



(10) **DE 10 2004 026 193 B4** 2012.03.29

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2004 026 193.8**
(22) Anmeldetag: **28.05.2004**
(43) Offenlegungstag: **22.12.2005**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **29.03.2012**

(51) Int Cl.: **G01B 11/24 (2006.01)**
G01B 11/14 (2006.01)
G01B 9/02 (2006.01)
G01B 11/30 (2006.01)

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:
Carl Mahr Holding GmbH, 37073, Göttingen, DE

(74) Vertreter:
Rüger und Kollegen, 73728, Esslingen, DE

(72) Erfinder:
Lehmann, Peter, Dr.-Ing., 37085, Göttingen, DE

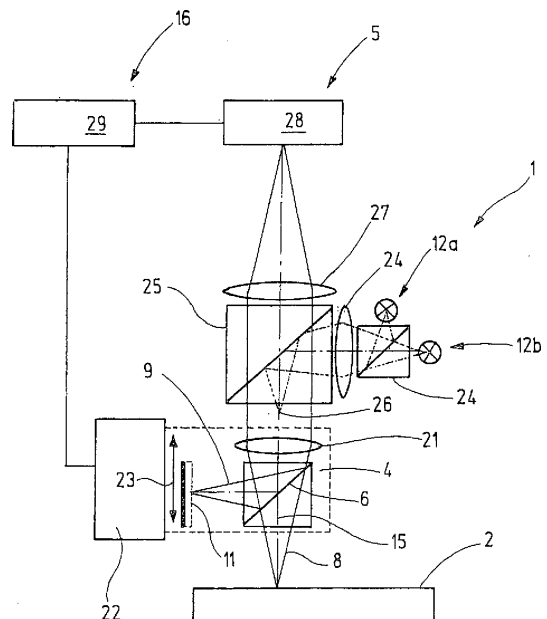
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE	102 49 409	A1
US	6 330 065	B1
US	4 832 489	A
EP	0 506 296	A2

**K. Creath: Step height measurement using
two-wavelength phase-shifting interferometry,
in: Applied Optics, Vol. 26, No. 14, 1987, S. 2810 -
2816**

(54) Bezeichnung: **Messverfahren zur Formmessung**

(57) Hauptanspruch: Messverfahren zur Erfassung der Abweichung Δz des Abstandes z wenigstens eines Oberflächenpunktes (3) von einem Objektiv (4), wobei bei dem Messverfahren das Licht zweier Lichtquellen, deren Schwerpunktwellenlängen sich um die Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda$ unterscheiden und die eine unterschiedliche Bandbreite aufweisen, in einen Messstrahl und in einen Referenzlichtstrahl aufgespalten und nach Reflektion an dem Oberflächenpunkt (3) wieder zusammengeführt und an einem Photoempfänger (5) zur Interferenz gebracht wird, wobei zur Durchführung der Messung die Länge des Messlichtwegs (8), den der Messstrahl durchläuft, verändert wird und wobei währenddessen der Photoempfänger (5) ein zeitvariantes Messsignal abgibt, das spektrale Anteile enthält, von denen wenigstens zwei durch eine Rechenschaltung (16) oder durch Zeitversatz extrahiert und zur Bestimmung der Abweichung Δz genutzt werden, indem aus einem Satz von Abtastwerten (s_{m+m_0}) des Messsignals für eine erste Signalfrequenz f_0 und für eine zweite Signalfrequenz $f_0 + \Delta f$ die jeweils zugeordneten Phasenwinkel φ_{1e} und φ_{2e} bestimmt werden und daraus die Abweichung...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Messverfahren zur Erfassung der Form einer Werkstückoberfläche auf interferometrischem Wege sowie eine entsprechende Messeinrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

[0002] Zur Abstands- oder auch Formmessung werden in der Praxis häufig interferometrische Verfahren eingesetzt, mit deren Hilfe der Abstand eines Punkts oder eines Punktfelds einer Oberfläche zu einer Messeinrichtung bestimmt wird. Dabei können sich Schwierigkeiten ergeben, wenn die Werkstückoberfläche Sprünge oder Kanten enthält oder wenn die abzubildende Form so groß ist, dass sie entweder die Schärfentiefe oder den Messbereich des Messgeräts übersteigt.

[0003] Beispielsweise ist aus der US-PS 5 133 601 ein der Weißlichtinterferometrie zuzurechnendes Verfahren zur Bestimmung eines Oberflächenprofils geoffenbart. Die Messeinrichtung beruht auf einem Zweistrahlinterferometer mit einem Messzweig und einem Referenzzweig. Eine Interferenz ist nur dann zu verzeichnen, wenn sich die optischen Weglängen zwischen der Objektwelle und der Referenzwelle sich um weniger als die Kohärenzlänge des verwendeten Lichts unterscheiden. Wegen der Verwendung weißen Lichts ergibt sich somit eine sehr geringe Tiefenauflösung der Messeinrichtung.

[0004] Aus der US-PS 5 398 113 ist ein ebenfalls der Weißlichtinterferometrie zuzurechnendes Verfahren bekannt, bei dem das Objekt durch ein Zweistrahlinterferometer hindurch mit einer Kamera beobachtet wird. Als Lichtquelle wird eine vielfarbige oder weiße Lichtquelle verwendet. Die von der Kamera aufgenommenen Bilder sind Interferenzbilder. Das Interferenzbild ändert sich bei einer Relativbewegung des Objektivs und des Werkstücks in Z-Richtung. Somit entstehen an den einzelnen Pixeln der Kamera Signale, die pixelweise einer digitalen Fourier-Analyse unterworfen werden.

[0005] Aus "Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry", Kathreen Creath, Applied Optics, Vol. 26, No. 14, 15. Juli 1987, Seite 2810 ist die Messung von Oberflächen mittels zweier verschiedener Wellenlängen λ_a und λ_b bekannt. Aus diesen Wellenlängen kann eine Schiebungswellenlänge gebildet werden, um Mehrdeutigkeiten der Interferenzbilder zu beseitigen. Hinsichtlich der Größe des Messbereichs ist das Verfahren auf die Schwebungswellenlänge bzw. ein Viertel hiervon begrenzt.

[0006] EP 05 06 296 A2 schlägt ein interferometrisches Messverfahren durch Licht mit mehreren Lichtwellenlängen $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ vor. Die Lichtquellen weisen im Wesentlichen identische Bandbreiten auf.

[0007] Mit der digitalen Fourier-Analyse werden diskrete Frequenzen eines Spektrums erfasst, wobei die diskreten Frequenzen nicht beliebig dicht liegen können. Es ergibt sich dadurch eine begrenzte Tiefenauflösung. Des Weiteren können sich Probleme an Körperkanten oder -stufen ergeben.

[0008] Daraus leitet sich die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe ab, ein Messverfahren zur Erfassung des Höhenprofils oder der Form eines Werkstücks auf interferometrischer Basis zu schaffen, das mit geringem apparatetechnischen Aufwand auskommt und eine gute Messgenauigkeit erzielt.

