



(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2011 085 599.8

(51) Int Cl.: G01B 9/02 (2011.01)

(22) Anmelddatum: 02.11.2011

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 13.12.2012

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Polytec GmbH, 76337, Waldbronn, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 10 2008 017 119 A1
DE 103 93 244 T5
US 5 080 491 A
US 5 229 832 A

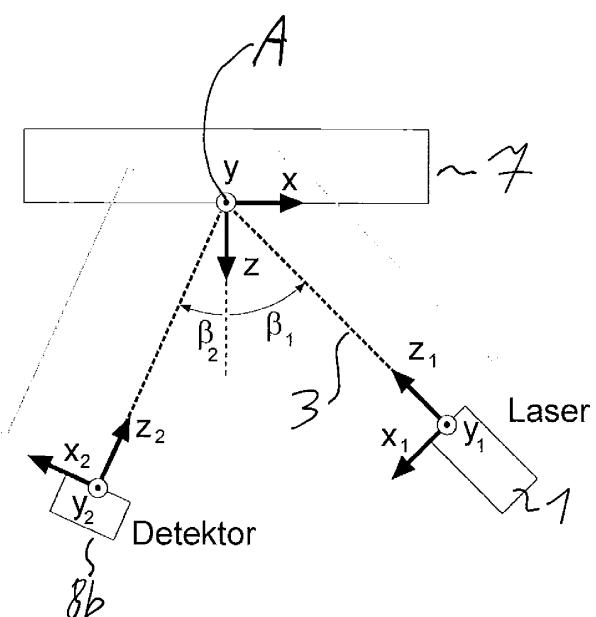
(74) Vertreter:
**Lemcke, Brommer & Partner, Patentanwälte,
76133, Karlsruhe, DE**

Cazzolato, B., u.a.: Scanning laser vibrometer
for non-contact three-dimensional displacement
and strain measurements. In: Proc. of Acoustics
2008, Geelong, Victoria, Australia 24 bis 26
November 2008, 2008, 1 - 9.

(72) Erfinder:
**Schüssler, Matthias, 76337, Waldbronn, DE;
Rembe, Christian, Dr., 76337, Waldbronn, DE;
Dräbenstedt, Alexander, Dr., 76275, Ettlingen, DE;
Kowarsch, Robert, 76337, Waldbronn, DE; Ochs,
Wanja, 76185, Karlsruhe, DE**

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zur interferometrischen Vermessung eines Objekts**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur interferometrischen Vermessung eines Objekts, umfassend eine Strahlungsquelle zur Erzeugung eines Ausgangsstrahls, eine Strahlteilervorrichtung zur Aufteilung des Ausgangsstrahls in einen Mess- und einen ersten Referenzstrahl, eine optische Überlagerungsvorrichtung und einen ersten Detektor, wobei Überlagerungsvorrichtung und erster Detektor derart zusammenwirkend ausgestaltet sind, dass der von dem Objekt zumindest teilweise reflektierte Messstrahl und der erste Referenzstrahl auf mindestens einer Detektorfläche des ersten Detektors überlagert sind. Die Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlteilervorrichtung ausgebildet ist zur Aufteilung des Ausgangsstrahls in einen Messstrahl, einen ersten Referenzstrahl und mindestens einen zweiten Referenzstrahl, dass die Vorrichtung mindestens einen zweiten Detektor aufweist und Überlagerungsvorrichtung und zweiter Detektor derart zusammenwirkend ausgebildet sind, dass der von dem Objekt zumindest teilweise gestreute Messstrahl und der zweite Referenzstrahl auf mindestens einer Detektorfläche des zweiten Detektors überlagert sind. Die Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren zur interferometrischen Vermessung eines Objekts.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur interferometrischen Vermessung eines Objekts gemäß Oberbegriff des Anspruchs 1 sowie ein Verfahren zur interferometrischen Vermessung eines Objekts gemäß Oberbegriff des Anspruchs 12.

[0002] Vorrichtungen und Verfahren zur interferometrischen Vermessung eines Objekts sind in verschiedenen Ausgestaltungen bekannt: So ist beispielsweise ein typischer Aufbau als Laser-Doppler-Vibrometer bekannt, welche einen Laser als Strahlungsquelle zur Erzeugung eines Ausgangsstrahls umfasst, eine Strahlteilevorrichtung zur Aufteilung des Ausgangsstrahls in einen Mess- und einen Referenzstrahl, eine optische Überlagerungsvorrichtung und einen ersten Detektor.

[0003] Der Messstrahl wird auf einen Messpunkt auf dem Objekt geleitet und der zumindest teilweise reflektierte Messstrahl wird zusammen mit dem Referenzstrahl auf einer Detektorfläche des Detektors überlagert, so dass durch Auswertung des Interferenzsignals beispielsweise auf eine Bewegung der Objektoberfläche am Messpunkt in Richtung der optischen Achse des Messstrahls rückgeschlossen werden kann.

[0004] Darüber hinaus sind Anordnungen bekannt, welche einen heterodynem Aufbau aufweisen, so dass sich durch eine Phasendemodulation im Messlicht auf die Auslenkungsrichtung der vermessenen Oberfläche schließen lässt. Ein heterodynes Vibrometer ist in DE 10 2008 017 119 A1 beschrieben.

[0005] Um in zwei oder drei Dimensionen Schwingungsinformation zu erhalten, ist es bekannt, die Messstrahlen von drei Laser-Doppler-Vibrometern so zu führen, dass die Messstrahlen jeweils schräg zueinander in etwa auf einen Messpunkt auf dem Objekt auftreffen. Eine solche Vorrichtung ist in B. Cazzolato, S. Wildy, J. Codrington, A. Kotousov, M. Schüssler, "Scanning laser vibrometer for non-contact three-dimensional displacement and strain measurements", Proc. of Acoustics 2008, 24–26 November, Geelong, Australia, (2008) beschrieben.

[0006] Aus DE 103 93 244 T5 ist ein interferometrisches Verfahren für ellipsometrische, reflektometrische und streulichtanalytische Messungen bekannt. Hierbei wird Testlicht, das von einem Testobjekt über eine Reihe von Winkeln ausgeht, auf einen Detektor abgebildet, dergestalt, dass es mit Referenzlicht interferiert, wobei das Testlicht und das Referenzlicht von einer gemeinsamen Quelle ausgehen.

[0007] Aus US 5,229,832 sind eine Vorrichtung und ein Verfahren zur optischen Ultraschallcharakterisierung eines Materials bekannt, wobei mittels eines Du-

al-Interferometer-Aufbaus gleichzeitig in-plane und out-of-plane Bewegungen der Oberfläche im Ultraschallbereich gemessen werden.

[0008] Aus US 5,080,491 ist ein Laser-Ultraschall-Messverfahren bekannt, wobei zwei im Wesentlichen identische Fabry-Perot-Interferometer verwendet werden.

[0009] Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung zur interferometrischen Vermessung eines Objekts und ein Verfahren zur interferometrischen Vermessung eines Objekts zu schaffen, so dass die Ermittlung von zusätzlicher Information gegenüber den vorbekannten Einstrahl-Laser-Doppler-Vibrometern möglich ist. Gleichzeitig soll ein robuster Aufbau und eine hohe Messgenauigkeit erzielt werden.

