse  $x$  und Lichtachse  $z$  definierten Ebene) ist somit in allen drei Koordinatenachsen bekannt.
- 30 Fig. 8 zeigt ein weiteres rekonstruiertes Hologrammbild, das in einer parallel zur Sensorebene durch die Position des Partikels 1 verlaufenden Ebene rekonstruiert wurde, wobei der Bereich des Interferenzmusters 10 des Partikels 1 lupenartig vergrößert dargestellt ist. In diesem Hologrammbild ist das elliptische Interferenzmuster sehr flach und weist im Wesentlichen eine Linienform auf, aus deren Winkel zur Zeitachse  $t$  sich die Bewegungsrichtung des
- 35 Partikels 1 in der  $x$ - $y$ -Ebene bei Kenntnis der Belichtungszeit pro Zeile ableiten lässt. Aus der

Länge des flachen Interferenzmusters kann die Geschwindigkeit des Partikels 1 ermittelt werden.

Die Bewegungsrichtung des Partikels in Bezug auf die parallel zur Orthogonalachse/Lichtachse verlaufende Ebene kann ermittelt werden, indem aus einem möglichst hoch aufgelösten Hologrammbild eine Vielzahl von Rekonstruktionen im Bereich um die Partikelposition berechnet wird. Verschiebt sich bei Variation der Rekonstruktionsposition auf der Lichtachse das Minimum der Ausdehnung des Musters in der x-t-Ebene in der Zeitachse, so kann diese Änderung der Minimumsposition in Abhängigkeit von der Lichtachse genutzt werden, um die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit in der y-z-Ebene zu bestimmen.

Die Messwerte der Geschwindigkeit, Bewegungsrichtung und Größe der gemessenen Partikel können zur Bewertung der Strömungseigenschaften im Messkanal ausgewertet werden. In Fig. 9 sind beispielhaft die über einen bestimmten Zeitraum gemessenen Partikel 1 zu einer dreidimensionalen Darstellung zusammengesetzt, wobei die Zeitachse mithilfe der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in eine Längenangabe umgerechnet wurde. Die Darstellung erlaubt eine schnelle optische Überprüfung des Strömungsverhaltens des Fluids im Messkanal. Weiters lassen sich zur Prüfung des Strömungsverhaltens aus den einzelnen Messwerten Kennzahlen, wie etwa die Reynoldszahl, ermitteln.

Da die erfindungsgemäße Vorrichtung für die Zählung von Partikeln mit sehr unterschiedlicher Größe geeignet ist, kann sie für die Zählung verschiedenster Partikel- und Fluidarten verwendet werden, wobei eine Vorbehandlung der Partikel in einer Kondensationseinheit oftmals nicht erforderlich ist. Die Vorrichtung kann auch vorteilhaft zur Zählung von Kondensationskernen verwendet werden. Die Aufwachsgröße der Kondensationskeime um die Partikel wirkt sich nicht auf die Exaktheit der Zählung aus, sodass die Qualität und somit die Kosten der Kondensationseinheit gegenüber bekannten Systemen stark verringert werden können, ohne das Zählergebnis zu verschlechtern. Andererseits kann die Qualität des Anwachsens (d.h. die Größe bzw. die Gleichmäßigkeit der aufgewachsenen Partikeln) in der Kondensationseinheit ohne zusätzliche Messtechnologie ermittelt werden, was für die Kalibrierung, Wartung und Entwicklung von Kondensationspartikelzählern genutzt werden kann.

In vielen Fällen ist es möglich, die Zählung der Partikel ohne vorherige Kondensation durchzuführen, insbesondere wenn die Partikelgrößen deutlich über der Wellenlänge des von der Lichtquelle ausgestrahlten Lichts liegen.

Mit den erfindungsgemäßen Vorrichtungen und Verfahren sind hohe Zählraten erzielbar, da im Gegensatz zu herkömmlichen Partikelzählern eine Vereinzelnung der Partikel in einer Düse nicht erforderlich ist.