[0009] Diese Aufgabe wird mit dem Messverfahren nach Anspruch 1 gelöst: Erfindungsgemäß werden zur Beleuchtung des Objekts zwei Lichtquellen eingesetzt, deren mittlere Wellenlängen (Schwerpunktwellenlängen) sich um $\Delta\lambda$ unterscheiden. Vorzugsweise werden die Lichtquellen zeitversetzt aktiviert oder deaktiviert. Der Unterschied zwischen den Schwerpunktwellenlängen beträgt vorzugsweise weniger als 1 nm bis hin zu ca. 200 nm.

[0010] Geeignetes Licht kann durch die Aufeinanderführung von Lichtstrahlen mehrerer, bei unterschiedlichen Wellenlängen emittierender Lichtquellen erzeugt werden. Wird die spektrale Breite der zur Messung verwendeten Spektrallinien ausreichend groß gewählt, resultieren Schwebungssignale, deren Nebenmaxima im Vergleich zum Hauptmaximum stark abfallende Amplituden aufweisen, so dass durch Auswertung der Amplitude des gemessenen Schwebungssignals die Höhenlage eines zugehörigen Objektpunktes grob eingegrenzt werden kann. Die diskreten Wellenlängenanteile werden im Gegensatz zu bekannten Zwei- oder Mehrwellenlängen-Verfahren nicht durch physikalische Filterung gewonnen sondern durch eine geeignete rechnerische Signalauswertung, die aus dem gemessenen, aus den überlagerten Anteilen bestehenden Signal die gewünschten Frequenzen extrahiert. Dies geschieht nicht durch Bestimmung des Spektrums des erhaltenen Signals, wie es bei Anwendung der Fourier-Analyse der Fall wäre, sondern durch gezielte mathematische Herausfilterung von vorzugsweise lediglich zwei spektralen Anteilen aus dem Messsignal. Im Gegensatz zu bisherigen Verfahren, die beispielsweise auf der Fourier-Analyse beruhen, können damit die untersuchten Frequenzen beliebig

dicht aneinander heran gelegt werden, d. h. die Signalfrequenzdifferenz Δf kann beliebig klein gemacht werden. Dadurch können bei Messgenauigkeiten im Nanometerbereich Tiefenmessbereiche von deutlich mehr als 300 μm erreicht werden. Höhenänderungen, die über diesen Wert hinausgehen, können im Allgemeinen mittels einer Fokusüberwachung erfasst und eindeutig zugeordnet werden. Mit dem erfindungsgemäßen Messverfahren lassen sich somit Oberflächen mit starker Profilierung untersuchen, die sich bislang einer interferometrischen Vermessung entzogen haben. Das Verfahren ist wenig oder nicht anfällig gegenüber Diskontinuitäten, Oberflächensteigungen und -krümmungen des Messobjekts und 2π -Phasensprüngen. Es ist insoweit robust, einfach und präzise. Des Weiteren spielt die Oberflächenbeschaffenheit des zu untersuchenden Werkstücks eine untergeordnete Rolle. Es sind sowohl optische Oberflächen als auch diffus streuende Oberflächen untersuchbar. Aufgrund der Verwendung farbigen, nicht monochromatischen aber sehr schmalbandigen Lichts spielen Reflexionseigenschaften von Werkstückoberflächen eine untergeordnete Rolle.

[0011] Bei Verwendung zweier im Zeit-Multiplex-Betrieb getakteter Lichtquellen, die somit abwechselnd leuchten, vereinfacht sich die Signalauswertung. Es wird somit abwechselnd zunächst ein Kamerabild unter Verwendung der ersten Lichtquelle und anschließend ein Kamerabild unter Verwendung der zweiten Lichtquelle eingelesen. Dabei kann die optische Weglängendifferenz zwischen Mess- und Referenzstrahl während der beiden Bildaufnahmen konstant bleiben oder sie kann sich um das Abtastintervall Δl ändern.

[0012] Die wechselweise Abtastung, d. h. die Ausnutzung eines Zeitversatzes zwischen den Aktivitäten der beiden Lichtquellen gestattet die Trennung der spektralen Anteile der beiden Lichtquellen bei der Bildauswertung auf einfachste Weise. Es können die Phasenlagen der Interferenzsignale für die beiden Schwerpunktwellenlängen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Über die Phasendifferenz und die bekannte, aus den Signalen zu ermittelnde synthetische Wellenlänge Λ ergibt sich der erste Schätzwert für die Höhenlage mit einem Eindeutigkeitsbereich von $\pm\Lambda/4$. Die genauere Schätzung der Höhenlage erfolgt dann auf der Grundlage einer der beiden Schwerpunktwellenlängen λ_1 oder λ_2 . Wenn die Höhendifferenz eines Objekts $\pm\lambda_1/4$ oder $\pm\lambda_2/4$ überschreitet, gestattet das erfindungsgemäße Verfahren eine weitaus zuverlässigere und/oder genauere Topographieerfassung als die bekannten Verfahren. Zudem ist der gerätetechnische Aufwand im Vergleich zur konventionellen Mehrwellenlängen-Interferometrie gering.

[0013] Vorzugsweise werden schnell schaltbare Lichtquellen, wie beispielsweise halbleiterbasierte Lichtquellen (Laserdioden, LEDs, Superlumineszenzdioden) verwendet. Ein Vorteil der wechselweisen Abtastung besteht darin, dass sich die Spektren der einzelnen Lichtquellen in weiten Bereichen überlappen können und sich lediglich in ihren Schwerpunktwellenlängen unterscheiden müssen. Dies erlaubt es, mit geringem Aufwand Signale mit Schwerpunktwellenlängendifferenzen im Nanometerbereich zu erzeugen. Mindestens eine der beiden verwendeten Lichtquellen ist kurzkohärent, so dass sich mit dem erfindungsgemäßen Verfahren die Vorteile der Zweiwellenlängen-Interferometrie und die Vorteile der Weißlichtinterferometrie miteinander verbinden lassen. Es wird zunächst die Höhenlage des Objekts mittels einer aus der Weißlichtinterferometrie bekannten Kohärenzpeak-Auswertung vergleichsweise grob eingegrenzt werden. In einem zweiten Schritt kann dann die Phasenlage der synthetischen Wellenlänge relativ zu der Position des Kohärenzpeaks genutzt werden, um die Höhenlage des betroffenen Messpunkts weiter einzugrenzen. In einem dritten Schritt wird dann die Höhenlage mit einer der beiden oder mit beiden Schwerpunktwellenlängen genau bestimmt.

[0014] Die zur Auswertung heran gezogene Frequenzdifferenz Δf betrifft die Signalfrequenz. Sie ist so festgelegt, dass die dementsprechende Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda$ der Lichtquelle in dem am meisten zu bevorzugenden Fall kleiner als 100 nm ist. Dadurch ergibt sich eine synthetische Wellenlänge Λ , die im Bereich von wenigen μm bis zu einigen Hundert μm liegen kann. Damit ergibt sich eine extrem gute Tiefenauflösung für das erfindungsgemäße Messverfahren mit einem großen Eindeutigkeitsbereich.