[0010] Gelöst ist diese Aufgabe durch eine Vorrichtung zur interferometrischen Vermessung eines Objekts gemäß Anspruch 1 sowie durch ein Verfahren zur interferometrischen Vermessung eines Objekts gemäß Anspruch 12. Vorzugsweise Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Vorrichtung finden sich in den Ansprüchen 2 bis 11; vorzugsweise Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens finden sich in den Ansprüchen 13 bis 14. Hiermit wird der Wortlaut sämtlicher Ansprüche explizit per Referenz in die Beschreibung einbezogen.

[0011] Die erfindungsgemäße Vorrichtung zur interferometrischen Vermessung eines Objekts umfasst eine Strahlungsquelle zur Erzeugung eines Ausgangsstrahls, eine Strahlteilevorrichtung zur Aufteilung des Ausgangsstrahls in einen Mess- und einen ersten Referenzstrahl, eine optische Überlagerungsvorrichtung und einen ersten Detektor.

[0012] Die Überlagerungsvorrichtung und der erste Detektor sind derart zusammenwirkend ausgebildet, dass der von dem Objekt zumindest teilweise reflektierte Messstrahl und der erste Referenzstrahl auf mindestens einer Detektorfläche des ersten Detektors überlagert sind.

[0013] Hinsichtlich dieses Grundaufbaus entspricht die erfindungsgemäße Vorrichtung somit vorbekannten Interferometern, insbesondere weisen typische, aus dem Stand der Technik bekannte, Laser-Doppler-Vibrometer solch einen Aufbau auf.

[0014] Wesentlich ist, dass bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung die Strahlteilevorrichtung ausgebildet ist zur Aufteilung des Ausgangsstrahls in einen Messstrahl, einen ersten Referenzstrahl und mindestens einen zweiten Referenzstrahl. Weiterhin weist die erfindungsgemäße Vorrichtung mindestens einen zweiten Detektor auf und die Überlagerungsvorrichtung und der zweite Detektor sind derart zusammen-

wirkend ausgebildet, dass der vom dem Objekt zumindest teilweise gestreute Messstrahl und der zweite Referenzstrahl auf mindestens einer Detektorfläche des zweiten Detektors überlagert sind.

[0015] Die erfindungsgemäße Vorrichtung weist somit mindestens zwei Detektoren auf, auf denen jeweils Strahlen zur interferometrischen Auswertung überlagert werden. Im Gegensatz zu vorbekannten Vorrichtungen weist die erfindungsgemäße Vorrichtung jedoch lediglich einen Messstrahl auf, der einerseits hinsichtlich des zumindest teilweise reflektierten Messstrahls durch den ersten Detektor und andererseits hinsichtlich des zumindest teilweise von dem Objekt gestreuten Messstrahls durch den zweiten Detektor ausgewertet wird.

[0016] Die erfindungsgemäße Vorrichtung weist somit einen grundsätzlich verschiedenen Aufbau auf, da vorbekannte Vorrichtungen für jeden Detektor jeweils einen eigenen Messstrahl aufweisen.

[0017] Die Erfindung ist insbesondere auf folgende Erkenntnis des Anmelders begründet:

Bei vorbekannten Vorrichtungen, bei denen mehrere Laser-Doppler-Vibrometer kombiniert werden, so dass beispielsweise bei Verwendung von drei Vibrometern drei Messstrahlen auf dem Objekt auftreffen, sollten optimalerweise die Foki der Messstrahlen exakt übereinander liegen, da sonst ein Messfehler bei Drehungen des Objekts um das Messpunktzentrum entsteht.

[0018] Bei Überlagerung der Messstrahlen auf dem Objekt, d. h. exakter Übereinstimmung der Messpunkte der mehreren Vibrometern, wird aber auch von jedem einzelnen Sensor das Messlicht der anderen beiden Vibrometern empfangen, da Streulicht nicht nur vom Messlicht des betrachteten Kanals, sondern auch Messlicht von den anderen Kanälen eingesammelt und auf dem Detektor zur Interferenz gebracht wird (optisches Übersprechen). Da typischerweise die Frequenzen der verwendeten Laser innerhalb eines Frequenzabstandes, welcher durch die Summe aus einer Demodulationsbandbreite und einer heterodynem Frequenzverschiebung definiert ist, zusammenfallen, ergibt sich ein erheblicher störender Effekt, der bis zu einem totalen Ausfall der Messfähigkeit der Sensoren führen kann.

[0019] Umgeht man dieses Problem, indem die Messpunkte geringfügig örtlich nebeneinander liegen, so wird der vorgenannte Störeffekt verringert, jedoch nicht vollständig beseitigt.

[0020] Die vorbekannten Verfahren unter Verwendung mehrerer Vibrometer mit jeweils einem Messstrahl weisen grundsätzlich das Problem des optischen Übersprechens der Detektoren aufgrund ein-

gekoppelten Messlichts der Messstrahlen der anderen Vibrometer auf.

[0021] Im Stand der Technik besteht somit meist die Notwendigkeit, dass die Messpunkte der mehreren verwendeten Vibrometer auf dem Objekt örtlich nebeneinander liegen müssen, um ein optisches Übersprechen zumindest zu verringern. Hierdurch ist jedoch eine Grenze hinsichtlich des Messpunkttdurchmessers gegeben, so dass typischerweise ein Messpunkttdurchmesser von $35 \mu\text{m}$ nicht unterschritten werden kann. Es ist jedoch wünschenswert, mehrdimensionale Schwingungsinformation für Messpunkttdurchmesser kleiner $35 \mu\text{m}$, insbesondere kleiner $15 \mu\text{m}$, weiter bevorzugt kleiner $5 \mu\text{m}$ zu erzielen.

[0022] Bei der Lösung nach Stand der Technik misst man koaxial mit jedem Vibrometerkanal. Bei einem schrägen Auftreffen des Messstrahls liegt der Hauptteil der Leistung der Streulichtkeule um den reflektierten Anteil des Strahls. Der Detektionswinkel zur Achse der Streulichtkeule beträgt daher das Doppelte des Einfallswinkels. Da man für einen kleinen Fokusdurchmesser eine hohe numerische Apertur (NA) benötigt, bedingt die gewünschte Größe des Messpunkts jedes einzelnen Strahls einen Öffnungswinkel des Messstrahls. Dieser Zusammenhang ist bei einer gleichmäßigen Ausleuchtung der Apertur des Mikroskopobjektivs (Austrittspupille) durch den Zusammenhang

$$d = 1.22 \frac{\lambda}{NA} \quad (\text{Formel 0})$$

gegeben, wobei d der Durchmesser des Fokus in [m], λ die Wellenlänge des Messstrahls in [m] und NA die Numerische Apertur des Objektivs ist.

