



(10) **DE 10 2016 014 802 B4** 2018.09.27

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2016 014 802.0**
 (22) Anmeldetag: **13.12.2016**
 (43) Offenlegungstag: **14.06.2018**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **27.09.2018**

(51) Int Cl.: **G01B 9/02 (2006.01)**
G01B 11/24 (2006.01)
G01B 11/14 (2006.01)
G01B 11/22 (2006.01)

Innerhalb von neun 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:
Universität Stuttgart, 70174 Stuttgart, DE

(74) Vertreter:
**Müller-Boré & Partner Patentanwälte PartG mbB,
 80639 München, DE**

(72) Erfinder:
**Körner, Klaus, Dr., 70563 Stuttgart, DE; Osten,
 Wolfgang, Prof. Dr., 70569 Stuttgart, DE**

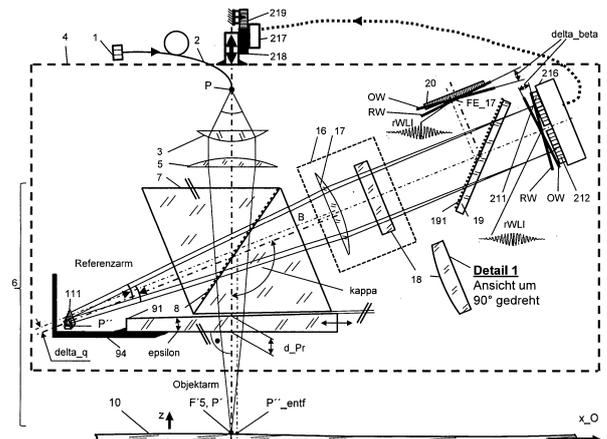
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2006 007 172	B4
DE	10 2010 056 122	B3
DE	10 2010 046 907	A1
US	7 330 274	B2
EP	2 526 373	B1
EP	2 843 360	A1

(54) Bezeichnung: **Anordnung und Verfahren zur robusten Zweistrahl-Interferometrie mit einer Dreifach-Reflexions-Anordnung**

(57) Hauptanspruch: Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie, welche folgende Mittel umfasst: eine Quelle kurzkohärenter elektromagnetischer Strahlung (1,103, 104) zur Beleuchtung eines Objekts (10, 107, 108, 109, 110), ein Interferometer mit einem Objektstrahlengang (O), einem Referenzstrahlengang (R) und einer Messebene (ME) im Objektstrahlengang, in der sich zumindest näherungsweise die optisch anzumessenden Oberflächen- oder Volumenelemente des Objekts (10, 107, 108, 109, 110) befinden; und mindestens einen gerasterten Detektor (20, 201, 202) zur Detektion elektromagnetischer Strahlung in Form mindestens eines räumlichen Interferogramms, wobei: im Referenzstrahlengang (R) des Interferometers mindestens ein End-Reflektor als Referenzreflektor angeordnet ist, wobei der End-Reflektor als eine Dreifach-Reflexions-Anordnung (111, 112, 113) mit drei Reflexionsflächen ausgebildet ist, die drei Reflexionsflächen jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zu einer gemeinsamen Bezugsebene (BE) liegen; und die drei Spurgeraden der Ebenen, welche durch die drei Reflexionsflächen dargestellt werden, in der Bezugsebene (BE) ein Dreieck ABC mit einem stumpfen Winkel bilden, wobei die erste Reflexionsfläche (13, 131, 132) auf einer Geraden liegt, auf welcher die Punkte C und B liegen, die zweite Reflexionsfläche (14, 141, 142) auf einer Geraden (m) liegt, auf welcher die Punkte A und C liegen und die

dritte Reflexionsfläche (15, 151, 152) auf einer Geraden (k) liegt, auf welcher ...



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Anordnung und ein Verfahren zur Zweistrahl-Interferometrie, insbesondere zur Single-shot- Interferometrie, zur Erfassung von Abstand, Profil, Form, Welligkeit, Rauheit oder der optischen Weglänge in oder an optisch rauen oder glatten Objekten und/oder zur optischen Kohärenz-Tomografie (OCT).

[0002] Eine Anordnung und ein Verfahren zur Single-shot-Interferometrie sind z.B. aus der Patentschrift EP 2 843 360 A1 bekannt. Bei den in EP 2 843 360 A1 beschriebenen interferometrischen Ansätzen trifft eine Wellenfront-Inversion auf, die für ein fehlerarmes Messen auf der Basis von zueinander geneigten interferierenden Wellenfronten oder Wellenfronten mit Krümmung und Lateral-Shear besonders hohe Anforderungen an die vorgeordnete strahlformende Optik stellt. Diese Anforderungen bestehen insbesondere hinsichtlich geringer Wellenfront-Aberrationen. Weitere interferometrische Ansätze sind z.B. aus den Patentschriften EP 2 526 373 B1 und DE 10 2010 056 122 B3 bekannt. Diese Ansätze basieren auf Endreflektor-Anordnungen im Referenzstrahlengang eines Interferometers mit drei Planspiegeln und mit einem gekreuzten Strahlengang. In den Patentschriften EP 2 526 373 B1 und DE 10 2010 056 122 B3 wird jedoch kein Hinweis darauf gegeben, wie ein großer Aperturwinkel für eine vergleichsweise hohe numerische Apertur N.A. zu erreichen wäre, beispielsweise für eine numerische Apertur N.A. = 0,4. Eine numerische Apertur N.A. in diesem Größenbereich ist jedoch für das Sicherstellen einer hohen lateralen Auflösung im Bereich von einem Mikrometer und auch noch etwas darunter für sichtbares Licht unverzichtbar.

[0003] Ein Ziel der Erfindung liegt in der Bereitstellung von verbesserten Anordnungen und Verfahren für die gewerbliche Nutzung der Zweistrahl-Interferometrie, insbesondere zur Single-Shot-Interferometrie mit einem räumlichen Interferogramm, insbesondere auf der Basis mechanisch robuster optischer Interferometer-Komponenten.

[0004] Insbesondere liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, die numerische Apertur einer interferometrischen Messanordnung insbesondere für die Single-Shot-Interferometrie mit einem räumlichen Interferogramm im Vergleich zum Stand der Technik signifikant zu erhöhen, wobei die Robustheit der Anordnung gewährleistet wird. Dies soll z.B. mit Endreflektor-Baugruppen in einem Zweistrahl-Interferometer ermöglicht werden, die sowohl klassisch optisch durch Poliertechniken als auch mit drucktechnischen Verfahren oder bei Luft-Spiegel-Baugruppen mittels metallischer Komponenten und mittels Single-Point-Diamantbearbeitung gefertigt werden können.

[0005] Eine weitere Aufgabe ist es daher, technisch gut herstellbare optische Baugruppen bereitzustellen, die robust genug auch für den Einsatz in einer Fertigungsumgebung sind und/oder auch für das Inline-Messen in einer mechanischen Fertigungslinie eingesetzt werden können. Des Weiteren soll die Aufgabe gelöst werden, eine Verschiebung in z-Richtung des Single-Shot-Interferometers zu messen.

[0006] Diese Aufgabe(n) wird bzw. werden durch eine Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach Anspruch 1 oder 6 und ein Verfahren zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach Anspruch 18 oder 22 gelöst. Bevorzugte Ausführungsformen sind Gegenstand der Unteransprüche.

[0007] Insbesondere werden eine Anordnung und ein Verfahren zur Single-shot- Interferometrie vorgeschlagen, die zur Erfassung von Abstand, Profil, Form, Welligkeit, Rauheit oder der optischen Weglänge in oder an optisch rauen oder glatten Objekten und/oder auch zur optischen Kohärenz-Tomografie (OCT) eingesetzt werden können. Die Anordnung umfasst eine Lichtquelle, ein Interferometer, bei dem im Referenzstrahlengang ein End-Reflektor angeordnet ist, sowie einen Detektor zur Detektion eines Interferogramms. Im Referenzstrahlengang des Interferometers kann der End-Reflektor mit drei planen Reflexionsflächen als Prismenspiegel- oder als Luftspiegel-Baugruppe ausgebildet werden, um zwischen Referenz- und Objektbündel eine Lateral-Shear vom Betrag δ_q zur Gewinnung eines räumlichen Interferogramms zu erzeugen. Die Ausbildung dieser Baugruppe hinsichtlich der Winkel und der Anordnung der Reflexionsflächen ermöglicht einen großen Aperturwinkel für eine hohe numerische Apertur. Beim Verfahren kann im Referenzstrahlengang eine Reduzierung des Aperturwinkels des Referenz-Strahlenbündels mit bündelbegrenzenden Mitteln durchgeführt werden, um eine optimale Anpassung an den geometrisch gegebenen Aperturwinkel des End-Reflektors im Referenzstrahlengang zu erreichen, der kleiner als der Aperturwinkel im Objektstrahlengang ausgebildet ist. Der End-Reflektor im Referenzstrahlengang kann auch als Bestandteil eines zweiten Interferometers zur hochauflösenden Messung der Verschiebung der Anordnung zur Single-shot- Interferometrie genutzt werden, wobei diese Verschiebung der Fokussierung dient.

[0008] Der End-Reflektor ist als eine Dreifach-Reflexions-Anordnung (z.B. eine Prismenanordnung) mit drei Reflexionsflächen ausgebildet. Die Dreifach-Reflexions-Anordnung kann einen M- oder W-Strahlengang, einen sich nicht kreuzenden Zick-Zack Strahlengang oder einen sich kreuzenden (Zick-Zack) Strahlengang aufweisen.

[0009] Insbesondere wird gemäß einer ersten Ausführung eine Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie bereitgestellt, z.B. eine Anordnung zur Erfassung von Abstand, Tiefe, Profil, Form, Welligkeit und/oder Rauheit oder der optischen Weglänge in oder an rauen oder optisch glatten technischen oder biologischen Objekten, auch in Schichtenform, und/oder zur optischen Kohärenz-Tomografie (OCT).

[0010] Die Anordnung umfasst folgende Mittel:

eine Quelle kurzkohärenter elektromagnetischer Strahlung zur Beleuchtung des Objekts,

ein Interferometer, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, mit einem Objektstrahlengang und mit mindestens einem Referenzstrahlengang und einer Messebene im Objektstrahlengang, in der sich zumindest näherungsweise die optisch anzumessenden Oberflächen- oder Volumenelemente des Objekts befinden; sowie

mindestens einen gerasterten Detektor zur Detektion elektro-magnetischer Strahlung in Form mindestens eines räumlichen Interferogramms, wobei:

im Referenzstrahlengang des Interferometers mindestens ein End-Reflektor als Referenzreflektor angeordnet ist, wobei der End-Reflektor als eine Dreifach-Reflexions-Anordnung mit drei Reflexionsflächen ausgebildet.

[0011] Die drei Reflexionsflächen liegen jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zu einer gemeinsamen Bezugsebene BE. Die drei Spurgeraden der Ebenen, welche durch die drei Reflexionsflächen dargestellt werden, bilden in der Bezugsebene BE ein Dreieck ABC mit einem stumpfen Winkel, damit bei diesem Interferometer zwischen Referenz- und Objektbündel eine Lateral-Shear vom Betrag δ_q besteht. Die erste Reflexionsfläche liegt auf einer Geraden, auf welcher die Punkte C und B liegen, die zweite Reflexionsfläche liegt auf einer (verlängerten) Geraden, auf welcher die Punkte A und C liegen, und die dritte Reflexionsfläche liegt auf einer (verlängerten) Geraden, auf welcher die Punkte A und B liegen. Die drei Reflexionsflächen können plane Flächen, z.B. Planspiegelflächen sein.

[0012] Ferner werden die folgenden Merkmale eingehalten:

[0013] Der Strahlengang der Dreifach-Reflexions-Anordnung ist gekreuzt.

[0014] Die zweite Reflexionsfläche, liegend auf einer verlängerten Geraden m, welche die Punkte A und C enthält, wird als zweite (in der Reflexionsreihenfolge) der drei Reflexionsflächen zur Reflexion eines fokussierten Bündels FB genutzt.

[0015] Die erste Reflexionsfläche, welche die Punkte C und B enthält, und die zweite Reflexionsfläche sind in einem spitzen Winkel relativ zueinander angeordnet. Beispielsweise kann an der zweiten Reflexionsfläche die Reflexionsfläche, welche die Punkte C und B enthält, mit spitzem Winkel anliegen. Somit ist der Winkel ACB ein stumpfer Winkel.

[0016] Die erste (plane) Reflexionsfläche, welche die Punkte C und B enthält, wird als erste oder dritte (in der Reflexionsreihenfolge) der drei planen Reflexionsflächen zur Reflexion des Bündels FB genutzt.

[0017] Ferner gibt es eine Normale N_m vom Punkt B auf die zweite Reflexionsfläche, durch welche die Gerade m verläuft.

[0018] Die erste Reflexionsfläche, welche die Punkte C und B enthält, und die dritte Reflexionsfläche, welche die Punkte A und D enthält, bilden einen stumpfen Winkel CBD. Somit ist der Winkel ABC ein spitzer Winkel.

[0019] Es besteht für die Dreifach-Reflexions-Anordnung mit dem gekreuztem Strahlengang ein Winkel γ zwischen Randstrahl RAS des ein- oder des austretenden Bündels und der zweiten Reflexionsfläche und dabei gilt für den Betrag des Winkels $\gamma < 12^\circ$ (Altgrad).

[0020] Weiterhin gilt für den Betrag des Winkels γ bevorzugt $< 5^\circ$ (Altgrad). Des Weiteren gilt für den Winkel γ bevorzugt zumindest näherungsweise 0° (Altgrad). Letzteres ergibt einen vergleichsweise großen Aperturwinkel des fokussierten Strahlenbündels, welches die Dreifach-Reflexions-Anordnung noch passieren kann.

[0021] Weiterhin kann der Bündelfokus BF bevorzugt zumindest näherungsweise auf der Normalen N_m und zumindest näherungsweise in der Nähe der zweiten Reflexionsfläche liegen.

[0022] Weiterhin kann die Dreifach-Reflexions-Anordnung als Luftspiegelgruppe oder als Prismenspiegelgruppe ausgebildet sein.

[0023] Für das Prisma kann dafür ein Glaswerkstoff eingesetzt werden, der auch bevorzugt höherbrechend sein kann, um einen möglichst hohen Aperturwinkel für das fokussierte Bündel in der Prismenspiegelgruppe verarbeiten zu können. Beispielsweise kann der Brechungsindex des Glaswerkstoffs um 1,85 sein. Dies ist besonders für den Einsatz in einem Mirau-Interferometer mit einem Objektiv mit einer numerischen Apertur von 0,55 von Interesse. Die Prismenspiegelgruppe kann als ein Mini- oder Mikro-Prisma, d.h. als eine refraktive Komponente mit drei Reflexionen ausgebildet werden. Ein derartiges Mini- oder Mikro-Prisma ist vergleichsweise einfach zu fertigen und stellt einen Monolithen dar.