[0015] Außerdem können unstabilisierte Lichtquellen verwendet werden. Eine mögliche Drift der mittleren Lichtwellenlänge des verwendeten Lichts ist unkritisch, da die für die Auswertung heran gezogenen mittleren Wellenlängen aus den Signalverläufen ermittelt werden können. Die Verwendung schmalbandiger Lichtquellen hat darüber hinaus den Vorteil, dass sich die beobachteten Interferenzen über einen vergleichsweise großen Höhenbereich des Objekts erstrecken, so dass das Auffinden des Messbereichs im Allgemeinen unproblematisch ist. Außerdem steht eine im Vergleich zur Weißlichtinterferometrie größere Anzahl von Signalperioden für die Auswertung zur Verfügung, wodurch sich eine größere Messgenauigkeit erreichen lässt. Die Vermessung kann auch linienförmig erfolgen.

[0016] Einzelheiten des erfindungsgemäßen Verfahrens sowie einer entsprechenden Vorrichtung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung, ggf. in Verbindung mit der beigefügten Zeichnung und/oder Unteransprüchen. In der Zeichnung sind Ausführungsbeispiele der Erfindung veranschaulicht. Es zeigen:

[0017] **Fig. 1** eine Vorrichtung zur Formmessung in einer schematischen Darstellung, die mit nur einer Lichtquelle kein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist,

[0018] **Fig. 2** und **Fig. 3** erfindungsgemäße Ausführungsformen von Messvorrichtungen zur Durchführung eines Messverfahrens in schematischer Darstellung,

[0019] **Fig. 4** Spektren verschiedener, zur Beleuchtung eingesetzter Lichtquellen,

[0020] **Fig. 5** und **Fig. 6** Zeitschemata für den Betrieb der Lichtquellen und für die Bildaufnahme als Zeitdiagramm.

[0021] In **Fig. 1** ist eine Vorrichtung zur Formmessung in aufs Äußerste schematisierter Darstellung veranschaulicht. Zu der Vorrichtung gehört ein Interferometer **1**, das beispielsweise als interferometrisches Mikroskop ausgebildet sein kann. Es dient zur Vermessung einer Objektoberfläche **2**. Die Vermessung erfolgt entweder punktweise oder, wie es bevorzugt wird, flächenhaft. Dazu wird eine Matrix von Oberflächenpunkten **3** von einem Objektiv **4** erfasst und über das Interferometer **1** auf einem Kameraschaltkreis **5** abgebildet.

[0022] Zu dem Interferometer **1** gehören außerdem ein Strahlteiler **6**, der einen Messlichtweg **8**, in dem das Objektiv **4** angeordnet ist, und einen Referenzlichtweg **9** festlegt. In dem Referenzlichtweg **9** ist ein Spiegel **11** angeordnet, während die Objektoberfläche **2** in dem Messlichtweg **8** angeordnet ist. Beide Lichtwege unterscheiden sich um weniger als die Kohärenzlänge der verwendeten Lichtquelle **12**. Als solche wird eine schmalbandige nahezu monochromatische Lichtquelle, wie beispielsweise eine Leuchtdiode **14** oder dergleichen, verwendet. Die Leuchtdiode **14** erzeugt ein schmalbandiges Spektrum, dessen Breite nur wenige Nanometer beträgt. Die Breite des diskreten Spektrums ist dabei so gering, dass in der Fourier-Rücktransformation eine Schwebung auftreten würde. Wird die spektrale Breite der zur Messung verwendeten Spektrallinien ausreichend groß gewählt, resultieren Schwebungssignale, deren Nebenmaxima im Vergleich zum Hauptmaximum stark abfallende Amplituden aufweisen, so dass durch Auswertung der Amplitude des gemessenen Schwebungssignals die Höhenlage eines zugehörigen Objektpunktes grob eingegrenzt werden kann.

[0023] Mit einer nicht weiter veranschaulichten Vorrichtung kann das Interferometer **1** gegen die Objektoberfläche **2** in Richtung der optischen Achse **15** bewegt werden. Diese steht im Wesentlichen senkrecht zu der Objektoberfläche **2**. Die von der optischen Achse **15** festgelegte Richtung wird auch als Z-Richtung bezeichnet. Ziel der durchzuführenden Messung ist es, Abweichungen Δz der in Z-Richtung zu messenden Höhe des Oberflächenpunkts **3** (sowie benachbarte Oberflächenpunkte) von einem gegebenen Grundabstand Z zwischen dem Objektiv **4** und der Objektoberfläche **2** zu bestimmen.

[0024] Dazu dient eine Auswerteschaltung **16**, die als Rechenschaltung ausgebildet ist. Ihre einzelnen Blöcke können durch ein geeignetes Rechnerprogramm realisiert werden. Die Auswerteschaltung **16** wird nachfolgend anhand ihrer Funktion näher beschrieben:

Die in der Zeichnung dargestellte Auswerteschaltung **16** enthält ein entsprechendes Auswerteprogramm, das für jeden Pixel des Kameraschaltkreises **5** oder ggf. auch für zu Pixelgruppen zusammengefasste Pixel die nachfolgend beschriebenen Operationen durchführt. Die Auswerteschaltung enthält zunächst einen Block **17**, der an seinem Eingang das von dem jeweils betrachteten Pixel gelieferte Intensitätssignal als Messsignal s empfängt. Dies geschieht beispielsweise periodisch beim Auslesen des Kameraschaltkreises **5** oder auch als kontinuierliches Signal. An seinem Ausgang gibt der Block **17** das abgetastete Intensitätssignal s_n ab. Ohne Relativbewegung zwischen der Werkstückoberfläche **2** und dem Interferometer **1** ändert sich das Intensitätssignal nicht. Bei Durchführung der Messung ist jedoch eine Relativbewegung in Z-Richtung (stimmt mit Richtung der optischen Achse **15** überein) vorhanden. Die während der Bewegung gelieferten Abtastwerte s_n werden an einen Block **18** geliefert. Dieser multipliziert die Abtastwerte s_n des Messsignals zunächst mit einer geeigneten Fensterfunktion der Breite $2M$. Als Fensterfunktion eignet sich eine Funktion, die nur in einem vorgegebenen Zeitfenster liegende Werte zulässt und außerhalb liegende Werte ausblendet. Vorzugsweise werden dabei die an den Fensterrändern liegenden Werte geringer gewichtet. Beispielsweise kann ein Fenster zur Anwendung kommen, das einer Glockenkurve oder einer β -Verteilungskurve ähnelt. Außerhalb der $2M$ -Abtastwerte nimmt die Fensterfunktion den Funktionswert 0 an. In einem weiteren Rechenschritt wird aus den Produkten der Fensterfunktion und den Abtastwerten eine komplexwertige Summe mit nachfolgender Gleichung bestimmt:

$$S(f_0) = \sum_{m=-M}^M s_{m+n_0} w_m \exp[-j2\pi f_0(m+n_0)/N]$$

[0025] Dabei ist $S(f_0)$ eine komplexwertige Funktion einer gewählten ersten Signalfrequenz. N ist die Gesamtzahl der Abtastwerte s_n des Messsignals. n_0 ist der Abtastwert um den die vorzugsweise symmetrische Fensterfunktion zentriert ist. w_m ist der m -te Abtastwert, der um den 0-ten Abtastwert zentrierten Fensterfunktion. f_0 ist die normierte Signalfrequenz. Sie entspricht der Anzahl der Signalperioden, innerhalb des Abtastfenster, das N -Abtastwerte umfasst.