[0023] Da sich die Öffnungswinkel nicht überschneiden können, resultiert hieraus ein minimal möglicher Winkel zwischen den Strahlen. Untersuchungen des Anwenders haben gezeigt, dass es bei der Lösung des Stands der Technik die Empfindlichkeit eines schräg auftreffenden Vibrometerstrahls nicht mehr ausreichend für die meisten Oberflächen ist, wenn ein senkrecht auftreffender Vibrometerstrahl eingerichtet wird, da dann zwangsläufig der Einfallswinkel des schräg auftreffenden Vibrometers zu groß wird. Man muss daher bei beiden Vibrometern einen kleineren schrägen Winkel realisieren, damit der Einfallswinkel bei einem Vibrometer nicht zu groß wird.

[0024] Es ist daher in der Regel nicht möglich, bei Verwendung von mehreren Vibrometern einen der Messstrahlen senkrecht auf die Oberfläche der Probe zu richten. Dies wäre messtechnisch jedoch wünschenswert weil dann ein Kanal direkt die Bewegung in z-Richtung misst (Sollausrichtung des Messkopfes, die senkrecht zur vorgesehenen Lage der Messoberfläche ist), ist aufgrund der vorgenannten Streulichtproblematik bei den aus dem Stand der Tech-

nik bekannten Vorrichtungen jedoch nicht realisierbar bzw. führt durch zu wenig Licht zu einem zu hohen Rauschpegel bei der Signalauswertung bei den schrägen messenden Detektoren.

[0025] Bei typischen aus dem Stand der Technik bekannten Aufbauten muss für jeden Messstrahl ein eigenes Objektiv verwendet werden, so dass kein Raum für ein weiteres Objektiv für eine Kamera zur Aufnahme eines ortsaufgelösten Messbildes vorliegt. Typischerweise muss daher bei den aus dem Stand der Technik bekannten Vorrichtungen eine Kamera mit Hilfe eines dichroitischen Strahlteilers über ein Objektiv eines der verwendeten Vibrometer eingekoppelt werden, um den Messpunkt für Justagezwecke dem Benutzer anzeigen zu können. Da das Objektiv aus den vorgenannten Gründen bei den vorbekannten Vorrichtungen einen schrägen Einfallswinkel zur Oberfläche des Objekts aufweist, ist auch das Bild der Kamera verzerrt und insbesondere nicht gleichmäßig (hinsichtlich verschiedener Ortspositionen) scharf. Hierdurch ist es insbesondere schwierig, eine scannende Messung unter Verwendung eines x-y-Tisches, welcher das Objekt verschiebt, durchzuführen.

[0026] Die erfindungsgemäße Vorrichtung und das nachfolgend erfindungsgemäße Verfahren vermeiden all die vorgenannten Nachteile. Da lediglich ein Messstrahl ausgehend von der Vorrichtung auf die zu vermessende Oberfläche des Objekts gerichtet wird und einerseits ein reflektierter Anteil des Messstrahls und andererseits mindestens ein gestreuter Anteil des Messstrahls mit jeweils einem Detektor ausgewertet wird, kann somit Schwingungsinformation in mehreren Dimensionen ermittelt werden ohne dass – wie bei den vorbekannten Vorrichtungen – mehrere Messstrahlen auf das Objekt gerichtet werden müssen.

[0027] Hierdurch sind die vorgenannten Probleme durch optisches Übersprechen und entsprechende Schwierigkeiten bei der Signalauswertung, Platzprobleme hinsichtlich verwendeter Objekte zur Fokussierung des Messstrahls auf das Objekt sowie Begrenzungen hinsichtlich möglicher Einfallswinkel des Messstrahls auf das Objekt beseitigt.

[0028] Die vorbeschriebene Aufgabe ist ebenfalls gelöst durch das erfindungsgemäße Verfahren zur interferometrischen Vermessung eines Objekts, welches folgende Verfahrensschritte umfasst:
In einem Verfahrensschritt A wird ein Ausgangsstrahl mittels einer Lichtquelle erzeugt, in einem Verfahrensschritt B erfolgt ein Aufteilen des Ausgangsstrahls mittels einer Strahlteilverrichtung in einen Mess- und einem ersten Referenzstrahl. In einem Verfahrensschritt C erfolgt ein Überlagern des ersten Referenzstrahls und des in Anspruch 12 und des zumindest teilweise von dem Objekt reflektierten

Messstrahls auf mindestens einer Detektorfläche eines ersten Detektors.

[0029] Wesentlich ist, dass in Verfahrensschritt B der Ausgangsstrahl zusätzlich in mindestens einen zweiten Referenzstrahl aufgeteilt wird und der zweite Referenzstrahl mit dem zumindest teilweise von dem Objekt mit einem gegenüber dem reflektierten Messstrahl zur Überlagerung auf dem ersten Detektor hier mit einem in einen anderen Winkelbereich an dem Objekt gestreuten Messstrahl auf mindestens einer Detektorfläche eines zweiten Detektors überlagert wird. Dieses in den anderen Winkelbereich gestreute Licht, welches auf der anderen Detektorfläche mit einem zweiten Referenzstrahl überlagert wird, wird im folgenden Empfangslicht und der zugehörige optische Strahlenweg Empfangsstrahl genannt.

[0030] Das erfindungsgemäße Verfahren weist die vorgenannten Vorteile der erfindungsgemäßen Vorrichtung auf.

[0031] Die erfindungsgemäße Vorrichtung ist vorzugsweise ausgebildet zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens bzw. einer vorzugsweise Ausführungsform hiervon. Das erfindungsgemäße Verfahren ist vorzugsweise zur Durchführung mittels einer erfindungsgemäßen Vorrichtung bzw. einer vorzugsweisen Ausführungsform hiervon ausgebildet.

[0032] Vorzugsweise werden mittels des ersten Detektors im Wesentlichen von dem Objekt reflektierte Anteile des Messstrahls, d. h. koaxial zur optischen Achse des Messstrahls reflektierte Lichtstrahlen bzw. Lichtstrahlenbündel gemessen. Demgegenüber werden mittels des zweiten Detektors gestreute Anteile des Messstrahls (der Empfangsstrahl), d. h. vorzugsweise Anteile, welche schräg, also nicht parallel, zur optischen Achse des Messstrahls stehen bzw. entsprechende Strahlenbündel gemessen.

[0033] Die Erfindung ist weiterhin in der Erkenntnis des Anmelders begründet, dass auch das gestreute Licht, welches unter einem schrägen Winkel beispielweise von einem Objekt eingesammelt und auf den zweiten Detektor abgebildet wird, bei einer bewegten Oberfläche des Objekts Doppler-Frequenz verschoben ist. Allerdings kann die bei den vorbekannten Vorrichtungen verwendete Methode zur Auswertung der Messsignale des Detektors hier nicht unverändert angewandt werden. Hingegen kann eine aus der Literatur bekannte, jedoch bisher nicht im Rahmen der erfindungsgemäßen Vorrichtung oder des erfindungsgemäßen Verfahrens verwendete Formel für den richtungsabhängigen Doppler-Effekt verwendet werden, um die Phasen- und/oder Frequenzverschiebung korrekt gemäß nachfolgender Formel 1 zu beschreiben:

$$\dot{\phi} D = \frac{2\pi}{\lambda} (v_x \sin \beta_1 + v_x \sin \beta_2 + v_z \cos \beta_1 + v_z \cos \beta_2) \quad (\text{Formel 1}).$$

[0034] Die geometrischen Größen können aus der schematischen Darstellung gemäß [Fig. 1](#) entnommen werden. Die verbleibenden Größen sind wie folgt definiert v_x ist die Geschwindigkeit des Messobjekts in x-Richtung in [m/s], v_z ist die Geschwindigkeit des Messobjekts in z-Richtung in [m/s], und $\dot{\phi} D$ ist die Ableitung der Phase in [2π rad/s].