[0024] Die Luftspiegelgruppe lässt sich in der Regel nicht als ein Monolith fertigen, sondern als eine zusammengefügte Baugruppe. Eine solche zusammengefügte Baugruppe baut - bei gleichen Parametern - in der Regel größer als ein monolithisches Mini- oder Mikro-Prisma bzw. größer als eine refraktive Komponente.

[0025] Die vom fokussierten Bündel FB genutzte Reflexionsfläche auf einer verlängerten Geraden k , welche die Punkte A und B enthält (dritte Reflexionsfläche), ist bevorzugt mehr als dreifach so lang ausgebildet wie die zweite Reflexionsfläche auf einer verlängerten Geraden m , welche die Punkte A und C enthält.

[0026] Weiterhin ist die Dreifach-Reflexions-Anordnung bevorzugt mit einem vorzeichenbehafteten Winkel τ kleiner als -1° ausgebildet, also -2° bis -20° . Der Winkel τ ist der Winkel zwischen dem Eingangshauptstrahl in den Endreflektor bzw. in die Dreifach-Reflexions-Anordnung und der zweiten Reflexionsfläche.

[0027] Es handelt sich in einer weiteren Ausführung um eine Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie zur Erfassung von Abstand, Tiefe, Profil, Form, Welligkeit und/oder Rauheit oder der optischen Weglänge in oder an technischen oder biologischen Objekten, auch in Schichtenform, und/oder zur optischen Kohärenz-Tomografie (OCT). Die Anordnung umfasst folgende Mittel:

eine Quelle kurzkohärenter elektromagnetischer Strahlung zur Beleuchtung des Objekts,

ein Interferometer, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, mit einem Objektstrahlengang (O), mindestens einem Referenzstrahlengang (R) und einer Messebene im Objektstrahlengang, in der sich zumindest näherungsweise die optisch anzumessenden Oberflächen- oder Volumenelemente des Objekts befinden,

mindestens einen gerasterten Detektor zur Detektion elektro-magnetischer Strahlung in Form mindestens eines räumlichen Interferogramms,

wobei:

im Referenzstrahlengang (R) des Interferometers mindestens ein End-Reflektor als Referenzreflektor angeordnet ist, wobei der End-Reflektor als eine Dreifach-Reflexions-Anordnung mit drei Reflexionsflächen ausgebildet ist, und die drei Reflexionsflächen jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zu einer gemeinsamen Bezugsebene BE liegen, und

die drei Spurgeraden der Ebenen, welche durch die drei Reflexionsflächen (die z.B. plane Spiegelflächen sein können) dargestellt werden, in der Bezugsebene BE ein Dreieck ABC mit einem stumpfen Winkel bilden. Dabei liegt die erste Reflexionsfläche auf einer (verlängerten) Geraden, auf welcher die Punkte C und B liegen, die zweite Reflexionsfläche auf einer (verlängerten) Geraden m , auf welcher die Punkte A und C liegen und die dritte Reflexionsfläche auf einer (verlängerten) Geraden k , auf welcher die Punkte A und B liegen.

[0028] Im Folgenden werden die kennzeichnenden Merkmale für einen möglichst großen Aperturwinkel α eines fokussierten Bündels für alle Dreifach-Reflexions-Anordnungen mit Planspiegelflächen genannt:

Die Dreifach-Reflexions-Anordnung ist als Prismenspiegelgruppe ausgebildet.

Die Dreifach-Reflexions-Anordnung ist entweder mit einem W-Strahlengang oder mit einem gekreuzten Strahlengang ausgebildet.

Die Reflexionsfläche, liegend auf einer verlängerten Geraden m , welche die Punkte A und C enthält (die zweite Reflexionsfläche), wird als zweite der drei Reflexionsflächen (in der Reihenfolge der Reflexionen) zur Reflexion eines fokussierten Bündels FB genutzt.

Die erste Reflexionsfläche und die zweite Reflexionsfläche sind in einem spitzen Winkel relativ zueinander angeordnet. Beispielsweise kann an der zweiten Reflexionsfläche die erste Reflexionsfläche, welche die Punkte C und B enthält, mit spitzem Winkel anliegen. Somit ist der Winkel ACB ein stumpfer Winkel.

Die Reflexionsfläche, welche die Punkte C und B enthält (die erste Reflexionsfläche), wird als erste oder als dritte (in der Reihenfolge der Reflexionen) der drei Reflexionsflächen zur Reflexion genutzt.

[0029] Es gibt eine Normale N_m vom Punkt B, gelotet auf die zweite Reflexionsfläche, durch welche die Gerade m verläuft.

[0030] Die erste Reflexionsfläche, welche die Punkte C und B enthält, und die dritte Reflexionsfläche auf einer verlängerten Geraden k , welche die Punkte A und B enthält, bilden einen stumpfen Winkel. Somit ist der Winkel ABC ein spitzer Winkel.

[0031] Weiterhin liegt der Bündelfokus BF bevorzugt zumindest näherungsweise auf der Normalen N_m und zumindest näherungsweise in der Nähe der zweiten Reflexionsfläche.

[0032] Weiterhin ist die Lichtquelle bevorzugt als Frequenzkamm-Laser mit einer Mikro-Kavität ausgebildet.

[0033] Weiterhin gibt es im Objektmessfeld bevorzugt mindestens ein Tiefenmesssystem zum Erfassen des Messobjekts in einer vorgegebenen (z.B. gröberen) Skala, wobei das Tiefenmesssystem mit seinem Strahlengang zumindest näherungsweise koaxial zum interferometrischen Strahlengang angeordnet ist. Das Tiefenmesssystem ist bevorzugt chromatisch-konfokal ausgebildet.

[0034] Weiterhin kann dem Interferometer im Referenzarm ein Abschwächungsfilter mit einem Maximum der Transmission im Zentrum des Abschwächungsfilters zur Verringerung des Aperturwinkels des Referenzstrahlenbündels zugeordnet werden.

[0035] Das Abschwächungsfilter im Referenzarm dient dazu, den Durchmesser des Referenzstrahlenbündels oder den Aperturwinkel des Referenzstrahlenbündels so zu verkleinern, dass die vom Referenz-Endreflektor durch seine Geometrie und gegebenenfalls den Brechungsindex bei einer Prismenausführung der Drei-Reflexions-Baugruppe vorgegebene numerische Apertur nicht überschritten wird. Bevorzugt kann die numerische Apertur im Referenzarm des Interferometers dabei auf die Hälfte verringert werden. Das führt bei einer Interferometeranordnung mit einer vergleichsweise hohen numerischen Apertur im Objektarm jedoch zu keinem Nachteil, da aufgrund der geringen wellenoptischen Schärfentiefe und des Abgleichs der optischen Weglängen das räumliche Interferogramm etwa in der Mitte der zueinander geneigten Wellenfronten auftritt. Wegen der bevorzugt kurzkohärenten Lichtquelle liegen die auftretenden signifikanten Modulationen im räumlichen Interferogramm in der Anzahl unter 20.

[0036] Die Kippung der beiden interferierenden Wellenfronten ist dabei durch die Größe der Lateral-Shear δ_q bevorzugt so groß gemacht, dass die Ausdehnung des räumlichen Interferogramms bevorzugt weniger als ein Drittel der lateralen Ausdehnung der Objektwellenfront beträgt.

[0037] Weiterhin ist das Abschwächungsfilter bevorzugt mit radialsymmetrischer Gauß-Charakteristik ausgebildet. Das ist für die Ausbildung der Wellenfronten von Vorteil.

[0038] Weiterhin ist das Abschwächungsfilter bevorzugt mit einer eindimensionalen Charakteristik ausgebildet.

[0039] Auf die Reflexionsfläche einer Drei-Reflexions-Baugruppe bzw. Anordnung, welche die Punkte B und D enthält, besteht bevorzugt ein streifender Einfall zumindest für den Randstrahl eines Bündels mit einem Einfallswinkel größer als 75° (Altgrad). So kann für das Referenzstrahlenbündel ein vergleichsweise großer

Aperturwinkel, beispielsweise von $17,5^\circ$ (Altgrad) und somit eine vergleichsweise große numerische Apertur N.A., von 0,3 bei einer Luftanordnung erreicht werden.

[0040] Weiterhin können das Interferometer, der Detektor und optional andere optische Elemente innerhalb eines Sensorkopfes angeordnet sein. Dem Sensorkopf ist bevorzugt ein hochdynamisches Stell-System mit einem beigeordneten hochauflösenden Tiefenmesssystem zugeordnet, wobei das Stell-System in Mess-Echtzeit den Sensorkopf an jedem kooperativen Messpunkt stets im wellenoptischen Schärfentiefebereich hält. Das Stell-System ist bevorzugt ein Piezosteller-System, der das Steuersignal vorzugsweise aus dem WLI-Signal (WLI: Weißlicht Interferogramm) erhält. Vorzugsweise wird aber auch das Tiefenmesssignal eines in einer vorgegebenen (z.B. größeren) Tiefenmess-Skala arbeitenden vorzugsweise chromatisch-konfokalen Sensors, der coaxial zum Messstrahlengang angeordnet ist, genutzt. Die Trennung der Signale erfolgt durch Farbteiler.

[0041] Weiterhin liegt der Winkel κ in einem Michelson-Interferometer bevorzugt zwischen 96° (Altgrad) und 140° (Altgrad). Der Winkel besteht zwischen optischer Achse des Objektstrahlengangs im Interferometer und optischer Achse des Strahlengangs am Ausgang des Interferometers. Eine von 90° (Altgrad) abweichende Interferometer-Konfiguration schafft mehr Bauraum am Ausgang des Interferometers.

[0042] Weiterhin ist vorzugsweise zwecks Justierung ein lateral schiebbarer (z.B. schlanker) Glaskeil mit einer Mittendicke d_{Pr} im Objektarm und auf der optischen Achse des Mikroskop-Objektivs eines Zweistrahl-Interferometers angeordnet, mit welchem die Glasweglänge des Referenzarms des Zweistrahl-Interferometers zu null kompensiert wird. Die maximale Dicke d_{Pr} des Glaskeils kann im Bereich von 1mm bis 2 mm liegen. Bei einem stabilen Aufbau des Interferometers muss diese Justierung nur einmal erfolgen.

[0043] Vorzugsweise - bei Anordnung eines Drei-Reflexionsflächen-Prismas im Referenzarm - entspricht diese Mittendicke d_{Pr} des schiebbaren Glaskeils zumindest näherungsweise der Glasweglänge des Drei-Reflexionsflächen-Prismas. Durch eine Justierung mit Hilfe des Glaskeils kann der optische Gangunterschied (OPD) des Referenzarms und des Objektarms minimiert und z.B. auf kleiner als $2\mu\text{m}$ reduziert werden. So besteht ein hinsichtlich des optischen Gangunterschieds sehr gut abgeglichenes balanciertes Interferometer, welches zumindest an achsenkrechten Spiegelflächen ein symmetrisches räumliches Weißlicht-Interferogramm (rWLI) liefern kann.

[0044] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zur robusten Zweistrahl-Interferometrie zur Erfassung von Abstand, Tiefe, Profil, Form, Welligkeit und/oder Rauheit oder der optischen Weglänge in oder an technischen oder biologischen Objekten, auch in Schichtenform, oder auch zur optischen Kohärenz-Tomografie (OCT) vorgeschlagen.

[0045] Das Verfahren umfasst das Bereitstellen einer Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie (z.B. eine der zuvor beschriebenen Anordnungen), wobei die Anordnung folgende Mittel umfasst

eine Quelle kurzkohärenter elektromagnetischer Strahlung zur Beleuchtung des Objekts,

ein (Weißlicht-) Interferometer, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, mit einem Objektstrahlengang, mindestens einem Referenzstrahlengang, in dem mindestens ein End-Reflektor angeordnet ist, und einer Messebene im Objektstrahlengang, in der sich zumindest näherungsweise die optisch anzumessenden Oberflächen- oder Volumenelemente des Objekts befinden, sowie

mindestens einen gerasterten Detektor zur Detektion elektromagnetischer Strahlung in Form mindestens eines räumlichen Interferogramms, wobei:

im Referenzstrahlengang des Interferometers mindestens ein End-Reflektor mit drei Reflexionsflächen als Referenzreflektor angeordnet ist, wobei der End-Reflektor drei Reflexionsflächen aufweist, welche jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zu einer gemeinsamen Bezugsebene liegen. Der Endreflektor kann als eine der oben beschriebenen Dreifach-Reflexions-Anordnungen ausgebildet sein.

[0046] Ferner wird im Referenzstrahlengang eine Reduzierung des Aperturwinkels des Referenz-Strahlenbündels mit bündelbegrenzenden Mitteln durchgeführt. Die Reduzierung des Aperturwinkels des Referenzstrahlenbündels wird vorzugsweise durch eine Strahlabschwächung mit einem radialsymmetrischen Filter oder einem eindimensionalen Filter erreicht.

[0047] Dies ist von Vorteil, denn so kann bei diesem Interferometer ein Referenz-Endreflektor verwendet werden, der eine deutlich geringere numerische Apertur verarbeiten kann als im Objektstrahlengang gegeben ist. Die hohe numerische Apertur im Objektstrahlengang wird für die Interferometrische Messanordnung nur für

das Objekt-Strahlenbündel zur Bildung eines feinen beugungsbegrenzten Abtastflecks auf dem Objekt benötigt. Dies ist von größter Wichtigkeit bei feinbearbeiteten Oberflächen im Maschinenbau, die keine Spiegel darstellen.

[0048] Die Reduzierung des Aperturwinkels des Referenz-Strahlenbündels mit bündelbegrenzenden Mitteln wird dabei bevorzugt zumindest näherungsweise in der Fourier-Ebene eines Objektivs im Referenzstrahlengang eines Linnik-Interferometers durchgeführt. So wird die Abschattung der Bündel minimiert, da in der Fourier-Ebene Strahlenbündel, die im Objektraum eine Lateral-Shear aufweisen, sich überdecken.

[0049] Um das Balance-Signal bzw. Regelsignal für die Fokus-Regelung des (Weißlicht-) Interferometers zu bilden, können die Beträge I_{links} und I_{rechts} der Intensitäten benachbarter Fotoelemente eines Fotodiodendetektors oder Pixel eines gerasterten Detektors, die sich vom räumlichen Weißlicht-Interferogramm links und rechts von einem Referenzpunkt RP befinden, mittels elektronischem Rechenwerk bestimmt und aufsummiert werden. Der Referenzpunkt RP liegt in der Regel auf der optischen Achse. Die Summe S_{links} der Beträge I_{links} und die Summe S_{rechts} der Beträge I_{rechts} werden voneinander subtrahiert und daraus wird das vorzeichenbehaftete Regelsignal (Balance-Signal) abgeleitet. Vorzugsweise wird auf null geregelt. Das elektronische Rechenwerk kann als ein digitaler Signalprozessor ausgebildet sein.