Bezugszeichen:

- Partikel 1a-1d
- Messkanal 2
- 5 Fluidstrom 3
- Lichtquelle 4
- Lichtteppich 5
- Lichtsensor 6
- Sensorelemente 7
- 10 Sensorebene 8
- Sensorbild 9
- Interferenzmuster 10a-10d
- Sensorfeld 11
- Auswerteeinheit 12
- 15 Sensormessung 13
- Zeilendetektor 14

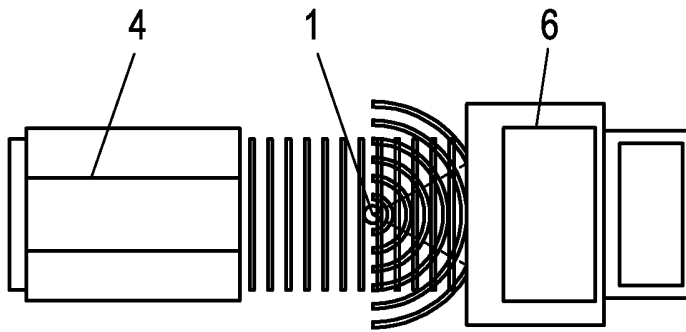
## Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Zählung und/oder Messung von Partikeln (1) in einem Fluidstrom (3), wobei die Vorrichtung eine Lichtquelle (4) zur Durchleuchtung des Fluidstroms (3) in einem Bereich eines Messkanals (2), der vom Fluidstrom (3) durchflossen wird, und einen Lichtsensor (6) mit einer Vielzahl an Sensorelementen (7), die in dem von der Lichtquelle (4) ausgestrahlten Lichtbündel und an der der Lichtquelle (4) gegenüberliegenden Seiten des Messkanals (2) angeordnet sind, aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass eine Auswerteeinheit (12) vorgesehen ist, die eine Vielzahl an zeitlich aufeinanderfolgenden Sensormessungen (13) zu einem Sensorbild (9) zusammensetzt und zur Messung und/oder Zählung der Partikel (1) Interferenzmuster (10) in dem Sensorbild (9), die von den Partikeln (1) verursacht werden, auswertet.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Kohärenzlänge der Lichtquelle mindestens dem Abstand zwischen der Lichtquelle (4) und den Sensorelementen (7) entspricht.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Vielzahl an Sensorelementen (7) als Zeilendetektor (14) ausgebildet ist.
4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung mehrere in Strömungsrichtung hintereinander angeordnete Zeilendetektoren (14) aufweist.
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet dass die Vielzahl an Zeilendetektoren (14) als Sensorfeld (11) eines Bildsensors ausgebildet sind.
6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung eine Zähleinheit eines Kondensationspartikelzählers ist.
7. Verfahren zur Zählung und/oder Messung von Partikeln (1) in einem Fluidstrom (3), wobei der Fluidstroms (3) in einem Bereich eines Messkanals (2), der vom Fluidstrom (3) durchflossen wird, von einer Lichtquelle (4) durchleuchtet wird, wobei das von der Lichtquelle (4) ausgestrahlte Licht an der der Lichtquelle (4) gegenüberliegenden Seite des Messkanals (2) von einem Lichtsensor (6) mit einer Vielzahl an Sensorelementen (7) erfasst wird, dadurch gekennzeichnet, dass eine Vielzahl an zeitlich aufeinanderfolgenden Sensormessungen (13) zu einem Sensorbild (9) zusammengesetzt werden, und Interferenzmuster (10)

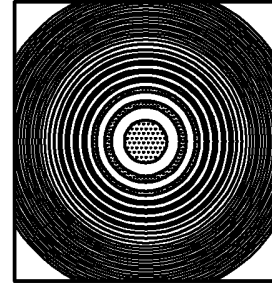
in dem Sensorbild (9), die von den Partikeln (1) verursacht werden, zur Messung und/oder Zählung der Partikel (1) ausgewertet werden.

8. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass aus dem Sensorbild eine Position und/oder eine Bewegungsrichtung und/oder eine Größe und/oder eine Geschwindigkeit eines Partikels (1) errechnet wird.
9. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7 dadurch gekennzeichnet, dass anhand der Positions- und Bewegungsdaten mehrerer Partikel (1) ein Fließprofil des Fluidstroms (3) ermittelt wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die gezählten bzw. gemessenen Partikel (1) ausgewählt sind aus festen Partikeln, flüssigen Partikeln, Aerosolen oder Kondensationspartikeln.