[0035] Sofern der Messstrahl senkrecht im betrachteten Koordinatensystem einfällt, vereinfacht sich Formel 1 zu Formel 2:

$$\dot{\phi} D = \frac{2\pi}{\lambda} (v_x \sin \beta_2 + v_z + v_z \cos \beta_2) \quad (\text{Formel 2})$$

[0036] Vorzugsweise trifft aus den zuvor genannten Gründen der Messstrahl in etwa senkrecht auf die zu vermessende Fläche des Messobjekts auf.

[0037] Wie vorhergehend beschrieben, umfasst die erfindungsgemäße Vorrichtung vorzugsweise ein erstes Objektiv, welches im Strahlengang des Messstrahls und des ersten Referenzstrahls zwischen Objekt und erstem Detektor angeordnet ist.

[0038] Hierdurch kann insbesondere der Messstrahl auf einen Messpunkt auf dem Objekt fokussiert werden. Vorzugsweise weist das Objektiv eine numerische Apertur größer 0,05, bevorzugt größer 0,1, insbesondere bevorzugt größer gleich 0,2 auf. Hierdurch ergibt sich der Vorteil, dass dann gemäß Formel 0 sich ein kleiner Messfokus ergibt, der insbesondere bei einer vorzugsweise verwendeten grünen Wellenlänge deutlich unter 5 μm beträgt auch wenn die Apertur des Objektivs mit einem Gaußförmigen Strahl ausgeleuchtet wird. Da kein weiterer Laserstrahl auf die Messoberfläche trifft entspricht der Fokusdurchmesser des Messtrahls der Messpunktgröße des gesamten Systems. Durch den Umstand, dass nur ein Laserstrahl auf das Objekt trifft, wird ein extrem kleiner Messpunkt erreicht und optisches Übersprechen kann nicht auftreten. Diese wesentliche Erkenntnis hat zu dem Konzept dieser Erfindung geführt.

[0039] Weiterhin ist es vorteilhaft, dass das erste Objektiv ebenso im Strahlengang des Empfangsstrahls zwischen Objekt und zweitem Detektor angeordnet ist. Auf diese Weise ist somit lediglich ein Objektiv notwendig, um einerseits den reflektierten Messstrahl auf den ersten Detektor und andererseits den gestreuten Messstrahl (Empfangsstrahl) auf den zweiten Detektor abzubilden.

[0040] In einer weiteren vorzugsweisen Ausführungsform umfasst die Vorrichtung ein zweites Objektiv, welches im Strahlengang des Empfangsstrahls zwischen Objekt und zweitem Detektor angeordnet ist. Hierdurch kann somit durch das zweite Objektiv

gezielt die optische Abbildung des gestreuten Messstrahls auf den zweiten Detektor gewählt werden. Insbesondere ist es vorteilhaft, dass die numerische Apertur des zweiten Objektivs kleiner 0,15, bevorzugt kleiner 0,1, weiter bevorzugt kleiner 0,06 ist. Die numerische Apertur kann kleiner gewählt werden, da die Messpunktgröße nicht durch die numerische Apertur des Empfangsstrahl beeinflusst wird. Hierdurch ergeben sich die Vorteile, dass ein kleinerer Detektionswinkel gewählt werden kann, der mindestens der Summe aus halben Öffnungswinkel des Messstrahls und dem halben Öffnungswinkel des Empfangsstrahl betragen muss. Des Weiteren führt das zu einem größeren Überlappungsbereich in z-Richtung, was einem größeren Tiefenmessbereich entspricht.

[0041] In einer weiteren vorzugsweisen Ausführungsform ist die erfindungsgemäße Vorrichtung zur heterodynem Messung mittels des ersten Detektors ausgebildet, indem eine Vorrichtung zur Frequenzverschiebung zwischen Messstrahl und erstem Referenzstrahl vorgesehen ist, die sich vorzugsweise mit einem optischen Frequenzschieber, wie z. B. einer Bragg-Zelle erreichen lässt. Hierdurch lässt sich somit in an sich bekannter Weise auch die Bewegungsrichtung der vermessenden Oberfläche des Objekts ermitteln. Insbesondere ist es vorteilhaft, dass bei allen Referenzstrahlen jeweils zwischen Messstrahl und Referenzstrahl eine Frequenzverschiebevorrichtung vorgesehen ist, so dass der heterodyne Aufbau somit hinsichtlich aller Referenzstrahlen gegeben ist. Ein besonders einfacher Aufbau ergibt sich in der vorzugsweisen Ausgestaltung, in welcher lediglich der Messstrahl frequenzmoduliert wird, so dass der Messstrahl gegenüber allen Referenzstrahlen hinsichtlich der Frequenz verschoben ist und somit ein komplett heterodynener Aufbau hinsichtlich aller Detektoren vorliegt.

[0042] In einer weiteren vorzugsweisen Ausführungsform ist die Vorrichtung hinsichtlich der Strahlengänge von Messstrahl und erstem Referenzstrahl als konfokales Mikroskop ausgebildet. Hierdurch ergibt sich der Vorteil, dass nicht fokale Strahlen nicht auf den Detektor abgebildet werden. Ein typischer konfokaler Aufbau kann durch Vorsehen einer optischen Lochblende im Strahlengang von Messstrahl und erstem Referenzstrahl realisiert werden. Vorzugsweise wird der konfokale Aufbau durch Ausbildung des Detektors als optische Lochblende erzielt.

[0043] In einer weiteren vorzugsweisen Ausführungsform ist die Strahlteilervorrichtung ausgebildet zur Aufteilung des Ausgangsstrahls in einen Messstrahl, einen ersten Referenzstrahl, einen zweiten Referenzstrahl und mindestens einen dritten Referenzstrahl. Weiterhin umfasst die Vorrichtung mindestens einen dritten Detektor und Überlagerungsvorrichtung und dritter Detektor sind derart zusammenwirkend ausgebildet, dass der von dem Objekt

zumindest teilweise gestreute Messstrahl und der dritte Referenzstrahl auf mindestens einer Detektorfläche des dritten Detektors überlagert sind. Hierdurch ist eine Vermessung einer Schwingung oder Auslenkung der Oberfläche des Objekts in drei Dimensionen möglich.

[0044] Insbesondere ist es vorteilhaft, dass die Vorrichtung derart ausgebildet ist, dass eine erste Ebene, welche durch den Messstrahl und den Empfangsstrahl definiert ist, mit einer zweiten Ebene, welche durch den Messstrahl und den dritten Referenzstrahl gebildet wird, einen Winkel größer 45° , bevorzugt größer 85° einschließt. Hierdurch ist es gewährleistet, dass eine hinreichend genaue Auf trennung der Bewegungs information in drei Dimensionen möglich ist.