[0050] Das Interferometer, der Detektor und optional weitere optische Elemente können innerhalb eines Sensorkopfes angeordnet sein. Dem Sensorkopf sind vorzugsweise elektromechanische hochdynamische Mittel zur Tiefen-Nachführung des Sensorkopfes zugeordnet, die in Mess-Echtzeit den Sensorkopf an jedem kooperativen Messpunkt stets im wellenoptischen Schärfentiefebereich halten. Das Messergebnis wird stets aus der vorzeichenbehafteten Addition des Tiefenmesswertes des Nachführ-Tiefenmesssystems und des Tiefenmesswertes z_{rWLI} gebildet. Der Tiefenmesswert z_{rWLI} wird mittels räumlichen Weißlicht-Interferogramms bzw. aus dem räumlichen Weißlicht-Interferogramm-Signal oder rWLI-Signal ermittelt.

[0051] Bei einem weiteren Verfahren zur robusten Zweistrahl-Interferometrie zur Erfassung von Abstand, Tiefe, Profil, Form, Welligkeit und/oder Rauheit oder der optischen Weglänge in oder an technischen oder biologischen Objekten, auch in Schichtenform, oder auch zur optischen Kohärenz-Tomografie (OCT) mit Bildung eines räumlichen Weißlicht-Interferogramms, umfassend:

Bereitstellen einer Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie (z.B. eine der zuvor beschriebenen Anordnungen), wobei die Anordnung folgende Mittel umfasst:

eine Quelle kurzkohärenter elektromagnetischer Strahlung zur Beleuchtung des Objekts,

ein erstes Interferometer, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, mit einem Objektstrahlengang, mindestens einem Referenzstrahlengang und einer Messebene im Objektstrahlengang, in der sich das Objekt befindet, sowie

mindestens einen gerasterten Detektor zur Detektion elektro-magnetischer Strahlung in Form mindestens eines räumlichen Interferogramms, wobei

im Referenzstrahlengang des ersten Interferometers mindestens ein End-Reflektor mit drei Reflexionsflächen als Referenzreflektor angeordnet ist und die drei Reflexionsflächen jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zu einer gemeinsamen Bezugsebene liegen. Der Endreflektor kann als eine der oben beschriebenen Dreifach-Reflexions-Anordnungen ausgebildet sein.

[0052] Ferner wird eine zweite optische Antastung des End-Reflektors mit den drei Reflexionsflächen mittels eines zweiten separaten Interferometers mit einer Laserlichtquelle durchgeführt, um eine Verschiebung in z-Richtung des zum End-Reflektor gehörenden ersten Interferometers messen zu können. Das Interferometer ist mit dem End-Reflektor starr verbunden und wird als Single-Shot-Interferometer betrieben. Das Single-Shot-Interferometer mit der Quelle kurzkohärenter elektromagnetischer Strahlung ist bevorzugt als Mirau-Interferometer ausgebildet. Im Referenzarm des zweiten separaten Interferometers ist bevorzugt ein Tripelreflektor in Form einer Raumecke angeordnet. Der Referenzarm des zweiten separaten Interferometers ist bevorzugt mit einem Strahlteiler ausgebildet, der im ersten Interferometer nur als Ein- und Auskoppelstrahlteiler genutzt wird. Die interferierenden Bündel des zweiten Interferometers verlassen dabei den Strahlteiler wieder auf dessen Eingangsseite. Mit diesem Ansatz kann die Verschiebung z_1 des ersten Interferometers - als kompakte Anordnung - in z-Richtung gemessen werden. So kann aus dem Wert z_{WLI} , welcher vom ersten Interferometer bestimmt wird, und dem z_1 Wert eine Position für einen Objektpunkt in Bezug auf eine Komponente des zweiten separaten Interferometers errechnet werden, beispielsweise in Bezug auf einen im optischen System angeordneten Strahlteiler des zweiten separaten Interferometers, welcher im ersten Interferometer als Ein- und Auskoppelstrahlteiler genutzt wird. Der z_1 Wert ergibt sich aus der Veränderung des optischen Gangunter-

schiedes im zweiten Interferometer, welche zeitaufgelöst gemessen wird und für den Fachmann in bekannter Weise in ein Wegsignal umgerechnet werden kann. Beim Starten des Messvorganges mit dem ersten Interferometer kann der z_1 Wert auf null gesetzt werden. Anschließend wird kontinuierlich die Veränderung des optischen Gangunterschieds bestimmt. Es kann beim Starten des Messvorganges mit dem ersten Interferometer aber auch ein beliebiger Positionswert in Millimetern dem z_1 Wert zugewiesen werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dem zweiten Interferometer auch noch eine Weißlicht-Quelle zuzuordnen und aus dem Weißlicht-Interferogramm am optischen Gangunterschied null ein Referenz-Signal zu generieren.

Weitere Merkmale und/oder Vorteile der Erfindung

[0053] Vorzugsweise werden weitere Single-shot-Messpunkte eingesetzt, bevorzugt nach dem chromatisch-konfokalen Ansatz, um den interferometrischen Messpunkt oder die interferometrischen Messpunkte mittels schnellem Regel-System für den Messabstand in einem vergleichsweise kleinen Messbereich zu halten, da dieser Messabstand bei einer höheren numerischen Apertur nur wenige Mikrometer Tiefenbereich aufweist.

[0054] Bevorzugt kann auch ein ganzes Feld von Single-Shot-Messpunkten in Linien- oder Matrixanordnung, bevorzugt nach dem chromatisch-konfokalen Ansatz, also mit chromatisch-konfokalen Sensoren zusätzlich abgetastet werden. Dabei ist die Tiefenauflösung eines chromatisch-konfokalen Sensors bevorzugt besser als ein Fünftel des wellenoptischen Schärfentiefebereichs und der Messbereich beträgt bevorzugt mindestens das Fünffache des wellenoptischen Schärfentiefebereichs des Strahlenganges im Objektarm des Interferometers.

[0055] Die Anordnungsmerkmale der Single-Shot-Messpunkte in Matrixanordnung, bevorzugt nach dem chromatisch-konfokalen Ansatz, basieren bevorzugt auf Merkmalen des Schutzrechtes DE 10 2006 007172 B4.

[0056] Bevorzugt ist die Tiefenauflösung eines chromatisch-konfokalen Sensors besser als ein Zehntel des wellenoptischen Schärfentiefebereichs und der Messbereich beträgt mindestens das 100-fache des wellenoptischen Schärfentiefebereichs.

[0057] Eine linienhafte Single-Shot-Messung wird mit den vorgeschlagenen Anordnungen bei entsprechender Ausbildung des Sensors mit Zylinder-Optik bevorzugt mit einer linienhaften Licht-Quelle sowie einer Zylinder-Optik und einer schneller Flächenkamera durchgeführt.

[0058] Ein chromatisch-konfokaler Sensor ist bevorzugt koaxial zum interferometrischen Sensor-Strahlengang im Objektraum angeordnet.

[0059] Ein chromatisch-konfokaler Sensor ist bevorzugt als Vorlauf-Sensor im interferometrischen Sensor-Strahlengang im Objektraum angeordnet. Damit bekommt das Regelungs-System auf einer Drei-Koordinaten-Messmaschine vorab schon Informationen über die bei der anstehenden Messfahrt über das Messobjekt zu erwartenden Messabstände und der interferometrische Sensor-Kopf wird im Abstand stets rechtzeitig, also in Prozess-Echtzeit, darauf eingestellt.

[0060] Des Weiteren ist bevorzugt eine Zeile oder Matrix von chromatisch-konfokalen Punktsensoren, die im Vergleich zum interferometrischen Messen in einer größeren Skala arbeiten, angeordnet. Die damit gewonnenen Informationen dienen u.a. der Abstandsregelung in Prozess-Echtzeit und der „Erkundung“ des Messumfeldes in Prozess-Echtzeit.

[0061] Bevorzugt wird zusätzlich eine CMOS-Flächenkamera zur Beobachtung des Messfeldes eingesetzt.

[0062] Wie auch in EP 2 626 373 B1 bereits beschrieben, kann dieser Ansatz mit einem Frequenzkamm-Laser mit einer miniaturisierten Resonator-Kavität betrieben werden. Das hat den Vorteil, dass auch ein - hinsichtlich der optischen Weglänge - nicht ausbalanciertes Interferometer verwendet werden kann, da die benötigte Kompensation der optischen Weglänge - vereinfacht gesprochen - in den Frequenzkamm-Laser gelegt wird.

[0063] Die Erfindung wird nachfolgend beispielhaft anhand der **Fig. 1** bis **Fig. 14** sowie der 6 aufgeführten Ausführungsbeispiele ohne Figur beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer beispielhaften interferometrischen Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie mit einem Michelson Interferometer und einer als ein Drei-Reflexionsflächen-Prisma ausgebildeten Dreifach-Reflexions-Anordnung;

Fig. 2 eine Ansicht des Drei-Reflexionsflächen-Prismas in der **Fig. 1**;

Fig. 2a die Einbaulage des Drei-Reflexionsflächen-Prismas in der **Fig. 1**;

Fig. 3 ein weiteres beispielhaftes Drei-Reflexionsflächen-Prisma mit einer Strahlenbündelkreuzung;

Fig. 4 eine schematische Darstellung einer beispielhaften interferometrischen Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie mit einem Mirau-Interferometer und einer als ein Drei-Reflexionsflächen-Prisma ausgebildeten Dreifach-Reflexions-Anordnung;

Fig. 5 eine schematische Darstellung einer beispielhaften interferometrischen Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie mit einem Linnik-Interferometer, einer als ein Drei-Reflexionsflächen-Prisma ausgebildeten Dreifach-Reflexions-Anordnung und einem chromatisch-konfokalen Mess-System;

Fig. 6 eine beispielhafte Dreifach-Reflexions-Anordnung in Luftausführung;

Fig. 7 eine schematische Darstellung einer weiteren beispielhaften interferometrischen Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie mit einem Michelson-Interferometer;

Fig. 8 eine schematische Darstellung einer weiteren beispielhaften interferometrischen Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie mit einem Michelson-Interferometer;

Fig. 9 ein beispielhaftes Drei-Reflexionsflächen-Prisma mit einem W-Strahlengang;

Fig. 10 zeigt eine schematische Darstellung einer beispielhaften interferometrischen Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie mit einem Linnik-Interferometer und mit dem in **Fig. 9** gezeigten Drei-Reflexionsflächen-Prisma;

Fig. 11 zeigt beispielhafte räumliche-Interferogramme;

Fig. 12 eine schematische Darstellung einer beispielhaften interferometrischen Anordnung mit einem Mirau-Interferometer und mit dem in **Fig. 9** gezeigten Drei-Reflexionsflächen-Prisma;

Fig. 13 ein beispielhaftes Laserinterferometer zur optischen Antastung bzw. Abtastung eines Drei-Reflexionsflächen-Prismas;

Fig. 14 eine beispielhafte Messung von Oberflächenprofilen und -Welligkeit, deren Profiltiefe die der wellenoptischen Schärfentiefe der interferometrischen Sensor-Anordnung übersteigt.

[0064] In den Figuren werden gleiche Bezugszeichen für die gleichen oder ähnlichen Elemente verwendet. Ferner wird der Begriff Licht stets als Synonym für elektromagnetische Strahlung vom Terahertz-, über das Infrarot- bis zum tiefen UV-Spektrum verwendet.

[0065] Die **Fig. 1** stellt eine beispielhafte interferometrische Anordnung für das Single-Shot-Messen dar. Diese Anordnung ist insbesondere für Welligkeitsmessung an Dünnglas oder Messung der Ebenheitsabweichung an polierten Silizium-Wafern geeignet, da diese jeweils eine optisch glatte Oberfläche aufweisen und somit eine gerichtete Reflexion ohne Speckle-Effekte besteht. Das von der fasergekoppelten Punktlichtquelle **1** ausgehende Nah-infrarot-Licht gelangt über die Single-Mode-Faser **2** in den Kollimator **3**, der bereits Bestandteil des Sensorkopfes **4** ist. Der Sensorkopf **4** umfasst ferner ein Michelson-Interferometer **6**, eine Ausgangs-Abbildungsstufe **16**, einen Detektor und gegebenenfalls weitere optische Elemente. Der Sensorkopf **4** ist in z-Richtung beweglich und präzisionsgeführt zur hochdynamischen Nachfokussierung ausgebildet. Die Punktlichtquelle **1** kann z.B. drei Superlumineszenz-Dioden umfassen, um die interferometrische Anordnung im spektralen Bereich von 750 nm bis 950 nm zu betreiben. Die Punktlichtquelle **1** kann auch eine andere Punktlichtquelle sein, z.B. ein Frequenzkamm-Laser mit einer Mikro-Kavität.

[0066] Die Abbildungsstufe für die Punktlichtquelle **1** stellt ein chromatisch voll auskorrigiertes optisches System vom Ende der Faser **2** bis zum Messobjekt **10** dar, das hier Dünnglas von 30 µm Dicke umfasst. Dabei sind die Glasweglängen und die Glasdispersion von der 112°-Strahlteileranordnung **7**, dem Glaskeil **91** und dem Drei-Reflexionsflächen-Prisma **111** mittels des schiebbaren und dann fixierbaren Glaskeils **91** exakt kompensiert. Dazu ist der Keilwinkel epsilon des Glaskeils **91** in die 112°-Strahlteileranordnung **7** zumindest näherungsweise eingearbeitet, so dass im Abbildungsstrahlengang effektiv eine Planparallelplatte besteht und somit in der Abbildungsstufe keine spektrale Aufspaltung besteht.

[0067] Dieser Glaskeil **91** ist senkrecht zur optischen Achse vor dem Mikroskop-Objektiv ausgerichtet und hat auch eine Schutzfunktion. In **Fig. 1** beträgt die Dicke des Glaskeils **91** in der Mitte etwa 1,6 mm, in den Randbereichen etwa 1,3 mm und 1,9 mm, so dass eine sehr gute Balance der optischen Weglängen im Interferometer **6** eingestellt werden kann. So weist das Weißlicht-Interferogramm am Schwerpunkt der Einhüllenden zumindest näherungsweise die Phase null auf. Der einjustierte Glaskeil **91** und das Drei-Reflexionsflächen-Prisma **111** sind aus dem gleichen niedrig-dispersiven Glaswerkstoff hergestellt. Nach Justierung weisen die beiden Interferometerarme die gleichen Glasweglängen für den jeweiligen Hauptstrahl auf, so dass ein symmetrisches Weißlicht-Interferogramm entsteht. Das am Dünnglas **10** reflektierte Licht gelangt über den Glaskeil **91** zurück in die 112°-Strahlteileranordnung **7**.