[0026] Block **18** bestimmt in einem weiteren Rechenschritt die komplexwertige Summe:

$$S(f_0 + \Delta f) = \sum_{m=-M}^M s_{m+n_0} w_m \exp[-j2\pi(f_0 + \Delta f)(m + n_0)/N]$$

für eine um Δf verschobene Signalfrequenz.

[0027] Aus beiden komplexwertigen Summen bildet ein nachgeschalteter Block **19** die Phasenwerte φ_{1e} und φ_{2e} nach nachfolgenden Beziehungen:

$$\varphi_{1e} = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}\{S(f_0)\}}{\operatorname{Re}\{S(f_0)\}}\right)$$

$$\varphi_{2e} = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}\{S(f_0 + \Delta f)\}}{\operatorname{Re}\{S(f_0 + \Delta f)\}}\right)$$

[0028] Die oben angegebene Frequenzdifferenz Δf korrespondiert zu einer Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda$. Für die Signalfrequenz f_0 gilt:

$$f_0 = \frac{NZ}{\lambda_0/2} = \frac{2\nu_0 N}{\lambda_0 f_{\text{frame}}}$$

mit dem Abtastintervall $Z = \nu_0/f_{\text{frame}}$.

[0029] Dabei ist ν_0 die Scangeschwindigkeit mit der sich die optische Weglängendifferenz ändert. f_{frame} ist die Bildaufnahme Frequenz der Kamera. λ_0 ist eine erste Lichtwellenlänge innerhalb des schmalbandigen Spektrums der Lichtquelle. Eine zweite Wellenlänge $\lambda_0 + \Delta\lambda$, die ebenfalls innerhalb des Wellenlängenspektrums der Lichtquelle liegt, führt auf eine zweite Frequenzkomponente bei $f_0 + \Delta f$, wobei die gesuchte Frequenzänderung

$$\Delta f = -\frac{2\nu_0 N}{(\lambda_0 + \Delta\lambda/2)^2 f_{\text{frame}}} \Delta\lambda$$

beträgt. Sie ist im Allgemeinen weitaus kleiner als die bei der diskreten Fourier-Transformation resultierende Diskretisierungsschrittweite.

[0030] Sind die Phasenwerte φ_{1e} und φ_{2e} bestimmt kann mittels folgender Gleichung ein erster Schätzwert Δz_{syn} für die Höhendifferenz Δz bestimmt werden:

$$\Delta z = \Delta L/2 = \frac{\Lambda \Delta\varphi}{4\pi}$$

dabei gilt für die synthetische Wellenlänge Λ :

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$$

[0031] ΔL ist dabei die Weglängendifferenz zwischen Referenzstrahl und Messstrahl ($\Delta L = l_1 - l_2$). Der Vollständigkeit wegen sei angemerkt, dass φ_1 die Phasendifferenz zwischen Objekt und Referenzwelle ist:

$$\varphi_1 = 2\pi\Delta L/\lambda_1$$

[0032] Dies bezieht sich auf die Lichtwellenlänge λ_1 . Für die zweite Lichtwellenlänge λ_2 gilt:

$$\varphi_2 = 2\pi\Delta L/\lambda_2$$

[0033] Somit gilt für die Phasendifferenz $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi\Delta L \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = 2\pi\Delta L / \Lambda$$

[0034] Nach der Bestimmung des ersten Schätzwerts Δz_{syn} für die Höhendifferenz lässt sich ein verbesserter Schätzwert finden, indem gemäß der Bedingung

$$\left| m\lambda_0/2 + \varphi_{1e} \frac{\lambda_0}{4\pi} - \Delta z_{\text{syn}} \right| = \text{Minimum}$$

zunächst ein geeignetes ganzzahliges Vielfaches m_0 bestimmt wird, so dass sich der gesuchte Schätzwert Δz_{hr} aus:

$$\Delta z_{\text{hr}} = m_0\lambda_0/2 + \varphi_{1e}\lambda_0/(4\pi)$$

ergibt. Somit ist die gesuchte Höhenabweichung Δz bestimmt.

[0035] Der vorgestellte Algorithmus kann für alle Bildpunkte des Kameraschaltkreises durchgeführt werden.

[0036] Ein Vorteil des vorgestellten Verfahrens im Vergleich zu den gebräuchlichen Zwei-Wellenlängenverfahren besteht darin, dass die Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda$ sehr gering gewählt werden kann, weil die diskreten Wellenlängenanteile nicht physikalisch, z. B. mittels eines Spektrometers, aus dem Signal extrahiert werden müssen. Daraus resultiert ein großer Eindeutigkeitsbereich. Für $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$ und $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ ergibt sich eine synthetische Wellenlänge Λ von $640 \mu\text{m}$ und folglich ein Eindeutigkeitsbereich bezüglich der Höhenänderung Δz von $\pm 160 \mu\text{m}$. Höhenänderungen, die über diesen Wert hinausgehen, können im Allgemeinen mittels einer Fokusüberwachung erfasst und eindeutig zugeordnet werden.

[0037] In [Fig. 2](#) ist eine abgewandelte Messeinrichtung veranschaulicht, die als Interferometer **1** ein Michelson-Interferometer nutzt und die mit zwei Lichtquellen ein Ausführungsbeispiel der Erfindung darstellt. Zu diesem gehört ein Objektiv **4** mit einem Strahlteiler **6** sowie einer Linse **21**. Die Lichtquellen werden in die Eingangspupille der Linse **21** abgebildet. Der Strahlteiler **6** dient dazu, den Referenzlichtweg **9** und den Messlichtweg **8** zu trennen und wieder zusammen zu führen. Dem Referenzlichtweg **9** ist der Spiegel **11** zugeordnet. Das Objektiv **4** ist an einer Positioniereinheit **22** gehalten, um dieses in Richtung des Pfeils **23** im Wesentlichen rechtwinklig zu der Objektoberfläche **2** verfahren zu können. Jedoch sei angemerkt, dass an Stelle des Objektivs auch der Referenzspiegel, das gesamte Interferometer oder auch das Messobjekt bewegt werden kann, um die benötigte Folge von Interferenzbildern aufzuzeichnen.

[0038] Licht kommt aus zwei einzelnen Lichtquellen **12a**, **12b**. Diese sind über einen Strahlteiler **24** an einem gemeinsamen optischen Pfad angeschlossen, in dem ein Kondensator **24** angeordnet ist. Ein weiterer Strahlteiler **25**, der auf den Kondensator **24** folgt, spiegelt das Licht der Lichtquelle **12** auf die Eintrittspupille **26** des Objektivs **4**. Außerdem ist an den Strahlteiler **25** über eine Tubuslinse **27** der Photoempfänger **5** in Form eines Detektorarrays **28** angeschlossen. Dieses wird beispielsweise durch eine Pixelkamera mit 800×600 Pixel gebildet.

[0039] An den Photoempfänger **5** ist die Auswerteschaltung **16** angeschlossen, die im vorliegenden Ausführungsbeispiel durch einen Digitalrechner **29** gebildet wird.