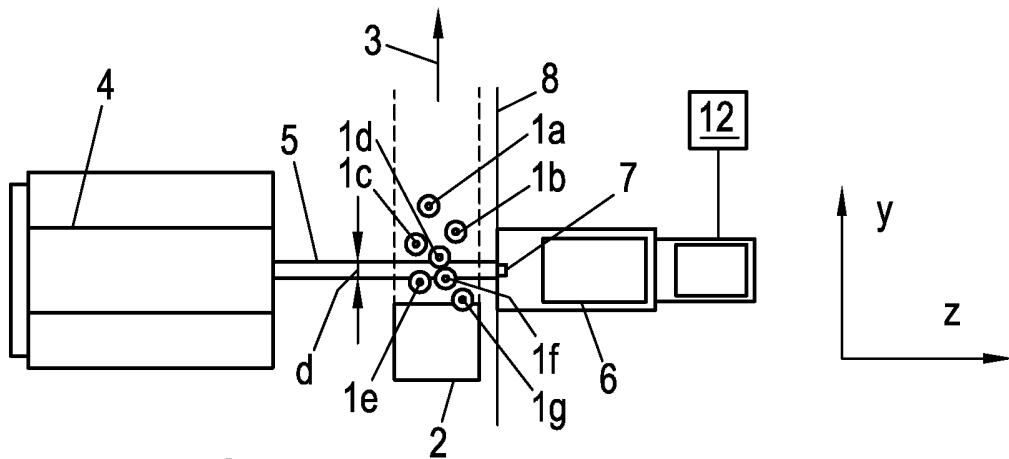
1/4



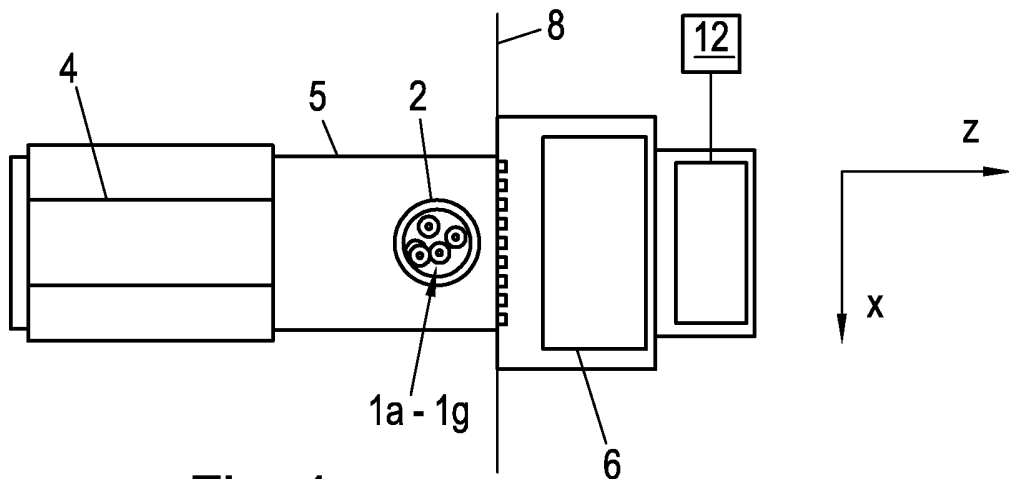
**Fig. 1**  
(Stand der Technik)