[0068] Im Referenzarm des Michelson-Interferometers **6** ist als Endreflektor ein Drei-Reflexionsflächen-Prisma **111** mit gekreuztem Strahlengang angeordnet. **Fig. 2** und **Fig. 2a** zeigen schematisch den Aufbau des Drei-Reflexionsflächen-Prismas **111** (**Fig. 2**) und deren Einbaulage (**Fig. 2a**) im Interferometer.

[0069] Das Drei-Reflexionsflächen-Prisma **111** weist eine (Strahl-)Eingangsfläche **12** und drei Reflexionsflächen **13**, **14** und **15** auf. Die drei Reflexionsflächen **13**, **14** und **15** liegen jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zu einer gemeinsamen Bezugsebene BE. Die Reflexionsflächen **13**, **14** und **15** sind als planare Spiegel ausgebildet. Die drei Spurgeraden der Ebenen, welche durch die drei Reflexionsflächen dargestellt werden, bilden in der Bezugsebene BE ein Dreieck ABC mit einem stumpfen Winkel.

[0070] Die Reflexionsfläche **13** beinhaltet die Punkte B und C und wird als erste oder dritte Fläche (in der Reihenfolge der Reflexionen) zur Reflexion des Bündels genutzt. Die Reflexionsfläche **14** liegt auf einer verlängerten Geraden m, welche die Punkte A und C enthält, und wird als zweite Fläche (in der Reihenfolge der Reflexionen) zur Reflexion des Bündels benutzt. Der Winkel zwischen den Reflexionsflächen **13** und **14** ist ein spitzer Winkel. Die Reflexionsfläche **15** liegt auf einer verlängerten Geraden k, welche die Punkte A und B enthält. Die Reflexionsfläche **14** und die Reflexionsfläche **15** bilden einen stumpfen Winkel CBD.

[0071] Ferner verläuft eine Normale N_m auf die zweite Reflexionsfläche durch den Punkt B. Der Bündelfokus BF liegt zumindest näherungsweise auf der Normalen N_m und zumindest näherungsweise in der Nähe der Reflexionsfläche **14**.

[0072] Das Drei-Reflexionsflächen-Prisma **111** ist für eine maximale numerische Apertur $N.A. = 0,2$ ausgebildet, die aber hier in **Fig. 1** nicht voll ausgenutzt wird. Mittels geometrischer Ausbildung des Drei-Reflexionsflächen-Prismas **111** ist ein Querversatz des Bündels $\delta_q = 500 \mu\text{m}$ gegeben. Das Mikroskop-Objektiv **5** besitzt eine Brennweite $f_5 = 40\text{mm}$ und eine numerische Apertur $N.A. = 0,09$, die voll ausgenutzt wird, so dass die numerische Apertur für das fokussierte Bündel hierbei $N.A. = 0,09$ beträgt. Damit ist der Pupillendurchmesser mit d_P mit 7,2 mm bestimmt. In der Pupillenebene ergibt sich somit ein maximaler optischer Gangunterschied OPD_{max} von $\delta_q * (d_P / f_5)$. Im vorliegenden Beispiel ist $OPD_{\text{max}} = \delta_q * (d_P / f_5) = 500 \mu\text{m} * (7,2 \text{ mm} / 40 \text{ mm}) = 90 \mu\text{m}$. Für eine Schwerpunkt-Wellenlänge von 850 nm ergeben sich somit etwa 106 Interferenzstreifen, die mit einer Zeilenkamera **20** mit 1024 Pixeln und 7 mm Länge gut detektiert werden können, wobei durch die Form der Einhüllenden des WLI-Wavelet (WLI: Weißlicht-Interferogramm), gegeben durch das Lichtspektrum der interferierenden Wellenfronten, nur jeweils deutlich weniger als 100 Perioden im WLI-Wavelet detektiert werden können. Die 112°-Strahlteileranordnung **7** gemäß **Fig. 1** gestattet auch die Nutzung von Mikroskop-Objektiven mit deutlich geringerer Brennweite als 40 mm, ohne dass sich Probleme mit dem freien Raum für die Komponenten des Detektions-Strahlenganges am Ausgang des Interferometers **6** ergeben.

[0073] Bei einer 112°-Strahlteileranordnung **7** mit 12 mm Kantenlänge und einer Dicke d_{Pr} des Glaskeils **91** von 1,6 mm, was in der Summe einer Deckglas-Korrektur von 13,6 mm entspricht, ergibt sich für das Mikroskop-Objektiv **5** mit einer Brennweite von 40 mm ein freier Arbeitsabstand von mindestens 15 mm, auch wenn sich die bildseitige Hauptebene im Mikroskop-Objektiv **5** etwas hinter der Frontlinse befindet. Am Ausgang des Interferometers **6** ist eine Ausgangs-Abbildungsstufe **16** angeordnet. Diese stellt ein chromatisch gut korrigiertes optisches Gesamtsystem vom Ausgang des Interferometers **6** bis zum Detektor **20** dar. Die darin enthaltene Zylinder-Optik **18** (siehe auch Detail **1**) dient der linienförmigen Verdichtung des Strahlenbündels auf die schnelle Zeilen-Kamera **20**, die das Interferenzlicht mittels einer Auskoppelstrahlteiler-Platte **19** erhält. Das transmittierte Interferenzlicht gelangt auf die schnellen Fotodioden-Detektoren **211** und **212**. Der auf der linken Seite des Feldes angeordnete schnelle Fotodioden-Detektor **211** und der auf der rechten Seite des Feldes angeordnete schnelle Fotodioden-Detektor **212** dienen zur Erfassung der Fokusslage des Sensorkopfs **4** mit dem Interferometer **6**. Mittels der Fotodioden-Detektoren **211** und **212**, deren jeweilige Breite jeweils etwa einem Viertel der Periode im WLI-Wavelet entspricht, kann in bekannter Weise eine lokale Amplitude A des

Weißlicht-Interferogramms zumindest näherungsweise nach folgender Formel aus 5 Fotodioden-Elementen bestimmt werden, welche die Signalwerte I_1 , I_2 , I_3 , I_4 und I_5 liefern.

$$A = \sqrt{(I_1 - 2I_3 + I_5)^2 + (2I_2 - 2I_4)^2} \quad \text{Gleichung (1)}$$

[0074] Die Bestimmung der lokalen Amplitudenwerte A des Weißlicht-Interferogramms erfolgt auf jeder der beiden Seite des Feldes mehrfach und so wird für die linke und die rechte Seite mittels eines digitalen Signal-Prozessors **216** das Differenzsignal der Summen der ermittelten lokalen Amplitudenwerte gebildet, wobei für die Amplitudenwerte stets ein positiver Wert steht. Je nachdem, welche der beiden Seiten im Summensignal überwiegt, also eine positive oder negative Differenz besteht, wird in der Tiefe mittels eines hochdynamischen Piezosteller-Systems **218** der Sensorkopf mit Interferometer **6** zur Dünnglasoberfläche **10** nachgeregelt. Dieses Balance-Verfahren stellt für den Fachmann ein wohlbekanntes Verfahren für Regelungssysteme dar.

[0075] Es sind auch andere Gleichungen zur Bestimmung oder Abschätzung der lokalen Signalamplituden A eines Weißlicht-Interferogramms bekannt und ebenfalls anwendbar, welche beispielsweise nur auf der Differenz direkt benachbarter Intensitätswerte im räumlichen Interferogramm beruhen. Die Berechnung der Signalamplituden A kann mittels des digitalen Signal-Prozessors **216**, welcher dem Fotodioden-Detektor zugeordnet ist und der parallel auf die Signale der Sensorelemente der Fotodioden zugreift, extrem schnell ausgeführt werden. Durch die Auswertung der Amplituden mehrerer Oszillationen unter der Einhüllenden des räumlichen Interferogramms kann vermieden werden, dass bei einer von der Gauß-Verteilungskurve abweichenden Form der Einhüllenden ein fehlerhaftes Signal entsteht, beispielsweise bei einer Modulation der Einhüllenden.

[0076] Die vergleichsweise große spektrale Bandbreite der Lichtquelle **1** von etwa 200 nm bewirkt eine vergleichsweise geringe Kohärenzlänge. Die Anordnung nach **Fig. 1** ist somit im Besonderen für Dünnglas-Messungen geeignet. Darüber hinaus ist die Anordnung nach **Fig. 1** auch für die Messung der Form polierter Asphären, einschließlich von Gleitsichtbrillen-Gläsern, auch aus Kunststoff verwendbar. Beim Messen von Gleitsichtbrillen-Gläsern kann die Anordnung nach **Fig. 1** Bestandteil einer Mehr-Koordinaten-Ultrapräzisions-Messmaschine sein. Diese ist u.a. mit einer ultrapräzisen Kipp-Vorrichtung, auch mit einem Kippwinkel-Sensor, aufgebaut, so dass stets ein zumindest näherungsweise senkrecht Anmessen der Objektoberfläche durchgeführt werden kann.

[0077] Die Anordnung nach **Fig. 1** gestattet auch die Schichtdickenmessung an Dünnglas **10** mit der Dicke von beispielsweise 30 μm . In diesem Fall sind zwei deutlich separierte räumliche Weißlicht-Interferogramme auszuwerten. Somit können sowohl die Welligkeit, als auch die Dicke des Dünnglases **10** mit einer Tiefenauflösung im einstelligen Nanometerbereich gleichzeitig gemessen werden.

[0078] In einem ersten Ausführungsbeispiel (1) ohne Figur kann die Bestimmung einer lokalen Amplitude A des WLI-Wavelets sowohl auf der rechten Seite als auch auf der linken Seite der optischen Achse im Feld jeweils mit einer Vierfach-Fotodiode erfolgen. Dabei beträgt der Pitch der Vierfach-Fotodioden jeweils ein Viertel der bekannten mittleren WLI-Wavelet-Periodenlänge. Die Auswertung kann mittels speziellen Prozessors erfolgen. Dies setzt jedoch eine Einhüllende mit symmetrischer Form, die frei von lokalen Modulationen ist, voraus. Die Vierfach-Fotodioden bekommen das WLI-Licht mittels einer Auskopplung durch einen Strahlteiler. So erfolgt ein extrem schneller Vergleich einer linken und rechten Amplitude des räumlichen Interferogramms an einem festen Ort, um ein Defokus-Signal für die Tiefenregelung zu generieren.

[0079] Die Prismenanordnung **111** in **Fig. 2** mit drei Reflexionen und einem Kreuzungspunkt K findet z.B. Anwendung, wenn ein geringer Querversatz δ_q erreicht werden soll. Das kann für ein Michelson-, ein Linnik- oder auch ein Mirau-Interferometer von Vorteil sein, insbesondere dann, wenn die Brennweite der Mikroskop-Objektive gering ist. Diese Konfiguration weist eine kleine optische Weglänge im Verhältnis zum Querversatz δ_q auf. Im Glas der Prismenanordnung **111** wird ein halber Öffnungswinkel von 9° erreicht. Bevorzugt wird hierbei linear polarisiertes Licht verwendet.

[0080] Die **Fig. 3** stellt ebenfalls eine beispielhafte Prismenanordnung mit drei Reflexionen, also ein Drei-Reflexionsflächen-Prisma **112**, mit einer Strahlenbündelkreuzung und einem Kreuzungspunkt K des Eingangsstrahlenbündels und des Ausgangsstrahlenbündels sowie der virtuellen Spiegelebene VSE dar. Diese spezielle Prismenanordnung findet Anwendung, wenn eine vergleichsweise hohe numerische Apertur $N.A.$ für das fokussierte Bündel erreicht werden soll. Das Drei-Reflexionsflächen-Prisma **112** wird in Anordnungen gemäß der **Fig. 4** und **Fig. 5** eingesetzt. Es geht hier in der **Fig. 3** um die Maximierung der $N.A.$ Für $15,35^\circ$ wird eine $N.A.$ von 0,4 für die Glassorte BK7 erreicht. Höherbrechende Gläser erlauben eine noch höhere $N.A.$ von Werten

bis zu 0,5. Der Winkel γ beträgt hier etwa 0° (Altgrad). Dies stellt eine Voraussetzung für das Erreichen einer vergleichsweise hohen N.A. dar. Die hier dargestellte Variante mit einem halben Aperturwinkel von 15° (Altgrad) führt jedoch zu einem vergleichsweise großen Bauvolumen des Prismas.

[0081] Im Folgenden werden die Merkmale des Drei-Reflexionsflächen-Prismas **112** aufgeführt: Das Drei-Reflexionsflächen-Prisma **112** weist drei Reflexionsflächen **13**, **14** und **15** auf, deren Anordnung ähnlich der Anordnung der Reflexionsflächen des Drei-Reflexionsflächen-Prismas **111** ist. Für eine maximale N.A. trifft die Normale N_m der Reflexionsfläche **14**, welche die Gerade m enthält, die Kante der beiden anderen Reflexionsflächen **13** und **15** im Punkt B. Dort besteht ein stumpfer Winkel. Ein Randstrahl breitet sich näherungsweise parallel zu Fläche **14** aus. Der Bündelfokus BF liegt zumindest näherungsweise auf der Fläche **14**. Der Winkel BAC und der Winkel BCE betragen weniger als 90° (Altgrad) und der Winkel CBD beträgt mehr als 90° (Altgrad). Die Gerade m , welche die Strecke AC enthält, und ein Randstrahl RS im Prisma schließen einen Winkel γ von weniger als 5° (Altgrad), beispielsweise $\approx 0^\circ$, ein.

[0082] Bevorzugt schließen die Gerade m und ein Randstrahl RS im Prisma einen Winkel kleiner als 1° (Altgrad) ein. Der vorzeichenbehaftete Winkel τ zwischen dem Eingangshauptstrahl EHS und der Reflexionsfläche **14** ist vorzugsweise kleiner als -1° (Altgrad), z.B. zwischen -2° (Altgrad) und -16° (Altgrad). Fertigungstechnisch ist ein Querversatz δ_q von 0,2 mm noch gut zu realisieren. Der halbe Aperturwinkel α_p des Drei-Reflexionsflächen-Prismas **111** beträgt in diesem Beispiel $\pm 15^\circ$.

[0083] Das Drei-Reflexionsflächen-Prisma **112** ist gut mit einem Mikroskop-Objektiv der Vergrößerung 20x und der N.A. = 0,4 als Referenzreflektor zu kombinieren. Dies erfolgt in Verbindung mit einem Michelson-Interferometer in einem zweiten Ausführungsbeispiel (2) ohne Figur. Dazu wird linear polarisiertes Licht mit senkrechter Polarisationsrichtung verwendet.