[0040] Eine Besonderheit des vorstehend beschriebenen Interferometers **1** besteht in der Ausbildung der Lichtquellen **12a**, **12b**. Diese sind vorzugsweise als kurzkohärente, mehr und weniger schmalbandige Licht-

quellen ausgebildet, deren Spektren aus [Fig. 4](#) hervorgehen. Die Lichtquellen **12a**, **12b** können beispielsweise durch Leuchtdioden gebildet sein. Wird die ausgesandte Intensität über der Wellenlänge des emittierten Lichts aufgetragen, weisen sie Spektren auf, die sich überlappen können. Ihre Schwerpunktwellenlängen λ_1 , λ_2 unterscheiden sich um einen Betrag $\Delta\lambda$, der von weniger als 1 nm bis hin zu 200 nm reichen kann. Insbesondere kann die Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda$ kleiner sein als die Breite des Einzelspektrums.

[0041] Die Lichtquellen **12a**, **12b** können prinzipiell gleichzeitig leuchten, wobei dann der vorstehend erläuterte Algorithmus abgearbeitet wird. Es ist jedoch vorteilhaft, die Lichtquellen **12a**, **12b** zeitversetzt, vorzugsweise alternierend zu aktivieren, wie es in [Fig. 5](#) als Diagramm der Beleuchtung B über der Zeit t veranschaulicht ist. Während die Lichtquelle **12a** leuchtet, ist die Lichtquelle **12b** dunkel und umgekehrt.

[0042] Auf dem Detektorarray **28** kommt es zur Interferenz von Objektwelle und Referenzwelle und zwar unabhängig davon, welche der Lichtquellen **12a**, **12b** leuchtet. Die interferometrische Messung erfolgt nun dadurch, dass das Objektiv **4** mittels der Positioniereinheit **22** entlang der optischen Achse **15** bewegt wird. Für verschiedene äquidistante Höhenpositionen des Objektivs **4** werden Interferenzbilder aufgezeichnet und von dem Digitalrechner **29** ausgewertet. Dabei wird im einfachsten Fall die Positioniereinheit **22** zur Bildaufnahme jeweils gestoppt, wobei zunächst ein Bild mit Beleuchtung durch die Lichtquelle **12a** und dann ein Bild mit Beleuchtung durch die Lichtquelle **12b** aufgenommen wird. Aus der Bildfolge, die durch die Verstellung des Objektivs **4** mittels der Positioniereinheit **22** erhalten wird, wird anhand der bekannten synthetischen Wellenlänge Λ ein erster Schätzwert für die Phasendifferenz $\Delta\phi$ bestimmt. Außerdem können die Phasenlagen der Interferenzsignale für die beiden Schwerpunktwellenlängen λ_1 , λ_2 mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Aus der Phasenlage $\Delta\phi$ kann ein erster Schätzwert Δz für die Höhenlage ermittelt werden. Nach der Bestimmung des ersten Schätzwerts Δz_{syn} für die Höhendifferenz lässt sich ein verbesserter Schätzwert anhand der weiter oben angegebenen Minimalbedingung finden. Der gesuchte Schätzwert Δz_{hr} wird dann, wie ebenfalls oben angegeben, berechnet.

[0043] Ist ΔL das Scanintervall, das zwischen einer Bildaufnahme mit der Schwerpunktwellenlänge λ_1 und einer Bildaufnahme mit der Schwerpunktwellenlänge λ_2 zurückgelegt wird, so ist von dem berechneten Phasenwert ϕ_{2e} zunächst ein konstanter Offset

$$\Delta\phi_2 = 4\pi\Delta L/\lambda_2$$

zu subtrahieren, bevor die Phasendifferenz $\Delta\phi$ bestimmt wird.

[0044] Es ist auch möglich, die Lichtquellen **12a**, **12b** alternierend zu deaktivieren, wie es in [Fig. 6](#) veranschaulicht ist. Dies hat insbesondere dann Bedeutung, wenn die Lichtquellen **12a**, **12b** eine gewisse Nachleuchtzeit haben und wenn diese mit hoher Taktfrequenz umgeschaltet werden. Die Bildaufnahme A erfolgt dann jeweils gemäß [Fig. 6](#) zu Zeitpunkten, indem lediglich eine der beiden Lichtquellen **12a**, **12b** leuchtet. Dies kann durch geeignete synchronisiertes Auslesen des Detektorarrays **28** erfolgen.

[0045] Wie in [Fig. 4](#) veranschaulicht, sind Lichtquellen **12a**, **12b** mit unterschiedlicher Bandbreite kombiniert. Damit lassen sich z. B. die Vorteile der Weißlichtinterferometrie mit den Vorteilen der Zweiwellenlängeninterferometrie verbinden. Beispielsweise kann für die Lichtquelle **12a** eine relativ breitbandige, farbige oder auch weiße Lichtquelle mit der Schwerpunktwellenlänge λ_1 und für die zweite Lichtquelle **12b** eine schmalbandige Lichtquelle mit der Schwerpunktwellenlänge λ_2 verwendet werden. Diese Anordnung ermöglicht es, zunächst die Höhenlage des Objekts mittels einer aus der Weißlichtinterferometrie bekannten Kohärenzpeak-Auswertung vergleichsweise grob einzugrenzen. Dazu wird der enge Z-Bereich genutzt, indem die Längenabweichung zwischen dem Messlichtweg **8** und dem Referenzlichtweg **9** geringer ist als die geringe Kohärenzlänge des weißen Lichts. Im zweiten Schritt wird die Phasenlage der synthetischen Wellenlänge relativ zur Position des Kohärenzpeaks genutzt, um die Höhenlage weiter einzugrenzen. In einem dritten Schritt wird die Höhenlage mit einer der beiden Schwerpunktwellenlängen oder anhand der beiden Schwerpunktwellenlängen genau bestimmt. Das dreischrittige Verfahren (erster Schritt: Eingrenzung des Lichtbereichs durch Kurzkohärenzpeak-Auswertung; zweiter Schritt: Bestimmung der Phasenlage der synthetischen Wellenlänge; dritter Schritt: Bestimmung des Z-Abstands anhand einer der Schwerpunktwellenlängen) ermöglicht die Erzielung eines Messbereichs der mehrere 100 μm groß ist und eine Auflösung von Bruchteilen eines Nanometers innerhalb dieses Messbereichs.

[0046] [Fig. 3](#) veranschaulicht eine weiter abgewandelte Ausführungsform der Messeinrichtung unter Verwendung eines Mirau-Interferometers zur Erzeugung der Interferenzbilder. Es wird unter Zugrundelegung gleicher Bezugszeichen auf die vorstehende Beschreibung verwiesen. Der Strahlteiler **6** steht rechtwinklig zu der opti-

schen Achse **15**. Der Spiegel **11** befindet sich auf der optischen Achse **15**. Ansonsten gilt die vorige Beschreibung in allen Varianten, auch hinsichtlich der Funktion entsprechend.