[0045] Vorzugsweise beträgt der Winkel zwischen Messstrahl und zumindest erstem Empfangsstrahl weniger als 40° , bevorzugt weniger als 30° . Insbesondere ist es vorteilhaft, dass bei allen Empfangsstrahlen jeweils der Winkel zwischen Messstrahl und Empfangsstrahl kleiner 40° , bevorzugt kleiner 30° ist. Hierdurch ist ein hohes Signal-Rauschverhältnis, bei den Empfangsstrahlen und ein großer Tiefenmessbereich gewährleistet.

[0046] Vorzugsweise ist die Strahlungsquelle als longitudinal einmodiger Laser ausgebildet. Hierdurch ergibt sich der Vorteil, dass es zu keinen Störeffekten durch optische Mischeffekte zwischen den Moden kommt. Insbesondere ist es vorteilhaft, die Strahlungsquelle zusätzlich als transversal einmodigen Laser auszubilden, so dass sich weiterhin der Vorteil ergibt, dass sich der Messlaserstrahl optimal fokussieren lässt und ein minimaler Messpunkt durchmesser erreicht wird. Ein Laser mit einem M^2 -Faktor kleiner 1,5 hat sich als ausreichend für eine gute Fokussierung erwiesen.

[0047] Untersuchungen des Anmelders haben gezeigt, dass insbesondere die Ausbildung der Strahlungsquelle als Laser mit einer Wellenlänge im sichtbaren Bereich, vorzugsweise als DPSS-Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm vorteilhaft ist.

[0048] Um einen kleinen Messfleck zu erzielen ist es vorteilhaft, wenn alle Detektoren lediglich Licht des reflektierten oder gestreuten Messstrahls einer Messfläche auf dem Objekt mit einem Durchmesser kleiner $35\text{ }\mu\text{m}$, insbesondere kleiner $15\text{ }\mu\text{m}$, weiter bevorzugt kleiner $5\text{ }\mu\text{m}$ auswerten. Insbesondere sind die optischen Komponenten und hierbei beispielsweise ein oder mehrere Objektive der Vorrichtung vorzugsweise derart ausgebildet, dass ein Messbereich auf dem Objekt mit einem Durchmesser kleiner $35\text{ }\mu\text{m}$, insbesondere kleiner $15\text{ }\mu\text{m}$, weiter bevorzugt kleiner $5\text{ }\mu\text{m}$ auf die Messfläche der Detektoren abgebildet wird.

[0049] Das erfindungsgemäße Verfahren ist vorzugsweise derart ausgebildet, dass die Messsignale des ersten und des zweiten Detektors jeweils phasenmoduliert werden, so dass eine mehrdimensionale Auswertung der Auslenkung der Oberfläche des Objekts durchgeführt werden kann.

[0050] In einer weiteren vorzugsweisen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens werden die Messsignale des ersten Detektors phasenmoduliert, um eine Auslenkung der Oberfläche des Objekts durchzuführen und die Messsignale des zweiten Detektors werden amplitudendemoduliert, um eine Auswertung der Intensität des gestreuten Messstrahls durchzuführen. Hiermit kann somit in einfacher Weise sowohl die Auslenkung in Richtung der optischen Achse des Messstrahls sowie die Intensität des Streulichts mit bisher nicht erreichter Genauigkeit gemessen werden. Hierdurch ergibt sich eine Vielzahl neuer Anwendungsformen:
Insbesondere ist es möglich, Unebenheiten oder Einschlüsse von Fehlpartikeln auf einer im wesentlichen glatten Oberfläche zu detektieren, indem einmal durch Relativbewegung des Messstrahls zur Oberfläche die Oberflächenänderung (im übertragenen Sinne die „Auslenkung“) durch Phasenmodulation der Messsignale des ersten Detektors und darüber hinaus das durch die Fehlpartikel gestreute Licht mittels Amplitudendemodulation der Messsignale des zweiten Detektors ermittelt wird.

[0051] Vorzugsweise ist das erfindungsgemäße Verfahren daher derart ausgeführt, dass eine Oberflächentopografie des Objekts bestimmt wird, folgende Verfahrensschritte umfassend:

- Bewegen des Objekts relativ zu dem Messstrahl, vorzugsweise im Wesentlichen senkrecht zur optischen Achse des Messstrahls und
- Messen der Auslenkung mittels des ersten Detektors sowie Messen des Streulichts mittels des zweiten Detektors.

[0052] Weitere Merkmale und vorzugsweisen Ausführungsformen werden im Folgenden anhand von den Figuren und Ausführungsbeispielen beschrieben. Dabei zeigt:

[0053] [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung eines typischen Aufbaus einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Verdeutlichung der geometrischen Parameter der Formel 1, welche den richtungsabhängigen Doppler-Effekt beschreibt;

[0054] [Fig. 2](#) eine schematische Darstellung eines ersten Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

[0055] [Fig. 3](#) die räumliche Anordnung von Lichtquelle und Detektoren des in [Fig. 2](#) dargestellten ersten Ausführungsbeispiels und

[0056] [Fig. 4](#) schematische Darstellungen der Strahlenverläufe bei Ausführungsbeispielen der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit einem Objektiv (Teilbild A) und mit mehreren Objektiven (Teilbild B).

[0057] [Fig. 1](#) zeigt anhand des ersten Ausführungsbeispiels die geometrische Anordnung zur Anwendung der zuvor genannten Formel 1.

[0058] Zum einfacheren Verständnis wird daher zunächst das erste Ausführungsbeispiel anhand der schematischen Darstellung gemäß [Fig. 2](#) erläutert: Bei dem ersten Ausführungsbeispiel ist eine Strahlungsquelle **1** als Laser mit einer Wellenlänge 532 nm ausgebildet. Ein Ausgangsstrahl **2**, welche durch den Laser erzeugt wird, wird durch eine Strahlteilervorrichtung in einen Messstrahl **3** und einen ersten Referenzstrahl **4a**, einen zweiten Referenzstrahl **4b** und einen dritten Referenzstrahl **4c** aufgeteilt.

[0059] Die Strahlteilervorrichtung umfasst hierfür mehrere Strahlteiler **5a**, **5b** und **5c**. Der Messstrahl **3** wird über ein erstes Objektiv **6a** auf einen Messpunkt A auf einem zu vermessenden Objekt **7** abgebildet. Der von der Oberfläche des Objekts **7** am Messpunkt A reflektierte Messstrahl tritt wiederum in den Strahlengang des ersten Objektivs **6a** ein und wird über eine optische Überlagerungsvorrichtung auf einen ersten Detektor **8a** abgebildet, welcher erster Detektor **8a** zwei Fotodetektoren **8a'** und **8a''** umfasst. Die optische Überlagerungsvorrichtung umfasst Spiegel M, Polarisationsstrahlteiler PBS. Der Detektor umfasst zur Überlagerung der Strahlen auf den beiden Fotodetektoren **8a'** und **8a''** einen weiteren Strahlteiler **8a'''**.

[0060] Der Aufbau des ersten Fotodetektors entspricht somit dem an sich bekannten Aufbau einer so genannten „balanced detector“ Anordnung.