[0084] Die Fig. 4 stellt eine Mirau-Interferometer-Anordnung zum Messen eines feinbearbeiteten Metallobjekts **107** mit einem Drei-Reflexionsflächen-Prisma **112** mit Strahlenbündelkreuzung dar. Das Drei-Reflexionsflächen-Prisma **112** ist auf die Frontlinse des Mikroskop-Objektivs **51** aufgekittet. Das Mikroskop-Objektiv **51** besitzt eine Brennweite $f' = 7$ mm und eine numerische Apertur N.A. = 0,5. Der freie Arbeitsabstand zum Metallobjekt **107** beträgt 1,5 mm. Die Mirau-Interferometer-Anordnung ist zwecks Fokussierung in z-Richtung beweglich ausgebildet.

[0085] Zwecks Reduzierung von Dispersionseffekten besteht das Strahlteiler-Substrat **72**, welches in seiner Dicke von 1,3 mm dem Glasweg des Drei-Reflexionsflächen-Prismas **112** gut angepasst ist, vorzugsweise aus gleichem Material wie das Drei-Reflexionsflächen-Prisma **112**. Dies führt zu einem balancierten Interferometer. Im Objektraum ist hier ein außeraxial liegender Messpunkt P' und im Referenzarm ist ein Referenzpunkt P'' dargestellt. Die Position des entfalteten kohärenten Referenzpunktes P''_{entf} ist ebenfalls außeraxial und der Punkt P''_{entf} steht im gleichen Abstand von der optischen Achse des Mikroskop-Objektivs **51** wie der Messpunkt P' . Die so gegebene Symmetrie-Lage im Feld reduziert Fehlereinflüsse. Bei dieser Anordnung wird das räumliche Interferogramm in der Pupille durch eine Zylinderoptik in der Transferstufe komprimiert, so dass die hier durch Abschattung fehlende Mitte in der Pupille kein Problem darstellt. Das Detail 4 zeigt das Drei-Reflexionsflächen-Prisma **112** vergrößert in Einbaulage.

[0086] Die Fig. 5 stellt eine beispielhafte interferometrische Anordnung mit einem Linnik-Interferometer für einen Messpunkt und mit einem Drei-Reflexionsflächen-Prisma **112**, sowie einem chromatisch-konfokalen Messsystem in einer größeren Skala dar, dessen Strahlengang coaxial zum Objektstrahlengang im Objektarm O des Interferometers angeordnet ist. Bei einem Linnik-Interferometer besteht keine Abschattung in der Pupille, was einen Vorteil darstellt. Das hochaperturige Mess-Mikroskop-Objektiv **171** im Strahlengang des Linnik-Interferometers weist eine Brennweite von 7 mm auf. Die N.A. beträgt 0,65 und der Querversatz beträgt $\delta_q = 200$ μm . Auf der Frontlinse des Referenzobjektivs **172** ist ein optisch dünnes Apodisations-Filter **222** mit radialsymmetrischer Gauß-Charakteristik angeordnet. Das Apodisations-Filter **222** ermöglicht, die Referenzbündel-Kugelwelle in der N.A. deutlich zu verkleinern, ohne stärkere schädliche Beugungseffekte hervorzurufen, damit die resultierende N.A. dann zur deutlich kleineren N.A. von etwa 0,48 des Drei-Reflexionsflächen-Prismas **112** mit Kreuzstrahlengang passt. Die kleinere NA stellt aber kein Problem dar, da nur in der Pupillenmitte räumliche Interferogramme ausgewertet werden. Das Detail 5 zeigt das vergrößerte Drei-Reflexionsflächen-Prisma **112** in Einbaulage. Des Weiteren ist ein Beobachtungssystem für das Objekt **108** mit einer Lichtquelle **35** und einer schnellen Matrix-Kamera **209** angeordnet, dessen Strahlengang über die Farb-Teilerwürfel **74** und **73** verknüpft ist. Zusätzlich ist ein chromatisch-konfokales Messsystem für die Gewinnung eines Fokussignals angeordnet, welches mit einer Lichtquelle **31** und einem Detektor **38** der aus einer 100 KHz-Linien-

Kamera mit vorgeordnetem Spektrometer für einen Lichtpunkt im Wellenlängenbereich von 580 nm bis 700 nm aufgebaut ist.

[0087] In der **Fig. 6** ist eine Drei-Reflexionsflächen-Anordnung **113** (Dreifach-Reflexions-Anordnung) in Luftausführung mit gekreuztem Strahlengang mit Kreuzungspunkt K dargestellt. Diese Anordnung findet Anwendung, wenn ein besonders geringer Versatz δ_q erreicht werden soll. Die Anordnung ist z.B. als Metall-Fügegruppe herstellbar. Diese Anordnung kann für ein Linnik-, ein Mirau- oder ein Michelson-Interferometer als Referenzreflektor von Vorteil sein. Beispielsweise kann die Drei-Reflexionsflächen-Anordnung 113 als Referenzreflektor (Endreflektor im Referenzstrahlengang) in den in **Fig. 1**, **Fig. 4** und **Fig. 5** eingesetzt werden. Bevorzugt wird linear polarisiertes Licht verwendet.

[0088] Die **Fig. 7** zeigt eine weitere beispielhafte interferometrische Anordnung mit einem Michelson-Interferometer. Das von einer fasergekoppelten Punktlichtquelle **101** mit mehreren Doppel-Superlumineszenz-Dioden im spektralen Bereich von 490 nm bis 680 nm ausgehende Licht passiert den Kollimator **3** und gelangt durch den Ein- und Auskoppel-Strahlteilerwürfel **78** über ein Objektiv **52** (z.B. vom Typ 20x-Objektiv G Plan APO von der Firma Mitutoyo mit der Brennweite $f=10$ mm und der N.A.=0,28) in das Michelson-Interferometer **63**. Das fokussierte Licht trifft auf den Teilerwürfel **71** mit 3,5mm Kantenlänge, was der Deckglas-Korrektur dieses Objektivs entspricht. Dies ergibt einen 2 mm freien Arbeitsabstand zum Messobjekt 109, das z.B. eine Aluminiumoberfläche im Übergangsbereich zwischen optisch glatt und rau darstellt. Die Drei-Reflexionsflächen-Anordnung (Dreifach-Reflexions-Anordnung) 113 in Luftausführung mit einem gekreuzten Strahlengang mit dem Kreuzungspunkt K ist mit einem Querversatz δ_q von 300 μ m aufgebaut. Zoom B zeigt die symmetrische Nutzung des Feldes des Objektivs **52**, da sich die Punkte P' und P''_entf in etwa gleichem Abstand vom Brennpunkt F_52 des Objektivs **52** befinden. Aufgrund der vergleichsweise geringen numerischen Apertur ist diese Anordnung eher nicht für die Messung der Rauheit zu verwenden. Hierbei geht es um die Profilmessung. Dazu kommt ein sehr schneller Mehrfach-Fotodioden-Detektor **213** mit Hardware-Prozessor **214** zur Anwendung, um die Lage des Schwerpunktes eines Weißlicht-Interferogramms im Sub-Millisekunden-Bereich zu bestimmen. Um eine numerisch einfache Auswertung zu ermöglichen, beträgt die Periodenlänge p_{rWLI} einer Oszillation im räumlichen Interferogramm das Vierfache des Pitches der Dioden im Mehrfach-Fotodioden-Detektor **213**, was im Detail **7** dargestellt ist. Dies kann aufgrund des faktisch invarianten Winkels zwischen den interferierenden Wellenfronten RW und OW bei der Detektion δ_{β} gut eingehalten werden.

[0089] Die **Fig. 8** zeigt eine beispielhafte interferometrische Anordnung mit einem Linnik-Interferometer 62 mit einer Multipunkt-Lichtquelle **104**, aufgebaut aus mehreren Superlumineszenz-Dioden, und mit einem Mikroskop-Objektiv **171** im Objektarm O des Interferometers 62. Das Mikroskop-Objektiv **171** hat eine numerische Apertur N.A. = 0,5 und eine Brennweite von 6 mm. Das Objekt **108** weist eine raue Oberfläche auf. Im Referenzstrahlengang R des Interferometers **62** ist ein Referenz-Mikroskop-Objektiv **172** mit einer numerischen Apertur N.A. von 0,28 und eine Drei-Reflexions-Anordnung **113** nach **Fig. 6** mit gekreuztem Strahlengang angeordnet, deren Querversatz $\delta_q=250\mu$ m beträgt. Es wird eine Vielzahl von Messpunkten gemessen. Zur Anpassung der Drei-Reflexions-Anordnung 113 mit der zum Objektstrahlengang geringeren numerischen Apertur ist ein optisch dünnes Apodisations-Filter **221** mit radialsymmetrischer Gauß-Charakteristik auf einem Substrat **23** in der Fourier-Ebene FE_172 des Referenzobjektivs **172** angeordnet. Die Gauß-Charakteristik des Apodisations-Filters **221** ist im Detail **8** dargestellt. Der Apodisations-Filter 221 verkleinert das Referenzbündel in der N.A., so dass es zur N.A. von 0,28 der Drei-Reflexions-Anordnung 113 passt. Nach Vereinigung der interferierenden Bündel von Referenz- und Objektstrahlengang mittels Strahlteilerwürfel **7** passieren diese die optische 4f-Transferstufe 192, bestehend aus Tubusobjektiv **241** und Kameraobjektiv **241**, und die Zylinderoptik 18. Jeder optisch im Objektstrahlengang anmessbare Messpunkt erzeugt auf der Matrix-Kamera 201 ein Weißlicht-Interferogramm, so dass eine Vielzahl nebeneinander liegender räumlicher Weißlicht-Interferogramme ($rWLI_i$, wobei i eine Ganzzahl ist) mit gleicher Ortsfrequenz detektiert werden kann. Es ist aber auch möglich, in einem weiteren Ausführungsbeispiel (3) ohne Figur in den beiden Interferometerarmen jeweils eine hier nicht dargestellte 4f-Transferstufe einzusetzen. Dies ist von Vorteil, wenn die Fourier-Ebene des Objektivs 172 durch die Objektivbauweise geometrisch nicht zugänglich ist. So kann das Apodisations-Filter in einer zur Fourier-Ebene FE_172 des Referenzobjektivs **172** optisch konjugierten Ebene angeordnet sein.

[0090] Die **Fig. 9** zeigt ein Drei-Reflexionsflächen-Prisma in W-Ausbildung 114 (d.h. mit einem W-Strahlengang) im Referenzarm eines Zweistrahl-Interferometers, wobei das Prisma eine große numerische Apertur bis zu 0,8 für den Strahlengang im Referenzarm ermöglicht. Die drei optisch wirksamen Flächen **132**, **142** und **152** (d.h. Reflexionsflächen) des Drei-Reflexionsflächen-Prismas in W-Ausbildung 114 liegen jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zu einer gemeinsamen Bezugsebene BE. Die Reflexionsflächen **132**, **142** und **152** können als Planspiegel ausgebildet werden. Die drei Spurgeraden der Ebenen, welche durch die drei Reflexionsflächen **132**, **142** und **152** dargestellt werden, bilden in der Bezugsebene BE ein Dreieck ABC mit

einem stumpfen Winkel. In dem dargestellten Beispiel liegt die Reflexionsfläche 132 auf einer (verlängerten) Geraden, welche die Punkte C und B verbindet, die Reflexionsfläche 142 auf einer (verlängerten) Geraden m, auf welcher die Punkte A und C liegen, und die Reflexionsfläche 152 auf einer (verlängerten) Geraden k liegt, auf welcher die Punkte A und B liegen. Die Reflexionsfläche 142 und die Reflexionsfläche 132 sind in einem spitzen Winkel relativ zueinander angeordnet (d.h. der Winkel zwischen den Geraden 1 und m ist ein spitzer Winkel). Die Reflexionsfläche 132 und die Reflexionsfläche 152 sind in einem stumpfen Winkel relativ zueinander angeordnet (d.h. der Winkel zwischen den Geraden k und 1 ist ein stumpfer Winkel). Die Reflexionsfläche 142 wird als zweite der drei Reflexionsflächen zur Reflexion eines fokussierten Bündels FB genutzt, die Reflexionsfläche 132 wird als erste oder dritte der drei Reflexionsflächen zur Reflexion genutzt.

[0091] Das Drei-Reflexionsflächen-Prisma 114 erzeugt für das Referenzbündel einen Querversatz vom Betrag δ_q , der in Bezug auf die laterale Ausdehnung dieses Prismas besonders groß ist. Ein spezielles Merkmal besteht hierbei darin, dass die Normale N_m vom Punkt B, gelotet auf die Reflexionsfläche 142, welche die Strecke AC enthält, zumindest näherungsweise den Punkt B trifft. Das Drei-Reflexionsflächen-Prisma 114 wird in derselben Weise wie eine Drei-Reflexions-Anordnung mit gekreuztem Strahlengang mit Kreuzungspunkt K genutzt. In einem weiteren Ausführungsbeispiel (4) ohne Figur ist eine Drei-Reflexions-Anordnung mit einem Prisma mit zwei Spiegelflächen und einer totalreflektierenden Fläche ausgebildet, welche die Gerade m enthält. Wichtig ist nur, dass stets drei Reflexionen auftreten oder eine ungeradzahlige Anzahl von Reflexionen im Referenzstrahlengang auftritt. Das für ein Drei-Reflexionsflächen-Prisma 114 in W-Ausbildung zur Anwendung kommende Zweistrahl-Interferometer nach Fig. 9 kann ein Michelson-, ein Mirau- oder auch ein Linnik-Interferometer sein. Die Weglänge des refraktiven Materials dieses Drei-Reflexionsflächen-Prismas 114 wird im Objektarm zur Kompensation eingebracht. In einem weiteren Ausführungsbeispiel (5) ohne Figur kann das Drei-Reflexionsflächen-Prisma 114 auch etwas langgezogen ausgebildet sein, um mehrere Messpunkte entlang einer Linie oder auch eine Linie als Referenzlicht zu ermöglichen.

[0092] Die Fig. 10 stellt ein Linnik-Interferometer mit einem Drei-Reflexionsflächen-Prisma in W-Ausbildung 114 für einen Messpunkt dar. Detail 10 zeigt das Drei-Reflexionsflächen-Prisma 114 in Einbaulage. Der fasergekoppelten Punktlichtquelle 1 ist ein faserbasierter Mikroresonator 39, ausgebildet als Fabry-Perot-Interferometer, mit der einfachen optischen Weglänge L des Resonators nachgeordnet, die etwas oberhalb von 10 μm liegt. Es entstehen auch Pulse, die um $2L$ verzögert sind. Somit ist eine Kohärenzfunktion mit wiederkehrenden Maxima gegeben und so können auch bei einem Gangunterschied von $2L$ Weißlicht-Interferenzen auftreten. Dies stellt die Fig. 11 dar. Diese Weißlicht-Interferenzen werden mittels schneller Matrixkamera 202 detektiert. Fig. 11 zeigt drei beispielhaften räumlichen Kurzkohärenz-Interferogramme $rWLi$, wobei $i=0, +1$ und -1 .