[0047] Ein interferometrisches Messverfahren zur Formerfassung basiert auf der interferometrischen Beobachtung einer Objektoberfläche unter Beleuchtung unterschiedlicher Bandbreite. Eine Relativbewegung zwischen dem Interferometer **1** und der Objektoberfläche **2** erzeugt an einem geeigneten Fotoempfänger, beispielsweise einem Kameraschaltkreis **5**, ein Messsignal, aus dem zwei dicht beieinander liegende Signalfrequenzen f_0 und $f_0 + \Delta f$ extrahiert werden. Die Phasendifferenz der beiden Signalanteile wird zur Bestimmung des Abstands bzw. der Abstandsänderung Δz herangezogen. Das Verfahren hat einen großen Eindeutigkeitsbereich und gestattet somit einen großen Tiefenmessbereich. Es lässt sich auch bei Werkstücken anwenden, deren Oberflächen Stufen aufweisen. An Körperkanten und -stufen wird die Messung nicht gestört. Es können auch stark geneigte Oberflächen untersucht werden, deren Neigung so groß ist, dass bei herkömmlichen, auf der Erzeugung und Auswertung von Interferenzlinien beruhenden Verfahren aufgrund einer zu hohen Interferenzliniendichte eine Messung nicht mehr möglich ist.

Patentansprüche

1. Messverfahren zur Erfassung der Abweichung Δz des Abstandes z wenigstens eines Oberflächenpunktes (**3**) von einem Objektiv (**4**), wobei bei dem Messverfahren das Licht zweier Lichtquellen, deren Schwerpunktwellenlängen sich um die Wellenlängendifferenz $\Delta \lambda$ unterscheiden und die eine unterschiedliche Bandbreite aufweisen, in einen Messstrahl und in einen Referenzlichtstrahl aufgespalten und nach Reflektion an dem Oberflächenpunkt (**3**) wieder zusammengeführt und an einem Photoempfänger (**5**) zur Interferenz gebracht wird, wobei zur Durchführung der Messung die Länge des Messlichtwegs (**8**), den der Messstrahl durchläuft, verändert wird und wobei währenddessen der Photoempfänger (**5**) ein zeitvariantes Messsignal abgibt, das spektrale Anteile enthält, von denen wenigstens zwei durch eine Rechenschaltung (**16**) oder durch Zeitversatz extrahiert und zur Bestimmung der Abweichung Δz genutzt werden, indem aus einem Satz von Abtastwerten (s_{m+m_0}) des Messsignals für eine erste Signalfrequenz f_0 und für eine zweite Signalfrequenz $f_0 + \Delta f$ die jeweils zugeordneten Phasenwinkel φ_{1e} und φ_{2e} bestimmt werden und daraus die Abweichung Δz errechnet wird, wobei zur Durchführung der Messung folgende Schritte erfolgen:

- mittels einer Kohärenzpeak-Auswertung wird ein erster grober Schätzwert Δz_{syn} für Δz für die Höhenlage des Objekts ermittelt und
- aus dem Schätzwert Δz_{syn} wird mit Hilfe des Phasenwinkels φ_{1e} ein verbesserter Schätzwert bestimmt, indem gemäß der Bedingung

$$\left| \frac{m\lambda_0}{2} + \varphi_{1e} \frac{\lambda_0}{4\pi} - \Delta z_{syn} \right| = \text{Minimum}$$

mit $m \in \{\dots, -1, 0, 1, 2, \dots\}$ ein geeignetes ganzzahliges Vielfaches m_0 bestimmt wird, wonach der verbesserte Schätzwert Δz_{hr} aus

$$\Delta z_{hr} = m_0 \lambda_0 / 2 + \varphi_{1e} \lambda_0 / 4\pi$$

bestimmt wird.

2. Messverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenzdifferenz Δf so festgelegt ist, dass sie einer Wellenlängendifferenz $\Delta \lambda$ der Lichtquelle(n) entspricht, die kleiner als 10 nm ist.

3. Messverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenzdifferenz Δf so festgelegt ist, dass sie einer Wellenlängendifferenz $\Delta \lambda$ der Lichtquelle(n) entspricht, die kleiner als 5 nm ist.

4. Messverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenzdifferenz Δf so festgelegt ist, dass sie einer Wellenlängendifferenz $\Delta \lambda$ der Lichtquelle(n) entspricht, die kleiner als 1 nm ist.

5. Messverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtquellen farbige Leuchtdioden sind.

6. Messverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtquellen zeitversetzt leuchten.

7. Messverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Photoempfänger (5) ausgelesen wird, wenn nur eine der Lichtquellen (12a, 12b) leuchtet.

8. Messverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das von dem Photoempfänger abgegebene zeitvariante Signal einer digitalen Filterung unterworfen wird.

9. Messverfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Filterung zwei Signalfrequenzen unterschieden werden, die sich um die Frequenzdifferenz Δf unterscheiden.

10. Messverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das zeitvariante Signal zu diskreten Zeitpunkten abgetastet wird, um ein diskretes Messsignal s_n zu erhalten, und dass die diskreten Messsignale s_n mit einer diskret vorgegebenen Fensterfunktion w_n sowie mit einem komplexen Schwingungsterm der Frequenz f bzw. $f + \Delta f$ der komplexen Frequenz multipliziert und zu einer komplexwertigen Funktion $S(f_0)$ bzw. $S(f + \Delta f)$ aufsummiert werden.

11. Messverfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Phasenlage des Signalanteils mit der Frequenz f bestimmt wird gemäß:

$$\varphi_{ie} = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}\{S(f_0)\}}{\operatorname{Re}\{S(f_0)\}}\right).$$

12. Messverfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Phasenlage des Signalanteils mit der Frequenz $f_0 + \Delta f$ bestimmt wird gemäß:

$$\varphi_{ie} = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}\{S(f_0 + \Delta f)\}}{\operatorname{Re}\{S(f_0 + \Delta f)\}}\right).$$