[0061] Mittels einer Lochblende A im Strahlengang des Messstrahls und ersten Referenzstrahls ist ein konfokaler Aufbau realisiert.

[0062] Weiterhin ist im Strahlengang des Messstrahls **3** eine als Braggzelle ausgebildete Frequenzschiebevorrichtung **9** angeordnet, um einen heterodynem Aufbau hinsichtlich des Messstrahls und aller Referenzstrahlen auszubilden. Alternativ kann die Frequenzschiebevorrichtung **9** im Strahlengang eines oder beider Referenzstrahlen angeordnet sein.

[0063] Der erste Messstrahl wird in an sich bekannter Weise über ein Teleskop T und Lambda Viertelpflättchen QWP auf den Messpunkt A auf dem Objekt **7** abgebildet und entsprechend der wiedereingekoppelte reflektierte Messstrahl über diesen optischen Aufbau auf den ersten Detektor **8a** abgebildet.

[0064] Die Vorrichtung gemäß [Fig. 2](#) umfasst weiterhin einen zweiten Detektor **8b**, welcher analog zu dem ersten Detektor **8a** zwei Fotodetektoren **8b'** und **8b''** sowie einen Strahlteiler **8b'''** für eine balanced-detector-Anordnung aufweist. Der an dem Messpunkt A auf dem Objekt **7** gestreute Anteil des Messlichts wird als ersten Empfangsstrahl **4b'** teilweise durch ein zweites Objektiv **6b** eingesammelt und über Spiegel M und ein weiteres Teleskop T mit dem zweiten Referenzstrahl **4c** auf dem zweiten Detektor **8b** überlagert.

[0065] In analoger Weise ist ein drittes Objektiv **6c** vorgesehen, welches in einen anderen Raumwinkel gestreute Anteile des an dem Punkt A des Objekts **7** gestreuten Messstrahls als zweiten Empfangsstrahl **4c'** einsammelt und über Spiegel M auf einen dritten Detektor **8c** abbildet, welcher dritte Detektor **8c** im analogen Aufbau zwei Fotodetektoren **8c'** und **8c''** sowie einen Strahlteiler **8c'''** aufweist. Auf den Messflächen der Fotodetektoren **8c'** und **8c''** wird in analoger Weise der von dem Objektiv **6c** eingesammelte Streulichtanteil des Messstrahls mit dem dritten Referenzstrahl **4c** überlagert.

[0066] Die Vorrichtung ist vorzugsweise derart angeordnet und ausgebildet, dass der Messstrahl **3** in etwa senkrecht zur Flächennormale des Objekts **7** an dem Messpunkt A auftrifft.

[0067] Der mittels des ersten Objektivs **6a** erzeugte Messpunkt weist einen Durchmesser kleiner 5 µm auf.

[0068] Hierzu weist das erste Objektiv eine nummerische Apertur von etwa 0,2 auf. Die nummerischen Aperturen von zweitem und dritten Objektiv **6b** und **6c** betragen hingegen etwa 0,1.

[0069] Die drei Detektoren **8a**, **8b** und **8c** sind mit einer (nicht dargestellten) Auswerteeinheit verbunden, die in an sich bekannter Weise ausgebildet ist, um Amplitudendemodulationen und/oder Phasendemodulationen der Messsignale der Fotodetektoren vorzunehmen.

[0070] Auf diese Weise ist es somit möglich, beispielsweise eine Bewegung des Messpunktes A auf der Oberfläche des Objekts **7** in drei Dimensionen zu vermessen. Hierbei ist es erstmals möglich, dies mit einem Messpunkt mit einem Durchmesser von 5 µm durchzuführen, ohne dass die bei dem Stand der Technik genannten Störeffekte auftreten.

[0071] Zur Auswertung der dreidimensionalen Schwingungsinformation wird der richtungsabhängige Doppler-Effekt berücksichtigt, vorzugsweise gemäß Formel 1.

[0072] Die Bedeutung der geometrischen Parameter aus Formel 1 sind in der schematischen Darstellung gemäß [Fig. 1](#) verdeutlicht:

Die als Laser ausgebildete Strahlungsquelle, deren Ausgangsstrahl in einen Messstrahl **3** und mehrere Referenzstrahlen aufgespalten wurde, ist angeordnet, so dass der Messstrahl **3** unter einem Winkel β_1 auf die Flächennormale des Objekts **7** an dem Messpunkt A auftritt. Die Flächennormale definiert darüber hinaus die xy-Ebene und die senkrecht hierzu stehende z-Achse.

[0073] Unter einem Winkel β_2 ist der zweite Detektor **8b** angeordnet.

[0074] Wie bereits ausgeführt, zeigt [Fig. 2](#) eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, in welcher zur einfacheren Darstellung sämtliche Strahlengänge zweidimensional aufgetragen wurden.

[0075] [Fig. 3](#) zeigt die tatsächlichen räumlichen Anordnungen von Strahlungsquelle **1**, ersten Detektor **8a**, zweiten Detektor **8b** und dritten Detektor **8c** in räumlicher Darstellung insbesondere hinsichtlich der durch die Flächennormale des Messobjekts **7** am Messpunkt A definierten x, y und z Koordinaten. Insbesondere sind die Winkel φ_{det} eingezeichnet, welche vorzugsweise kleiner 40° sind.

[0076] In [Fig. 4](#) sind zwei Teilausschnitte von Ausführungsbeispielen der erfindungsgemäßen Vorrichtung dargestellt:

In Teilbild A ist ein Ausführungsbeispiel dargestellt, bei dem mittels lediglich eines Objektivs sowohl Messstrahl **3** auf den Messpunkt A auf dem Messobjekt **7** abgebildet wird, als auch in einem schräg hierzu stehenden Raumwinkel φ_{det} ein erster Referenzstrahl **4a** von einem und demselben Objektiv über weitere optische Komponenten auf den zweiten Detektor abgebildet wird.

[0077] In Teilbild B ist hingegen ein Ausführungsbeispiel dargestellt, bei dem mittels eines ersten Objektivs **6a** der Messstrahl **3** auf den Messpunkt A des Objekts **7** abgebildet wird und ein Streulichtanteil des Messstrahls **3** mittels eines zweiten Objektivs **6b** und weitere optische Komponenten auf den zweiten Detektor **8b** abgebildet wird.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur interferometrischen Vermessung eines Objekts, umfassend eine Strahlungsquelle zur Erzeugung eines Ausgangsstrahls, eine Strahlteilevorrichtung zur Aufteilung des Ausgangsstrahls in einen Mess- und einen ersten Referenzstrahl, eine optische Überlagerungsvorrichtung und einen ersten Detektor,

wobei Überlagerungsvorrichtung und erster Detektor derart zusammenwirkend ausgestaltet sind, dass der von dem Objekt zumindest teilweise reflektierte Messstrahl und der erste Referenzstrahl auf mindestens einer Detektorfläche des ersten Detektors überlagert sind,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Strahlteilevorrichtung ausgebildet ist zur Aufteilung des Ausgangsstrahls in einen Messstrahl, einen ersten Referenzstrahl und mindestens einen zweiten Referenzstrahl,

dass die Vorrichtung mindestens einen zweiten Detektor aufweist und Überlagerungsvorrichtung und zweiter Detektor derart zusammenwirkend ausgebildet sind, dass der von dem Objekt zumindest teilweise gestreute Messstrahl als erster Empfangsstrahl und der zweite Referenzstrahl auf mindestens einer Detektorfläche des zweiten Detektors überlagert sind.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung ein erstes Objektiv umfasst, welches im Strahlengang des Messstrahls und des ersten Referenzstrahls zwischen Objekt und erstem Detektor angeordnet ist.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Objektiv weiterhin im Strahlengang des zweiten Referenzstrahls zwischen Objekt und zweitem Detektor angeordnet ist.

4. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung ein zweites Objektiv umfasst, welches im Strahlengang des zweiten Referenzstrahls zwischen Objekt und zweitem Detektor angeordnet ist.

5. Vorrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung zur heterodynem Messung mittels des ersten Detektors ausgebildet ist, indem eine Frequenzverschiebevorrichtung zur Frequenzverschiebung zwischen Messstrahl und erstem Referenzstrahl vorgesehen ist.

6. Vorrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung hinsichtlich der Strahlengänge von Messstrahl und erstem Referenzstrahl als konfokales Mikroskop ausgebildet ist.

7. Vorrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Strahlteilevorrichtung ausgebildet ist zur Aufteilung des Ausgangsstrahls in einen Messstrahl, einen ersten Referenzstrahl, einen zweiten Referenzstrahl und mindestens einen dritten Referenzstrahl, dass die Vorrichtung mindestens einen dritten Detektor aufweist und Überlagerungsvorrichtung und dritter

Detektor derart zusammenwirkend ausgebildet sind, dass der von dem Objekt zumindest teilweise gestreute Messstrahl als zweiter Empfangsstrahl und der dritte Referenzstrahl auf mindestens einer Detektorfläche des dritten Detektors überlagert sind.

dass die Messsignale des zweiten Detektors amplitudenmoduliert werden, für eine Auswertung der Intensität des gestreuten Messstrahls.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

8. Vorrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Winkel zwischen Messstrahl und zumindest erstem Empfangsstrahl kleiner 30° ist.

9. Vorrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlungsquelle als longitudinal einmodiger Laser ausgebildet ist.

10. Vorrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlungsquelle als Laser mit einer Wellenlänge im sichtbaren Bereich ausgebildet ist.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlungsquelle als DPSS-Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm ausgebildet ist.

12. Verfahren zur interferometrischen Vermessung eines Objekts, folgende Verfahrensschritte umfassend:

A Erzeugen eines Ausgangsstrahls mittels einer Lichtquelle;

B Aufteilen des Ausgangsstrahls mittels einer Strahlteilervorrichtung in einen Mess- und einen ersten Referenzstrahl;

C Überlagern des ersten Referenzstrahls und des zumindest teilweise von dem Objekt reflektierten Messstrahls auf mindestens einer Detektorfläche eines ersten Detektors;

dadurch gekennzeichnet,

dass in Verfahrensschritt B der Ausgangsstrahl zusätzlich in mindestens einen zweiten Referenzstrahl aufgeteilt wird und der zweite Referenzstrahl mit dem zumindest teilweise von dem Objekt gestreuten Messstrahl auf mindestens einer Detektorfläche eines zweiten Detektors überlagert wird.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Messsignale des ersten und des zweiten Detektors jeweils phasenmoduliert werden, für eine mehrdimensionale Auswertung einer Auslenkung der Oberfläche des Objekts.

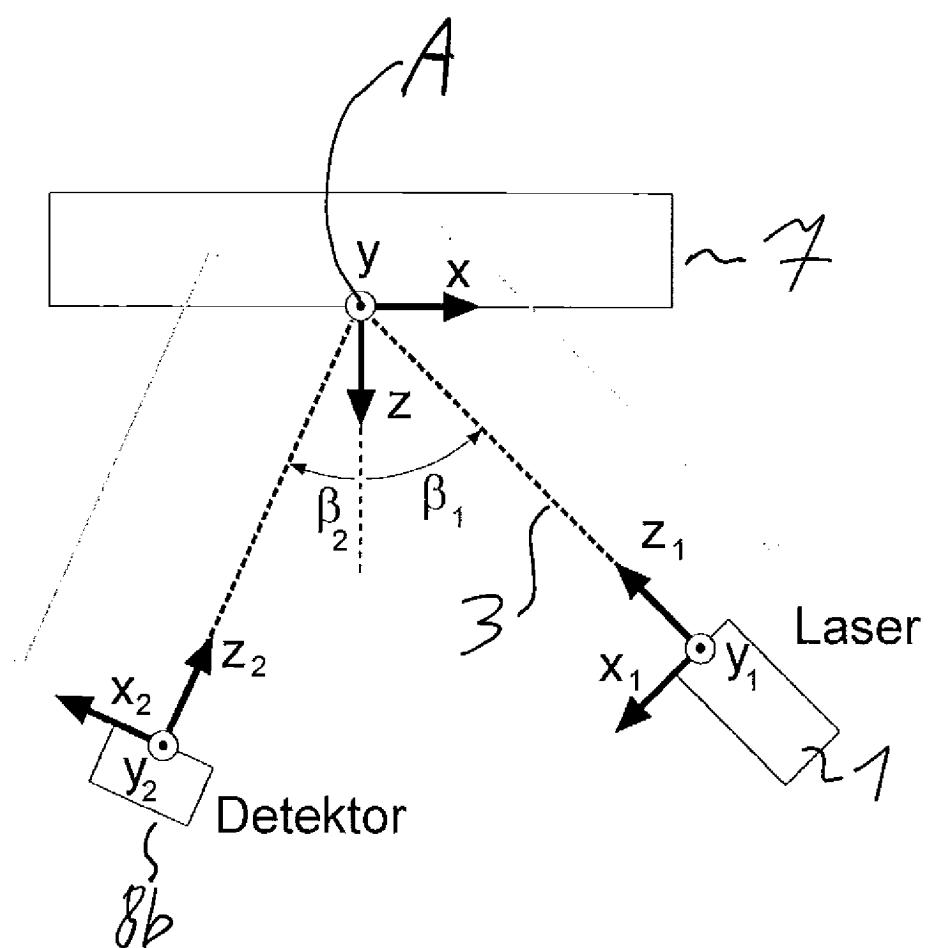
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 13,