[0093] Die Mikroskopobjektive 171 und 172 weisen eine Brennweite von 4 mm und eine numerische Apertur von $N.A. = 0,8$ auf. Der Querversatz beträgt $\delta_q=150\mu\text{m}$. Auch hier ist wie in der Anordnung gemäß Fig. 5 ein Beobachtungssystem für das Objekt 108 mit einer Lichtquelle 35 und einer schnellen Matrix-Kamera 209 angeordnet, dessen Strahlengang über die Farb-Teilerwürfel 74 und 73 verknüpft ist. Und auch hier ist ein chromatisch-konfokales Messsystem für die Gewinnung eines Fokussignals angeordnet, welches mit einer Lichtquelle 31 und einem Detektor 38 der aus einer 100 KHz-Linien-Kamera mit vorgeordnetem Spektrometer für einen Lichtpunkt aufgebaut ist. In einem weiteren Ausführungsbeispiel (6) ohne Figur ist ein Frequenzkamm-Laser mit Mikroresonator als Lichtquelle eingesetzt.

[0094] Die Fig. 12 stellt ein Mirau-Interferometer mit einem Drei-Reflexionsflächen-Prisma in W-Ausbildung 114 für einen Messpunkt dar. Die Brennweite des Mikroskop-Objektiv 51 für das Mirau-Interferometer beträgt 7 mm und die numerische Apertur $N.A. 0,65$ sowie der Querversatz $\delta_q=200\mu\text{m}$. Auch hierbei wird ein chromatisch-konfokales Mess-System in einer größeren Skala gemäß Fig. 5 zur Fokuslagenregelung eingesetzt, dessen Strahlengang coaxial zum Objekt- Strahlengang im Objektarm O des Interferometers angeordnet ist. Es gibt für das Mirau-Interferometer zwar einen fehlenden Bereich wegen Abschattung aufgrund des Reflexionsprismas in der Pupille. Deshalb ist im ausgehenden Strahlengang vom Mirau-Interferometer eine Zylinderoptik 18 angeordnet, die auf einen linienhaften/schmalen Bereich auf dem Detektor fokussiert. Das Detail 12 zeigt das vergrößerte Drei-Reflexionsflächen-Prisma 114 in W-Ausbildung in Einbaulage.

[0095] Die Fig. 13 stellt ein Laserinterferometer 41 zur optischen Antastung des Drei-Reflexionsflächen-Prismas 114 dar, welches sich im Mirau-Objektiv 61 befindet, um eine Bewegung des Mirau-Objektivs 61 in z-Richtung höchstgenau messen zu können.

[0096] Der Vorteil durch Nutzung eines Drei-Reflexionsflächen-Prismas 114 besteht darin, dass durch den Winkel β_B zwischen den 114- und 110-Bündeln eine sehr einfache geometrische Entkopplung vom Laserlicht des Bündels B_{110} möglich ist, welches am Objekt 110 direkt reflektiert wird - auch, wenn dies spiegelnd

ist. Das vom Objekt **110**, hier eine optisch polierte Oberfläche, reflektierte Laserlicht - in Form des Bündels B_110 - wird somit vom Vierfach-Fotodioden-Detektor 210 ferngehalten, um störende Interferenzen zu vermeiden.. Das Detail **13.1** zeigt das vergrößerte Drei-Reflexionsflächen-Prisma **114** in W-Ausbildung in Einbaulage. Das Detail **13.2** stellt den Fotodioden-Block **210** und das Detail **13.3** die dort entstehenden Interferenzen der interferierenden Laserbündel dar.

[0097] In der **Fig. 14** ist eine Möglichkeit dargestellt, auch an Oberflächen Profil und Welligkeit zu messen, deren Profiltiefe die der wellenoptischen Schärfentiefe der interferometrischen Sensor-Anordnung übersteigt. Die Sensor-Anordnung wird dazu schwingend in z-Richtung bewegt und dabei adaptiv den Oberflächenwellen und auch Stufen in der Objektoberfläche mittels eines coaxialen chromatisch konfokalen Sensor-Systems nachgeregelt, s. a. **Fig. 5**. Durch Auslesung einer schnellen Zeilenkamera können räumliche Weißlicht-Interferogramme rWLI detektiert werden. Die Verschiebung in z-Richtung wird permanent hochaufgelöst auch mittels Laserinterferometer 41 gemessen und verrechnet.

[0098] Das Detail **14** zeigt im Zoom Messpunkte auf einer Flanke und die bei einem Tiefen-Scan sich in der Detektorebene dann lateral verschiebende Weißlicht-Interferogramme rWLI. Dabei wurden die Intensitäts-Wavelets aus Gründen der besseren Darstellbarkeit in der Höhe etwas versetzt dargestellt.

[0099] Die oben beschriebenen Anordnungen lassen sich grundsätzlich mit allen Zweistrahl-Interferometer realisieren. Die Anordnungen mit einem Mirau-Interferometer können jedoch gewissen technischen Einschränkungen unterliegen, da eine Abschattung in der Pupillenfläche auftreten kann. Durch das Einführen moderater Asymmetrien im Mirau-Interferometer System - in den optischen Weglängen - kann jedoch wie oben beschrieben zumindest eine einseitige Detektion des Kurz-Kohärenz-Interferogramms erfolgen. Die Anordnungen mit einem Michelson oder einem Linnik Interferometer sind frei von diesen Beschränkungen.

[0100] Die oben beschriebenen Anordnungen und Verfahren eignen sich zur Erfassung von Abstand, Profil, Form, Welligkeit Rauheit oder der optischen Weglänge in oder an optisch rauen oder glatten Objekten und/oder zur optischen Kohärenz-Tomografie (OCT). Beispielsweise können die oben beschriebenen Anordnungen und Verfahren zur Messungen an gespannten Maschinenbau-Oberflächen mit hoher lateraler und hoher Tiefen-Auflösung im Fertigungsprozess oder in fertigungsnaher Umgebung eingesetzt werden. Ferner ist eine robuste 3D-Erfassung mittels Single-Shot Interferometrie mit einer vergleichsweise hohen numerischen Apertur (bis z.B. N.A. = 0,8 im Extremfall, typischerweise zwischen 0,25 und 0,55) bei einem hohen Brechungsindex der Komponenten möglich. Eine hohe numerische Apertur dient der besseren lateralen Auflösung, um auch an gespannten Maschinenbau-Oberflächen mit hoher lateraler und hoher Tiefen-Auflösung messen zu können, sowie der besseren Lichtausbeute.

Bezugszeichenliste

Bezugszeichen	Bezeichnung
1	Lichtquelle, z.B. fasergekoppelte Punktlichtquelle mit drei Doppel-Superlumineszenz-Dioden, um die Lichtquelle im spektralen Bereich von 750 nm bis 950 nm zur interferometrischen Nutzung zu betreiben
101	Lichtquelle, z.B. fasergekoppelte Punktlichtquelle mit mehreren Doppel-Superlumineszenz-Dioden, um die Lichtquelle im spektralen Bereich von 490 nm bis 680 nm zur interferometrischen Nutzung zu betreiben
103	Lichtquelle für flächenhafte Beleuchtung des Messobjekts, z.B. zur Aufnahme mittels einer Matrix-Kamera
104	Linienlichtquelle, z.B. aufgebaut aus mehreren Superlumineszenz-Dioden
2	Single-mode Faser
3	Kollimator
4	Sensorkopf, vorzugsweise beweglich präzisionsgeführt in z-Richtung zur hochdynamischen Nachfokussierung
5	Mikroskop-Objektiv, vorzugsweise mit einer Brennweite $f = 40$ mm, einer numerische Apertur $N.A. = 0,09$ und mit einem Pupillendurchmesser d_P in der Fourier-Ebene von 7,2 mm
51	Mikroskop-Objektiv für Mirau-Interferometer

Bezugszeichen	Bezeichnung
52	Mikroskop-Objektiv, z.B. 20x-Mitutuo-Objektiv G Plan APO mit einer Brennweite $f=10$ mm, einer numerischen Apertur $N.A.=0,28$, einer einkorrigierten Glasweglänge von 3,5 mm und einem Objektfeld-Durchmesser von 0,55 mm, wozu ein Querversatz $\delta_q = 0,3$ mm gut passt
6	Michelson-Interferometer, nutzt den Ausgang B
61	Mirau- Interferometer
62	Linnik - Interferometer
63	Michelson-Interferometer, nutzt den Ausgang A
7	Strahlteileranordnung, z.B. 112° -Strahlteileranordnung
71	90° -Strahlteilerwürfel im Michelson-Interferometer 601 oder Linnik-Interferometer 62
72	Substrat für Strahlteiler
73	Ein- und Auskoppel-Strahlteilerwürfel, welcher vorzugsweise Licht oberhalb 750nm Wellenlänge transmittiert und Licht unterhalb von 720nm reflektiert
74	Farb-Strahlteiler für Ein- und Auskoppeln von Licht für Kamerabeobachtung, vorzugsweise Transmission oberhalb 560 nm, Reflexion unterhalb 560 nm
75	50:50-Ein- und Auskoppel-Strahlteilerwürfel für Beobachtungskamera
76	50:50-Ein- und Auskoppel-Strahlteilerwürfel für chromatisch-konfokale Sensorik zur Fokuslagenbestimmung
77	50:50-Ein- und Auskoppel-Strahlteilerwürfel für Mirau-Interferometer 61
78	50:50-Ein- und Auskoppel-Strahlteilerwürfel für Michelson-Interferometer 63
79	50:50-Strahlteilerwürfel, z.B. mit 3,5 mm Kantenlänge im Michelson-Interferometer 63
8	50:50-Strahlteiler-Schicht
81	Strahlteilerschicht, z.B. mit 80% Transmission und 20% Reflexion
91	Glaskeil
	Dieser Glaskeil entspricht in der optischen Wirkung auch einer Kompensationsplatte. Dieser Glaskeil ist mit seiner Außenseite senkrecht zur optischen Achse des Mikroskop-Objektivs ausgerichtet. Dieser Glaskeil hat auch eine Schutzfunktion. In Fig. 1 beträgt dessen Dicke in der Mitte zwischen 1,4 mm und 1,7 mm - je nach Justierzustand.
93	Kompensationsplatte in einem Linnik-Interferometer 62. Diese Kompensationsplatte ist hinsichtlich der Glasweglänge auf die Glasweglänge des Drei-Reflexionsflächen-Prismas 112 abgestimmt.
94	mechanischer Schutzwinkel
10	Dünnglas als Messobjekt mit 300 μ m Dicke
107	feinbearbeitetes Metallobjekt
108	Messobjekt mit rauer Oberfläche
109	Aluminiumoberfläche im Übergangsbereich zwischen optisch glatt und rau
110	optisch polierte Oberfläche
111	Drei-Reflexionsflächen-Prisma mit gekreuztem Strahlengang mit Kreuzungspunkt K mit einem Lateral-Versatz δ_q . In Fig. 1 beträgt $\delta_q = 0,5$ mm und die optische Weglänge beträgt um 1,6 mm.
112	Drei-Reflexionsflächen-Prisma aus Glas mit gekreuztem Strahlengang mit Kreuzungspunkt K und Geometrie für maximale numerische Apertur
113	Drei-Reflexionsflächen-Anordnung in Luftausführung mit gekreuztem Strahlengang mit Kreuzungspunkt K
114	Drei-Reflexionsflächen-Prisma in W-Ausbildung

Bezugszeichen	Bezeichnung
115	Befestigungskomponenten für Drei-Reflexionsflächen-Prisma 112
116	Fügeflächen für Drei-Reflexions-Anordnung in Luftausführung 113
117	Tripelprisma, Raumecke
12	Eingangfläche des Drei-Reflexionsflächen-Prismas mit gekreuztem Strahlengang
13	erste Spiegelfläche des Drei-Reflexionsflächen-Prismas 111
131	erste Spiegelfläche der Drei-Reflexions-Anordnung in Luftausführung 112
132	erste Spiegelfläche des Drei-Reflexionsflächen-Prismas in W-Ausbildung 114
14	zweite Spiegelfläche des Drei-Reflexionsflächen-Prismas 111
141	zweite Spiegelfläche der Drei-Reflexions-Anordnung in Luftausführung 112
142	zweite Spiegelfläche des Drei-Reflexionsflächen-Prismas in W-Ausbildung 114, z.B. als Mikrospiegel ausgebildet
15	dritte Spiegelfläche des Drei-Reflexionsflächen-Prismas 111
151	dritte Spiegelfläche der Drei-Reflexions-Anordnung in Luftausführung 112
152	dritte Spiegelfläche des Drei-Reflexionsflächen-Prismas in W-Ausbildung 114
16	Ausgangs-Abbildungsstufe Chromatisch voll auskorrigiertes optisches Gesamtsystem 2 vom Interferometer-Ausgang bis zum Detektor
17	Objektiv am Ausgang des Michelson-Interferometers, $f= 40$ mm und N.A. = 0,09 in Fig. 1
171	hochaperturiges Mess-Mikroskop-Objektiv im Strahlengang eines Linnik-Interferometers
172	hochaperturiges Referenz-Mikroskop-Objektiv im Strahlengang eines Linnik - Interferometers
18	Zylinder-Optik zur Verdichtung des Strahlenbündels auf eine schnelle Zeilen-Kamera 20
19	Auskoppelstrahlteiler-Platte
191	Strahlteilerschicht auf der Auskoppelstrahlteiler-Platte. Die Strahlteilerschicht dämpft vorzugsweise in Transmission etwas die „Seitenbänder“ im Spektrum, damit für die Mehrfach-Fotodioden-Detektoren ein WLI-Wavelet mit einer etwas breiteren schwach modulierten Einhüllenden und auf der schnellen Zeilen-Kamera 20 ein WLI-Wavelet mit einer möglichst schmalen Einhüllenden entsteht.
192	optische 4f-Transferstufe, bestehend aus Tubusobjektiv 241 und Kameraobjektiv 241
20	schnelle Zeilen-Kamera mit 1024 Pixeln, detektiert ein räumliches Weißlicht-Interferogramm (rWLI)
201	schnelle Matrix-Kamera, detektiert mehrere Weißlicht-Interferogramme (rWLI i , wobei i eine Ganzzahl ist) von mehreren Messpunkten
202	schnelle Matrix-Kamera, detektiert mehrere Weißlicht-Interferogramme von einem Messpunkt
209	(schnelle) Matrix- Kamera, detektiert ein Messobjekt
210	(sehr schneller) Vierfach-Fotodioden-Detektor für Laserinterferometer 41
211	sehr schneller Mehrfach-Fotodioden-Detektor - auf der linken Feldseite zum Detektieren der linken Amplitudenwerte in Echtzeit für Defokus-Signal
212	(sehr schneller) Mehrfach-Fotodioden-Detektor - auf der rechten Feldseite zum Detektieren der rechten Amplitudenwerte in Echtzeit für Defokus-Signal
213	(sehr schneller) Mehrfach-Fotodioden-Detektor mit Hardware-Prozessor
214	Digitaler Signal-Prozessor zur Berechnung des Gravitationsschwerpunktes (CG - Center of Gravity) und den Ort der Phasenlage null am Gravitationsschwerpunkt