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

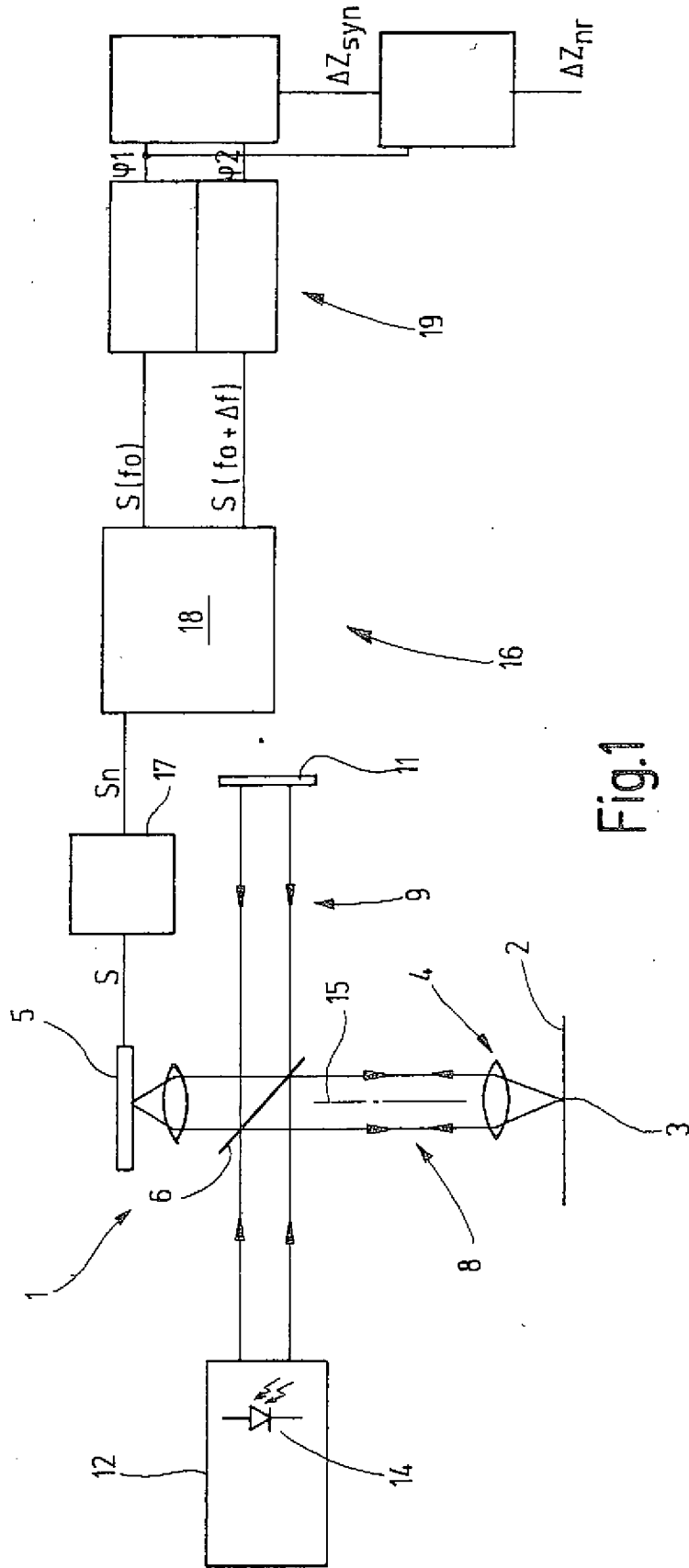


Fig.1

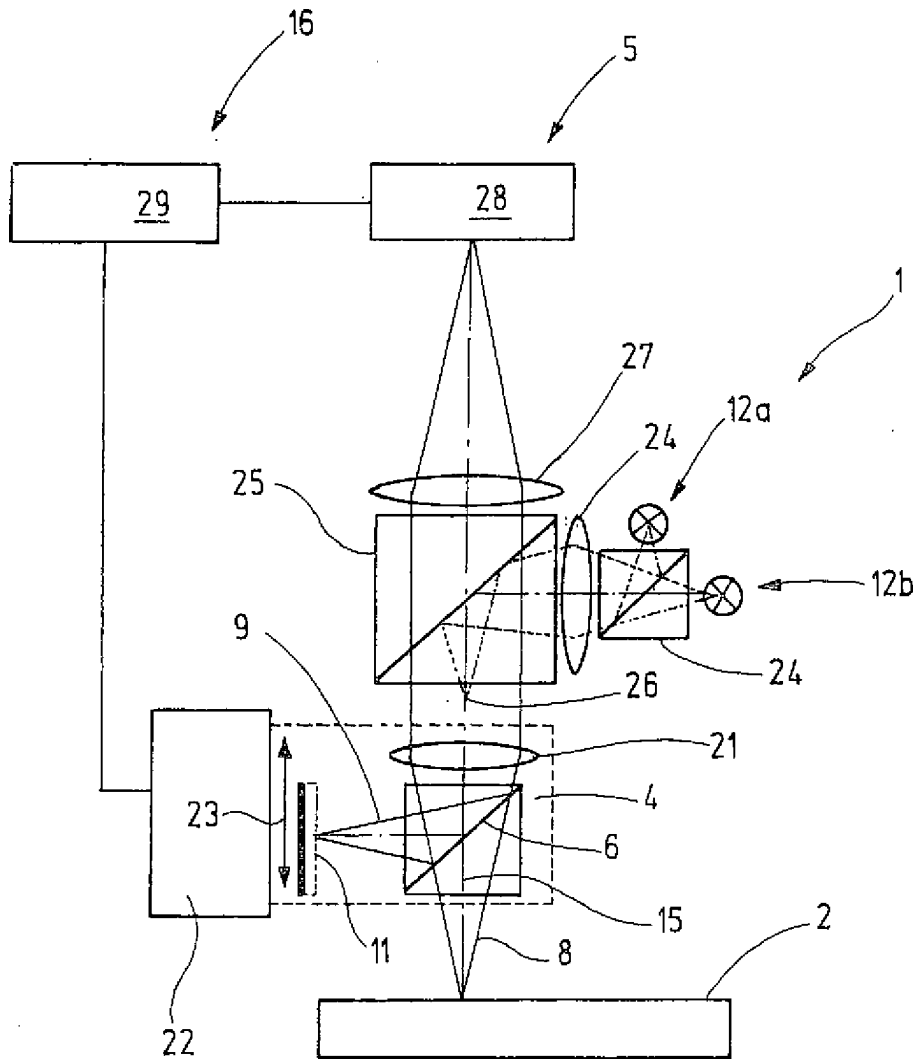


Fig.2