**Fig. 2**  
(Stand der Technik)



**Fig. 3**



**Fig. 4**

2/4

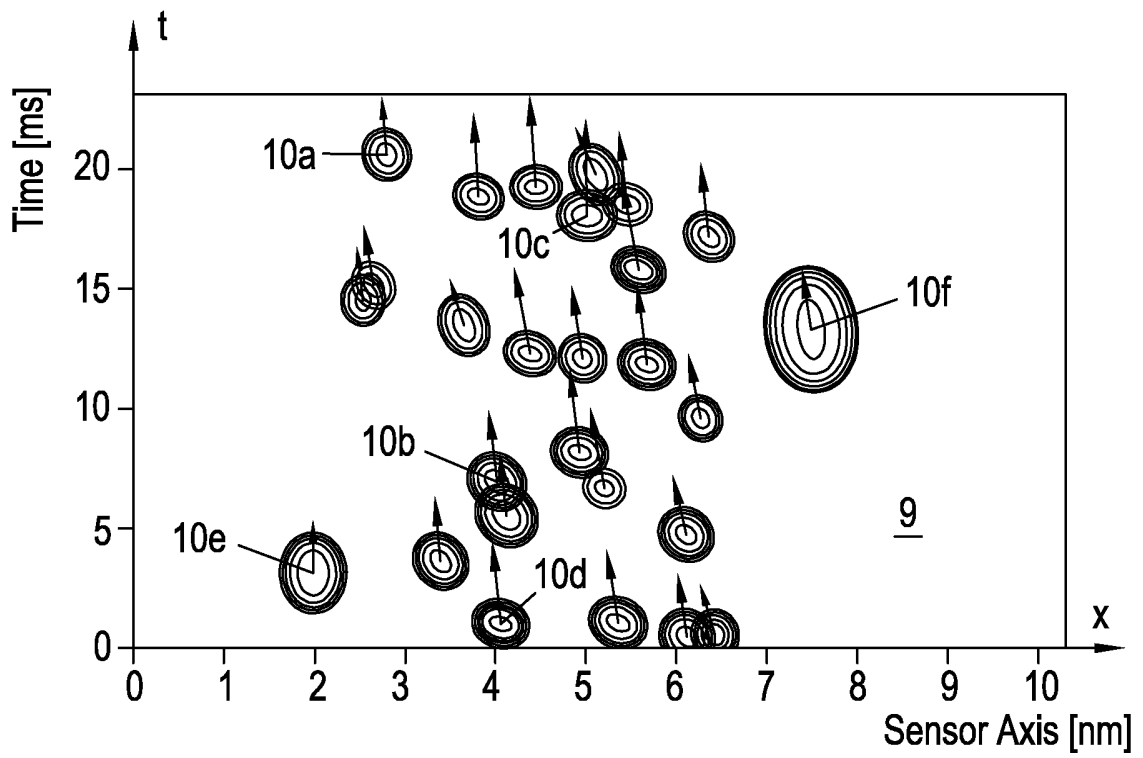


Fig. 5

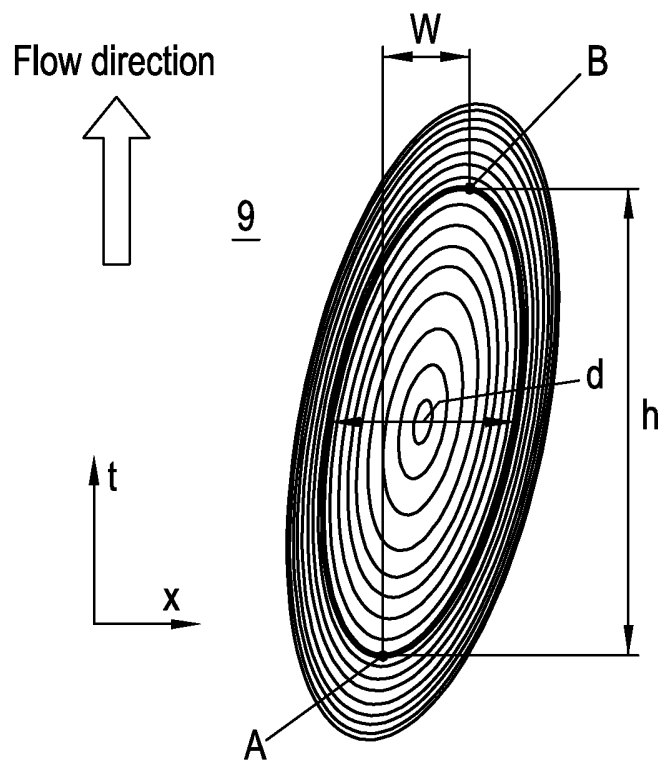