dadurch gekennzeichnet,

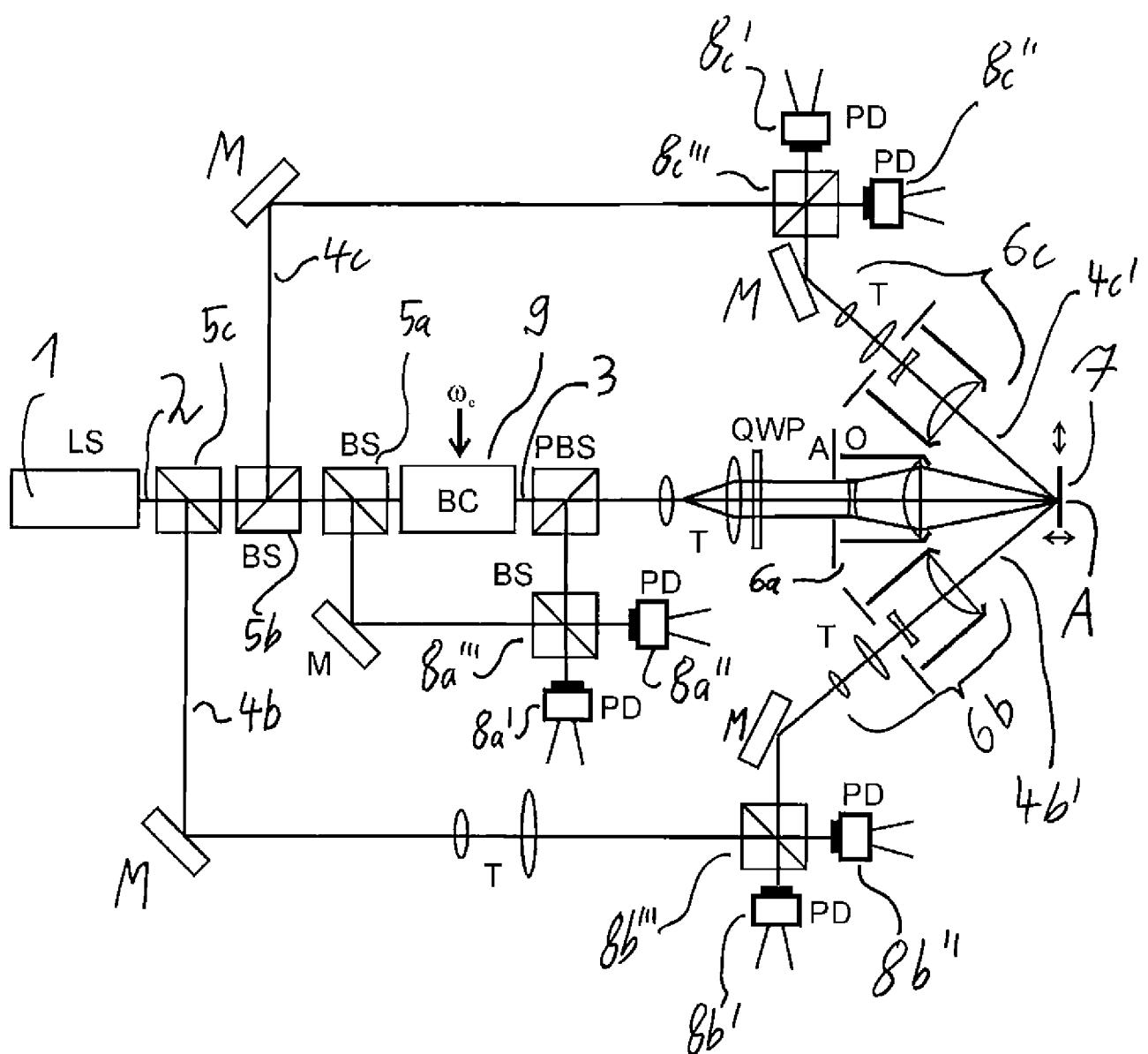
dass die Messsignale des ersten Detektors phasenmoduliert werden, für eine Auswertung einer Auslenkung der Oberfläche des Objekts und

Anhängende Zeichnungen

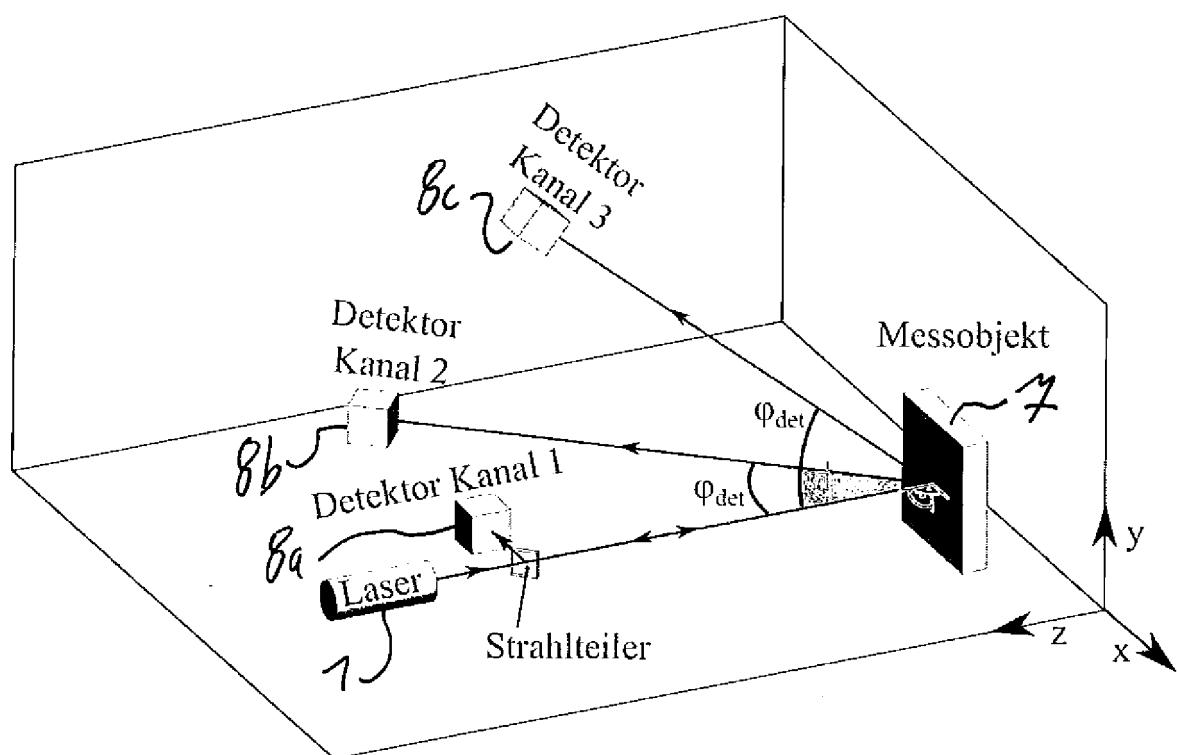
Figur 1



Figur 2

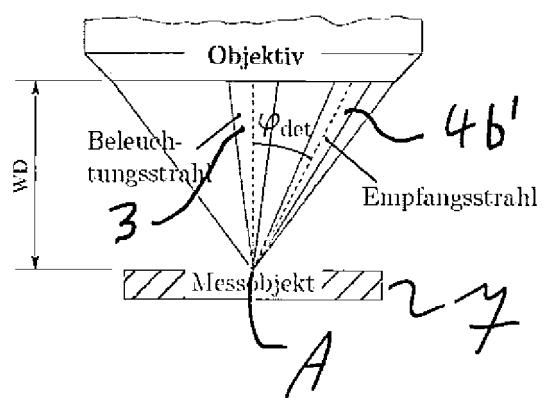


Figur 3



Figur 4

a)



b)