Bezugszeichen	Bezeichnung
216	Digitaler Signal-Prozessor zur Berechnung der Differenz der Summensignale der Oszillationen des rWLI's unter der Einhüllenden vom linken und rechten Bereich des Feldes
217	schneller elektronischer Leistungs-Verstärker
218	Hochdynamisches Piezosteller-System zur Stellung der Tiefenlage mit integriertem elektronischen Leistungs-Verstärker 217
219	Hochdynamisches Mess-System zur Messung der Tiefenlage des in z-Richtung beweglichen Sensorkopfes 4
221	Dünnschicht-Apodisationsfilter in Fourier-Ebene FE'172 oder in einer zu dieser optisch konjugierten Ebene
222	Optisch dünnes Apodisationsfilter mit radialsymmetrischer Gauß-Charakteristik auf Frontlinse des Referenz-Mikroskop-Objektivs 172 Das ermöglicht, die Referenzbündel-Kugelwelle deutlich zu verkleinern, ohne stärkere schädliche Beugungseffekte zu bewirken, damit die resultierende die Referenzbündel-Kugelwelle dann zur deutlich kleineren N.A. von etwa 0,48 des Prismen-Drei-Reflexionen-Referenz-Reflektors passt. Das Messobjektiv 172 im Objektstrahlengang O hat dagegen eine NA von 0,8. Dies stellt aber kein Problem dar, da nur in der Pupillenmitte rWLI's ausgewertet werden.
23	Substrat für das Apodisationsfilter 221 in der Fourier-Ebene FE 172
241	Tubusobjektiv
242	Kameraobjektiv
31	Breitband Punktlicht- Quelle, vorzugsweise im Spektralbereich von 580nm bis 700 nm. Vorzugsweise liefert die Breitband Punktlicht- Quelle t das
	Messlicht für einen chromatisch-konfokalen Punkt-Sensor
33	Hyperchromatisches System zur Tiefenaufspaltung von Foki
35	Lichtquelle, z.B. emittierend im Spektralbereich 480 nm bis 550 nm
36	Pinhole
37	Doppel-Lochblende, sperrt alle Bündel außer die für das rWLI
38	Detektor, der aus einer 100 KHz-Linien-Kamera mit vorgeordnetem Spektrometer für einen Lichtpunkt im Wellenlängenbereich von 580 nm bis 700 nm aufgebaut ist
39	faserbasierter Mikroresonator, ausgebildet als Fabry-Perot-Interferometer
41	Laserinterferometer um Bewegung des Sensorkopfes in z-Richtung zu messen
A	lokaler Amplitudenwert
AHS	Ausgangshauptstrahl des aus dem Endreflektor austretenden Bündels
alpha_P	halber Aperturwinkel im Glas des Prismas 112
b	lateraler Abstand zwischen benachbarten rWLI
beta_B	Winkel zwischen den reflektierten Laserstrahl-Bündeln vom Drei-Reflexionsflächen-Prisma 114 und Objekt 110
BF	Bündelfokus
BE	Bezugsebene
EB 1	Eingangsbündel von Lichtquelle 1
EHS	Eingangshauptstrahl des in den Endreflektor des eintretenden Bündels
epsilon	Keilwinkel des Glaskeils 91, der vorzugsweise kleiner/gleich ein Altgrad ist
delta_beta	Winkel zwischen den interferierenden Wellenfronten RW und OW bei der Detektion

Bezugszeichen	Bezeichnung
delta_q	Querversatz des Bündels im Referenzarm eines Interferometers
d_P	Pupillendurchmesser des Mikroskop-Objektivs 5
d_Pr	Mittendicke des Glaskeils 91
EB_1	Eingangsbündel von fasergekoppelter Punktlichtquelle 1 kommend, nach Kollimator 3
f5	Brennweite des Mikroskop-Objektivs 5
F'52	Brennpunkt des Mikroskop-Objektivs 52
FE 5	Fourier-Ebene/Brennebene des Mikroskop-Objektivs 5
FE 172	Fourier-Ebene/Brennebene des Mikroskop-Objektivs 172
Feld-Dmr_52	Felddurchmesser des 20x Mitutoyo-Mikroskop-Objektivs 52, Dieser beträgt um 0,5 mm.
FO	Fokus des Objektstrahlenbündels
FO_i	Foki der Objektstrahlenbündel der Anzahl i
FR	Fokus des Referenzstrahlenbündels
FR_i	Foki der Referenzstrahlenbündel der Anzahl i
gamma	Winkel
k	Gerade
kappa	Winkel zwischen optischer Achse des Objektstrahlengangs im Interferometer 6 und optischer Achse des Strahlengangs am Ausgang B des Interferometers 6
IG	Interferenzgebiet
L	einfache optische Weglänge des Mikroresonators
Lbk	Laserbündel kollimiert
Lbf	Laserbündel fokussiert
rWLI	räumliches Kurzkohärenz-Interferogramm
rWLI_i	räumliche Kurzkohärenz-Interferogramme der Anzahl i
OPD	optischer Gangunterschied (optical path difference)
N.A.	numerische Apertur
OW	Objektwellenfront, geneigt zur Referenz-Wellenfront RW
OW	Objekt-Wellenfront
P	Leuchtpunkt
P'	Bild des Leuchtpunkts im Objektarm
P''	Bild des Leuchtpunkts im Referenzarm
P''_entf	Bild des optisch konjugierten Leuchtpunkts P'' im Objektraum nach Entfaltung, der kohärent ist zu P'
r	Radius des Apodisationsfilters 18
p_rWLI	Periodenlänge einer Oszillation im räumlichen Interferogramm (rWLI)
RAS	Randstrahl des fokussierten Bündels
RW	Referenzwellenfront, geneigt zur Objekt-Wellenfront OW
T	Transmissionsgrad eines Apodisationsfilters 221 oder 222 über dem Radius r
T_S	Tiefenmessbereich der WLI-Sensor-Anordnung, insbesondere in Form eines Mirau-Interferometers 61
tau	Winkel zwischen Eingangshauptstrahl EHS und Spiegelfläche 14
VSE	Virtuelle Spiegelebene

Bezugszeichen	Bezeichnung
rWLI	räumliches Weißlicht-Interferogramm
x_O	Vorschubrichtung des Objekts
x_S	Vorschubrichtung der Sensor-Anordnung
z_rWLI	Tiefenmesswert, welcher aus dem rWLI-Signal errechnet wird

Patentansprüche

1. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie, welche folgende Mittel umfasst:
eine Quelle kurzkohärenter elektromagnetischer Strahlung (1,103, 104) zur Beleuchtung eines Objekts (10, 107, 108, 109, 110),
ein Interferometer mit einem Objektstrahlengang (O), einem Referenzstrahlengang (R) und einer Messebene (ME) im Objektstrahlengang, in der sich zumindest näherungsweise die optisch anzumessenden Oberflächen- oder Volumenelemente des Objekts (10, 107, 108, 109, 110) befinden; und
mindestens einen gerasterten Detektor (20, 201, 202) zur Detektion elektromagnetischer Strahlung in Form mindestens eines räumlichen Interferogramms, wobei:
im Referenzstrahlengang (R) des Interferometers mindestens ein End-Reflektor als Referenzreflektor angeordnet ist, wobei der End-Reflektor als eine Dreifach-Reflexions-Anordnung (111, 112, 113) mit drei Reflexionsflächen ausgebildet ist,
die drei Reflexionsflächen jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zu einer gemeinsamen Bezugsebene (BE) liegen; und
die drei Spurgeraden der Ebenen, welche durch die drei Reflexionsflächen dargestellt werden, in der Bezugsebene (BE) ein Dreieck ABC mit einem stumpfen Winkel bilden, wobei die erste Reflexionsfläche (13, 131, 132) auf einer Geraden liegt, auf welcher die Punkte C und B liegen, die zweite Reflexionsfläche (14, 141, 142) auf einer Geraden (m) liegt, auf welcher die Punkte A und C liegen und die dritte Reflexionsfläche (15, 151, 152) auf einer Geraden (k) liegt, auf welcher die Punkte A und B liegen,
der Strahlengang der Dreifach-Reflexions-Anordnung (111, 112, 113) gekreuzt oder ein W-Strahlengang ist, die zweite Reflexionsfläche (14, 141) als zweite der drei Reflexionsflächen zur Reflexion eines fokussierten Bündels FB genutzt wird und die erste Reflexionsfläche (13, 131) als erste oder dritte der drei Reflexionsflächen zur Reflexion genutzt wird,
die erste Reflexionsfläche (13, 131, 132) und die zweite Reflexionsfläche (14, 141, 142) in einem spitzen Winkel relativ zueinander angeordnet sind,
die erste Reflexionsfläche (13, 131) und die dritte Reflexionsfläche (15, 151) in einem stumpfen Winkel CBD relativ zueinander angeordnet sind, und
es eine Normale N_m vom Punkt B auf die zweite Reflexionsfläche (14, 141) gibt,
gekennzeichnet dadurch, dass für die Dreifach-Reflexions-Anordnung (111, 112, 113) ein Winkel gamma zwischen einem Randstrahl (RAS) des ein- oder des austretenden Bündels und der zweiten Reflexionsfläche (14, 141) besteht und dabei für den Winkel gamma < 12° gilt.
2. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach Anspruch 1, wobei der Bündelfokus (BF) zumindest näherungsweise auf der Normalen N_m und zumindest näherungsweise in der Nähe der zweiten Reflexionsfläche (14, 141) liegt.
3. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Dreifach-Reflexions-Anordnung (111, 112, 113) als Luftspiegelgruppe oder als Prismenspiegelgruppe ausgebildet ist.
4. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die vom fokussierten Bündel (FB) genutzte dritte Reflexionsfläche (15, 151) mehr als dreifach so lang ausgebildet ist als die zweite Reflexionsfläche (14, 141).
5. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Dreifach-Reflexions-Anordnung (111, 112, 113) mit einem vorzeichenbehafteten Winkel tau kleiner als -1° ausgebildet ist, wobei der Winkel tau der Winkel zwischen einem Eingangshauptstrahl (EHS) des eintretenden Bündels und der zweiten Reflexionsfläche (14, 141) ist.
6. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach mindesten einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Lichtquelle als Frequenzkamm-Laser mit einer Mikro-Kavität ausgebildet ist.

7. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei es im Objektmessfeld mindestens ein Tiefenmesssystem zum Erfassen des Messobjekts gibt, welches mit seinem Strahlengang zumindest näherungsweise koaxial zum interferometrischen Strahlengang angeordnet ist.

8. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach Anspruch 7, wobei das Tiefenmesssystem chromatisch-konfokal ausgebildet ist.

9. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei dem Interferometer im Referenzarm ein Abschwächungsfilter (221, 222) mit einem Maximum der Transmission im Zentrum des Abschwächungsfilters zur Verringerung des Aperturwinkels des Referenzstrahlenbündels zugeordnet ist.

10. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach Anspruch 9, wobei:
das Abschwächungsfilter (221, 222) mit radialsymmetrischer Gauß-Charakteristik ausgebildet ist; oder
das Abschwächungsfilter mit einer eindimensionalen Charakteristik ausgebildet ist.

11. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei auf die dritte Reflexionsfläche (15, 151) ein streifender Einfall zumindest für den Randstrahl eines Bündels mit einem Einfallswinkel größer als 75° besteht.

12. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei:
das Interferometer und der Detektor (20, 201, 202) innerhalb eines Sensorkopfes (4) angeordnet sind; und
dem Sensorkopf (4) ein hochdynamisches Piezosteller-System (218) mit diesem beigeordneten hochauflösenden Tiefenmesssystem (219) zugeordnet ist.

13. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei ein Winkel κ zwischen optischer Achse des Objektstrahlengangs (O) im Interferometer und optischer Achse des Strahlengangs am Ausgang des Interferometers zwischen 96° und 140° liegt.

14. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei ein schiebbarer Glaskeil (91) im Objektarm auf der optischen Achse eines Mikroskop-Objektivs angeordnet ist.

15. Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach Anspruch 14, wobei die Mittendicke d_{Pr} des Glaskeils (91) zumindest näherungsweise der Glasweglänge eines Drei-Reflexionsflächen-Prismas (111, 112) entspricht.

16. Verfahren zur robusten Zweistrahl-Interferometrie zur Erfassung von Abstand, Tiefe, Profil, Form, Welligkeit und/oder Rauheit oder der optischen Weglänge in oder an technischen oder biologischen Objekten, und/oder zur optischen Kohärenz-Tomografie (OCT) mit Bildung eines räumlichen Weißlicht-Interferogramms, umfassend:

Bereitstellen einer Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie, wobei die Anordnung folgende Mittel umfasst:

eine Quelle kurzkohärenter elektromagnetischer Strahlung zur Beleuchtung des Objekts,

ein Interferometer mit einem Objektstrahlengang (O), mindestens einem Referenzstrahlengang (R) und einer Messebene im Objektstrahlengang, in der sich zumindest näherungsweise die optisch anzumessenden Oberflächen- oder Volumenelemente des Objekts befinden, und

mindestens einen gerasterten Detektor zur Detektion elektromagnetischer Strahlung in Form mindestens eines räumlichen Interferogramms, wobei

im Referenzstrahlengang (R) des Interferometers mindestens ein End-Reflektor mit drei Reflexionsflächen als Referenzreflektor angeordnet ist, und die drei Reflexionsflächen jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zu einer gemeinsamen Bezugsebene liegen, gekennzeichnet dadurch, dass

im Referenzstrahlengang (R) eine Reduzierung des Aperturwinkels des Referenz-Strahlenbündels mit bündelbegrenzenden Mitteln (221, 222) durchgeführt wird.

17. Verfahren zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach Anspruch 16, wobei die Reduzierung des Aperturwinkels des Referenz-Strahlenbündels mit bündelbegrenzenden Mitteln zumindest näherungsweise in der

Fourier-Ebene eines Objektivs im Referenzstrahlengang (R) eines Linnik-Interferometers (62) durchgeführt wird.