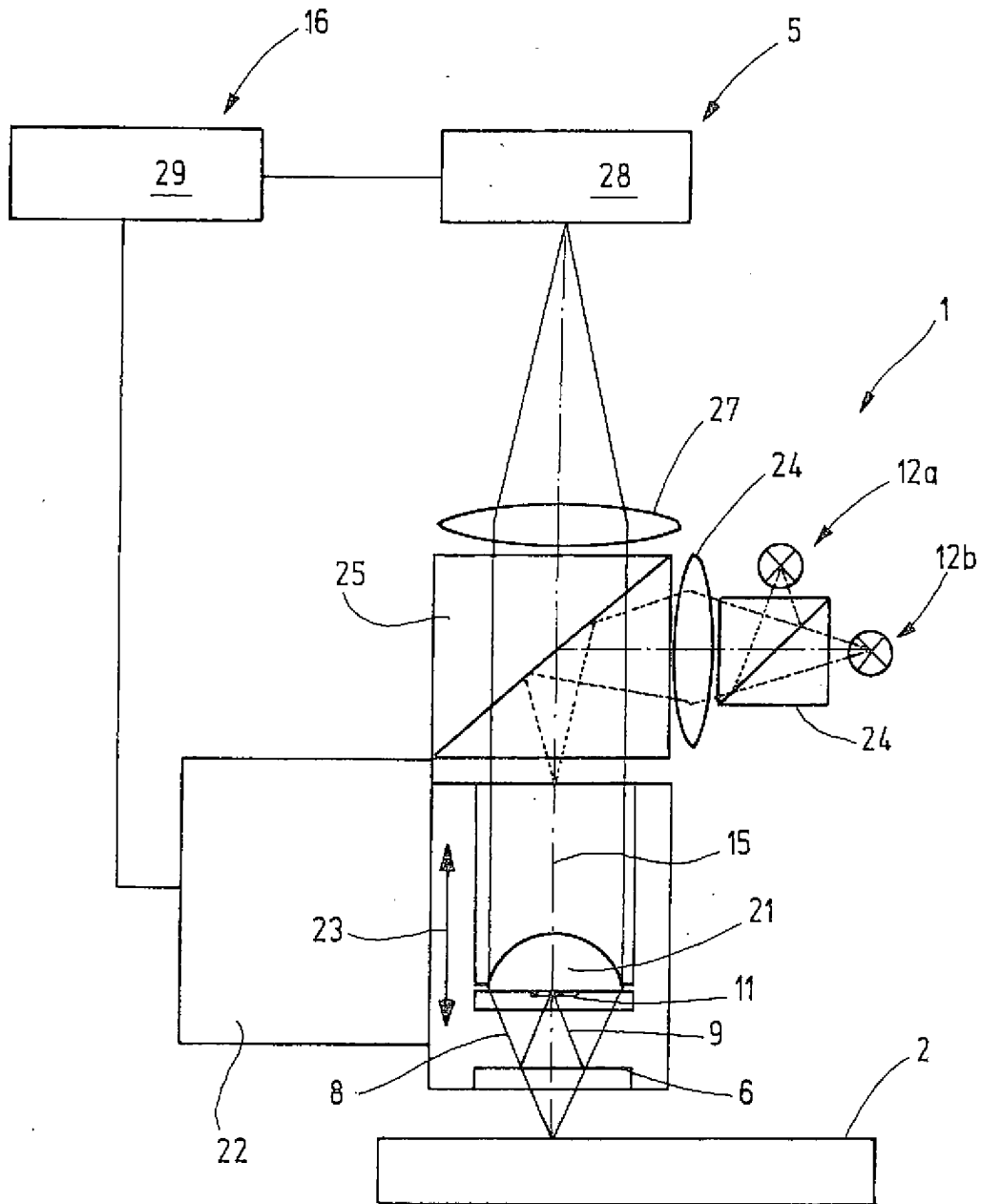
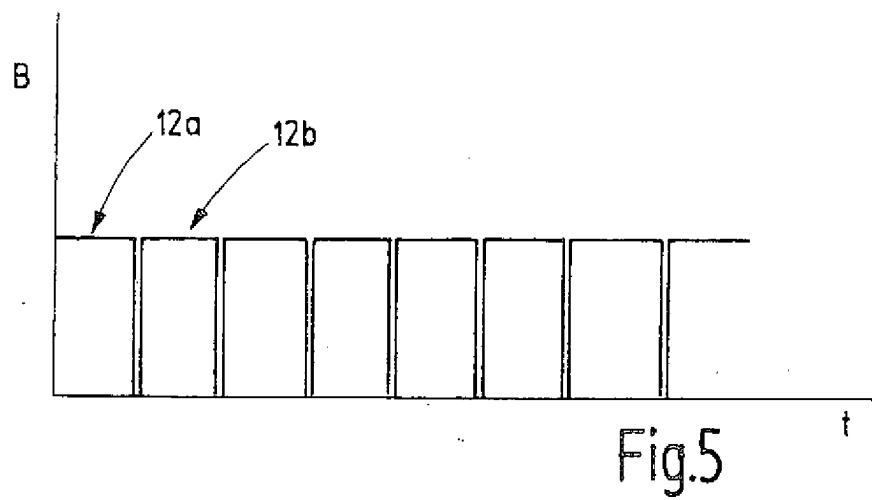
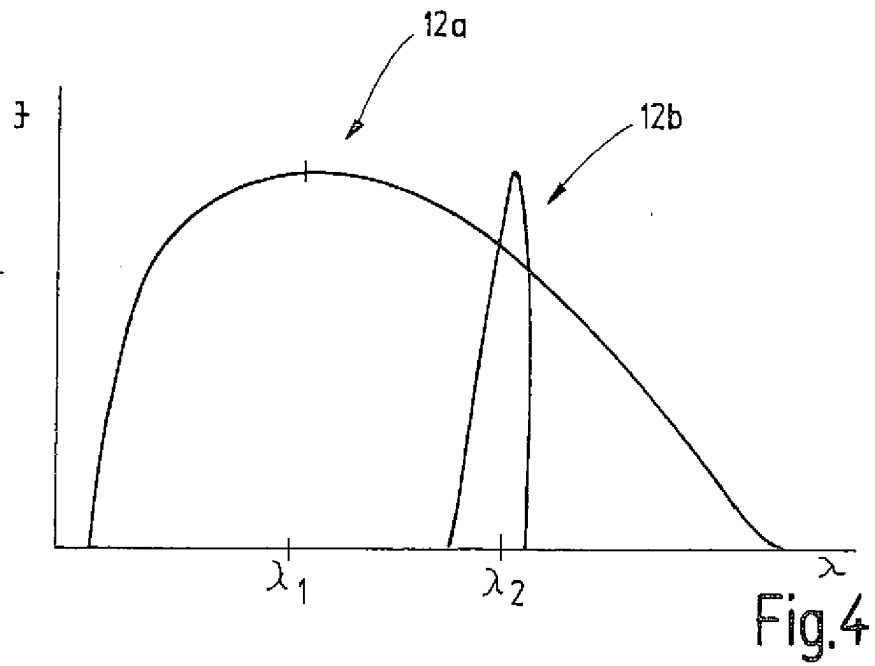


Fig.3



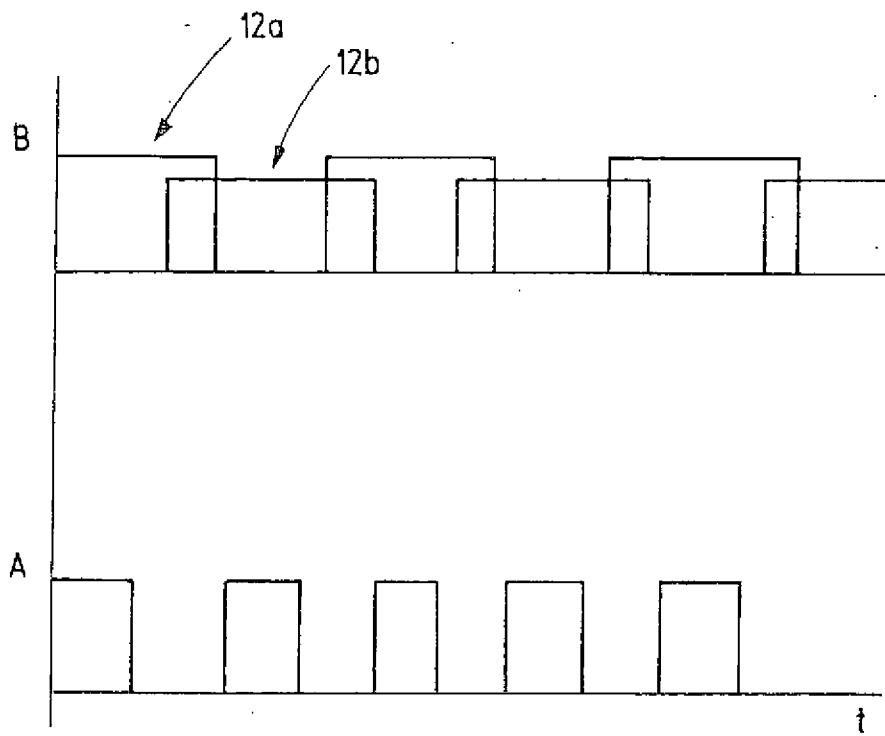


Fig.6