Fig. 6

3/4

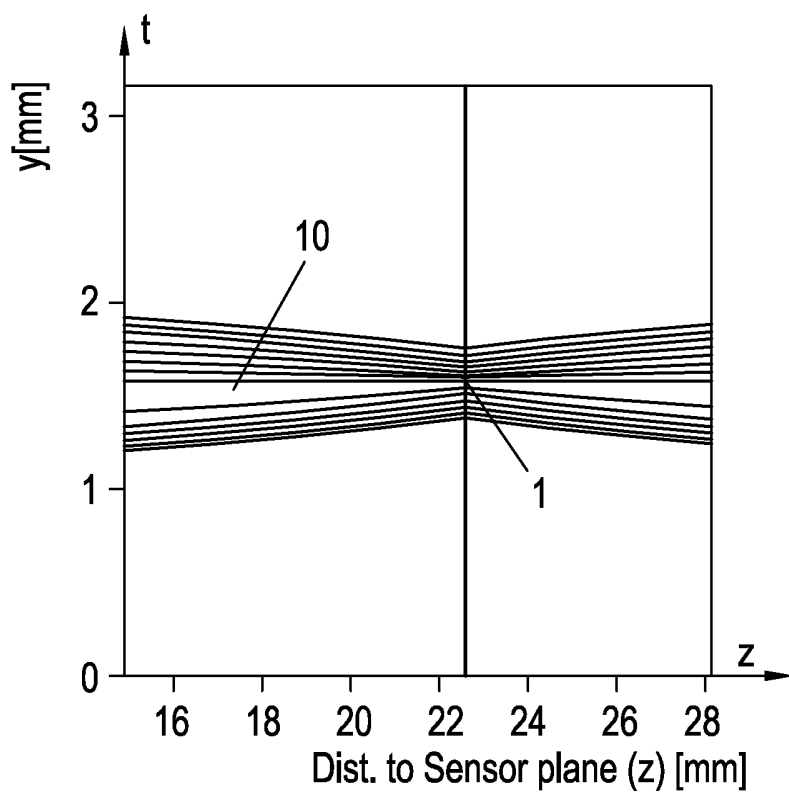


Fig. 7

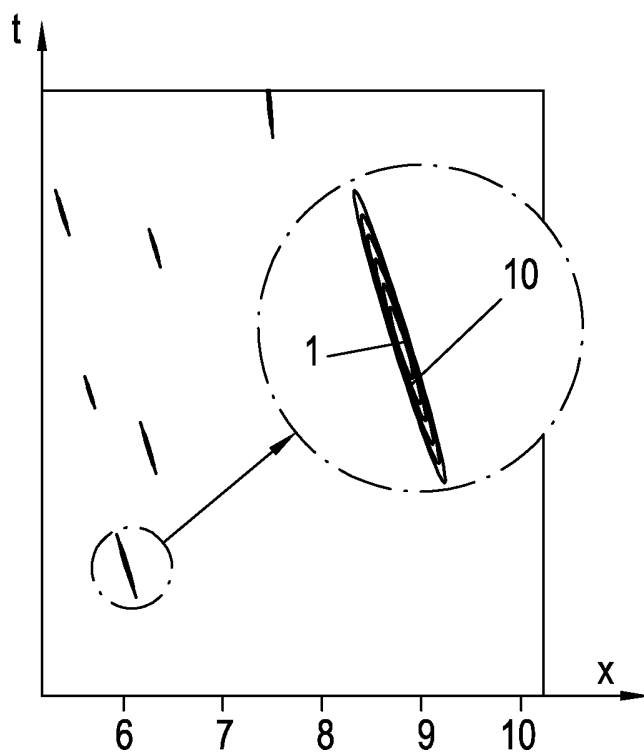


Fig. 8

4/4

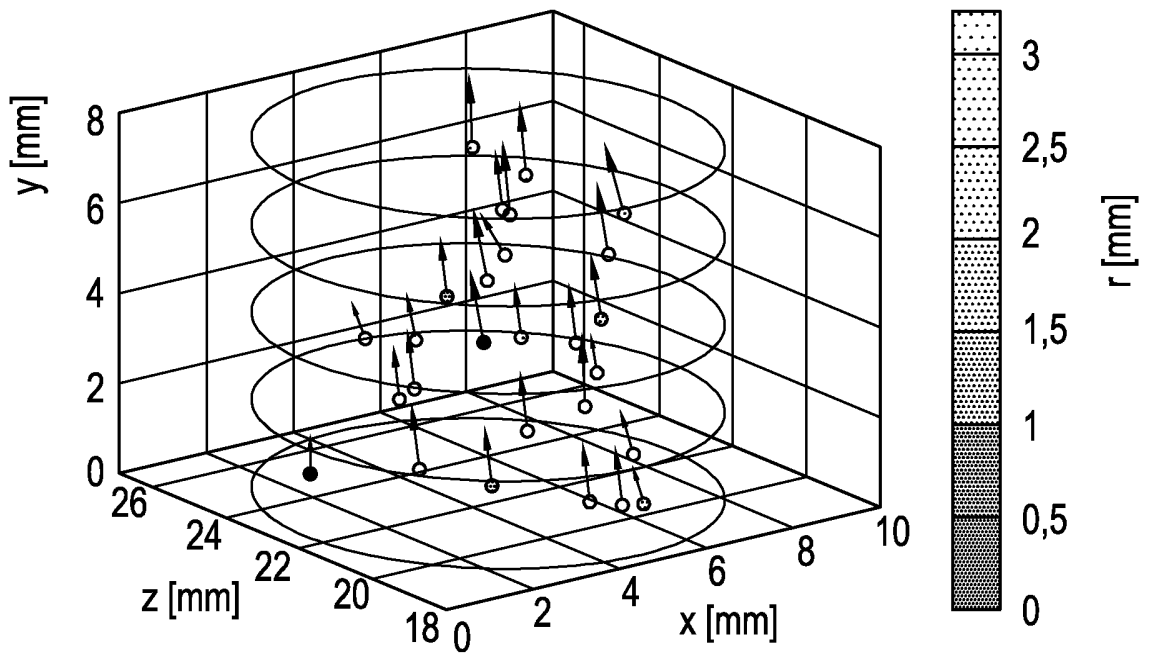


Fig. 9