18. Verfahren zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach mindestens einem der Ansprüche 16 und 17, umfassend Bilden eines Balance-Signals für eine Fokus-Regelung des Interferometers (6, 61, 62), wobei um das Balance-Signal zu bilden, die Beträge I_{links} und I_{rechts} der Intensitäten benachbarter Fotoelemente eines Fotodioden-Detektors (211, 212, 213) oder Pixel eines gerasterten Detektors, die vom räumlichen Weißlicht-Interferogramm (WLI) links und rechts von einem Referenzpunkt RP angeordnet sind, mittels Rechenwerk (214, 216) bestimmt und aufsummiert werden, wodurch jeweils die Summen S_{links} und S_{rechts} erhalten werden; und die beiden Summen S_{links} und S_{rechts} subtrahiert werden und daraus das vorzeichenbehaftete Balance-Signal abgeleitet wird.

19. Verfahren zur robusten Zweistrahl-Interferometrie nach mindestens einem der Ansprüche 16 bis 18, wobei das Interferometer und der Detektor (20, 201, 202) innerhalb eines Sensorkopfes (4) angeordnet sind, und dem Sensorkopf (4) elektromechanische hochdynamische Mittel (218) zur Nachführung des Sensorkopfes (4) zugeordnet sind, die in Mess-Echtzeit den Sensorkopf (4) an jedem kooperativen Messpunkt stets im wellenoptischen Schärfentiefebereich halten, wobei das Messergebnis stets aus der vorzeichenbehafteten Addition des Tiefenmesswertes des Nachführ-Tiefenmesssystems und des Tiefenmesswertes z_{rWLI} , welcher aus dem räumlichen Weißlicht-Interferogramm errechnet wird, gebildet wird.

20. Verfahren zur robusten Zweistrahl-Interferometrie zur Erfassung von Abstand, Tiefe, Profil, Form, Welligkeit und/oder Rauheit oder der optischen Weglänge in oder an technischen oder biologischen Objekten, und/oder zur optischen Kohärenz-Tomografie (OCT) mit Bildung eines räumlichen Weißlicht-Interferogramms, umfassend:

Bereitstellen einer Anordnung zur robusten Zweistrahl-Interferometrie, wobei die Anordnung folgende Mittel umfasst:

eine Quelle kurzkohärenter elektromagnetischer Strahlung zur Beleuchtung des Objekts,

ein erstes Interferometer mit einem Objektstrahlengang (O) und mit mindestens einem Referenzstrahlengang (R), und einem Objektstrahlengang, in dem sich das Objekt befindet,

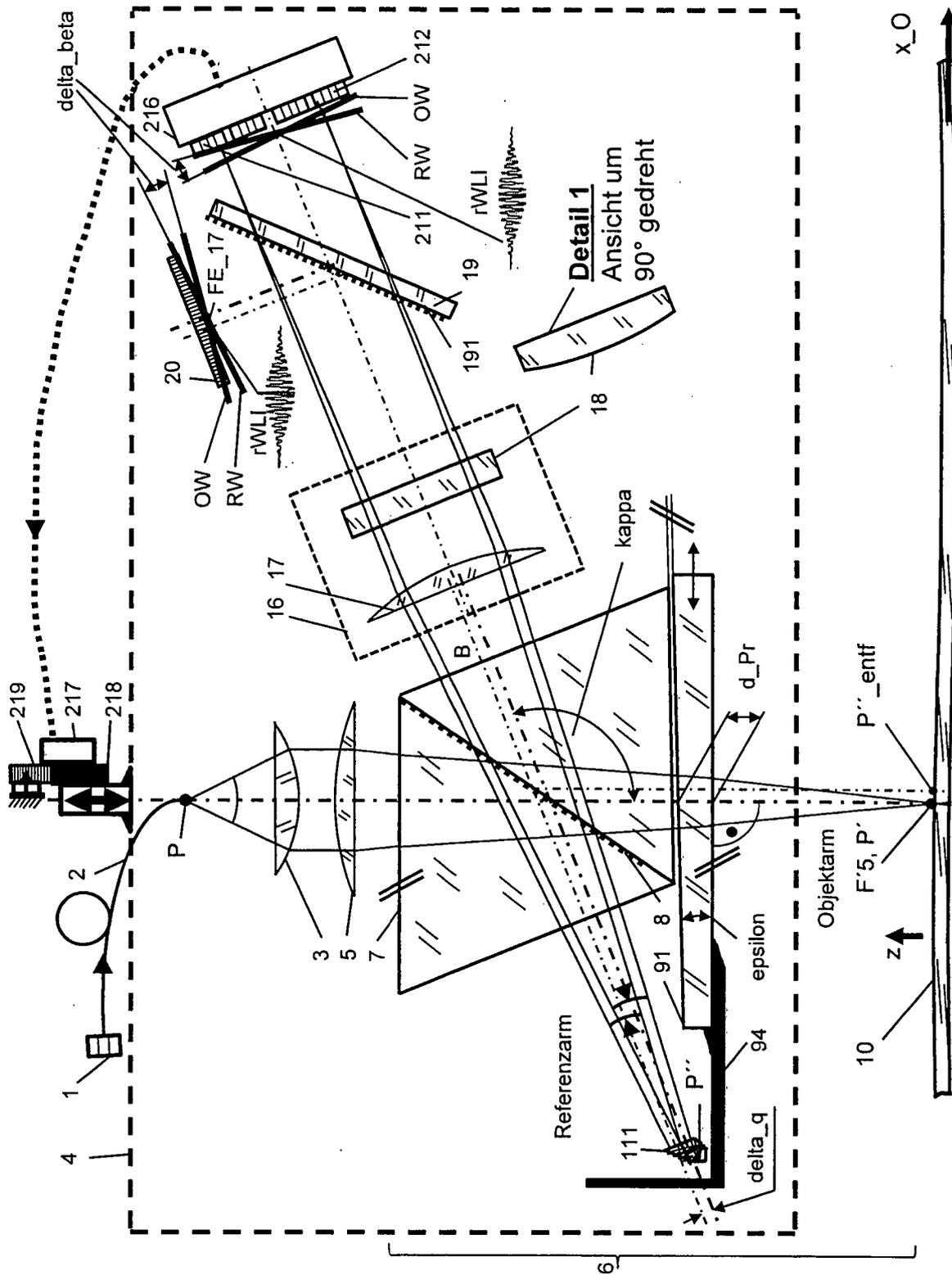
mindestens einen gerasterten Detektor zur Detektion elektro-magnetischer Strahlung in Form mindestens eines räumlichen Interferogramms, wobei

im Referenzstrahlengang (R) des ersten Interferometers mindestens ein End-Reflektor mit drei Reflexionsflächen als Referenzreflektor, angeordnet ist und die drei Reflexionsflächen jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zu einer gemeinsamen Bezugsebene liegen, gekennzeichnet dadurch, dass

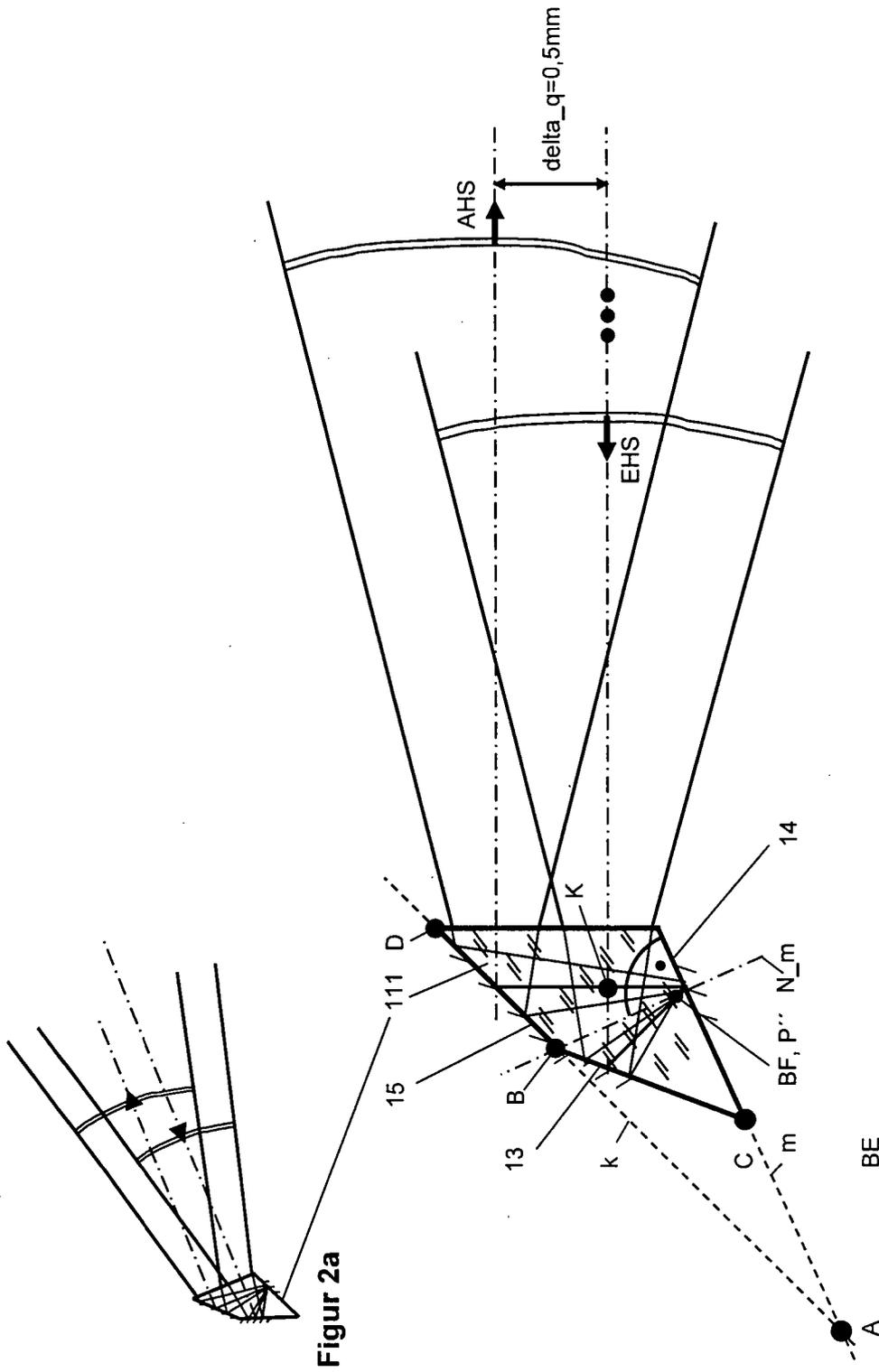
eine zweite optische Antastung des End-Reflektors (111, 112, 113, 114) mittels eines zweiten separaten Interferometers mit einer Laserlichtquelle durchgeführt wird, um eine Verschiebung in z-Richtung des zum End-Reflektor (114) gehörenden Interferometers (61) messen zu können, welches mit dem End-Reflektor (111, 112, 113, 114) starr verbunden ist.

Es folgen 13 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

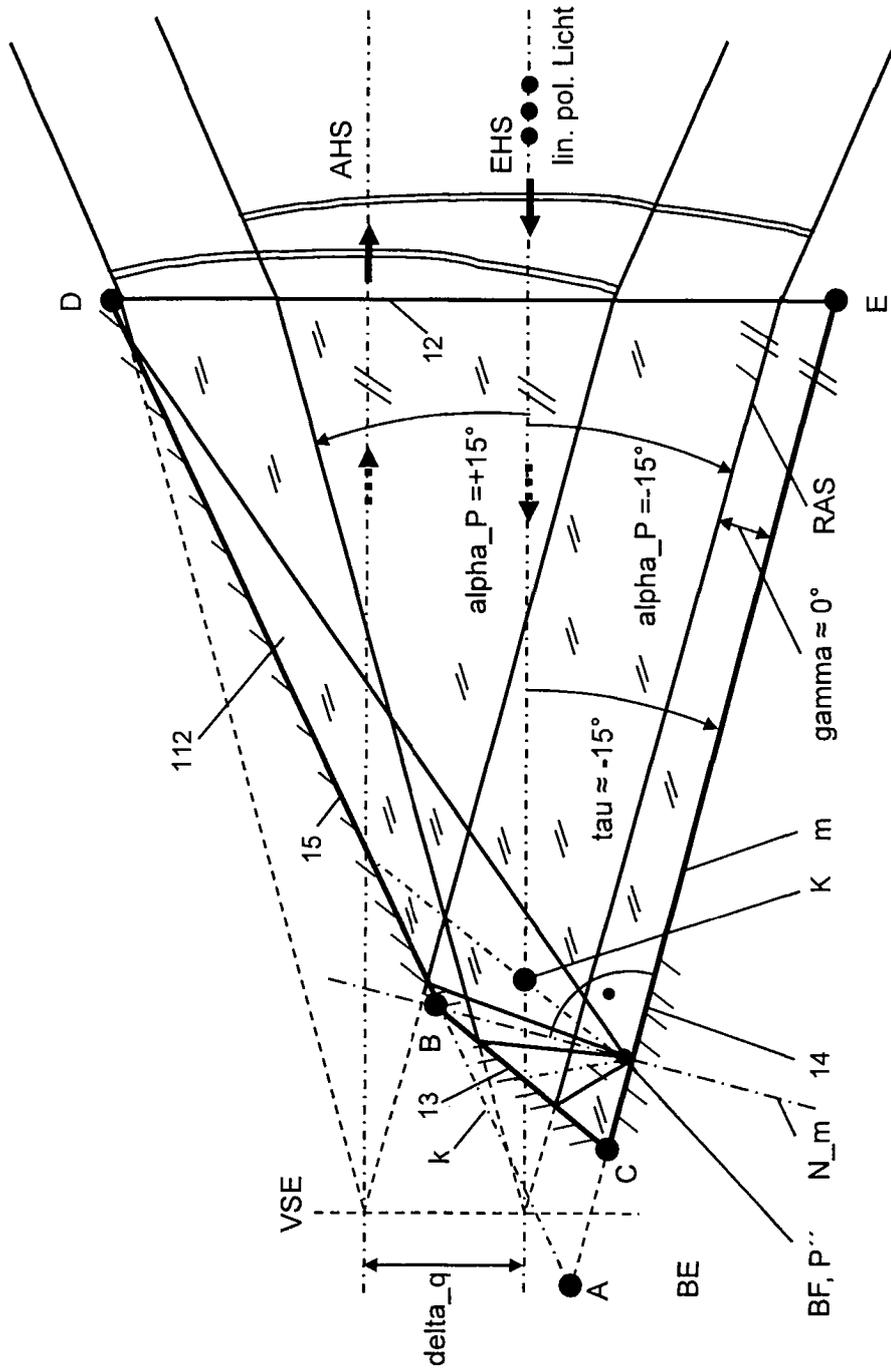


Figur 1

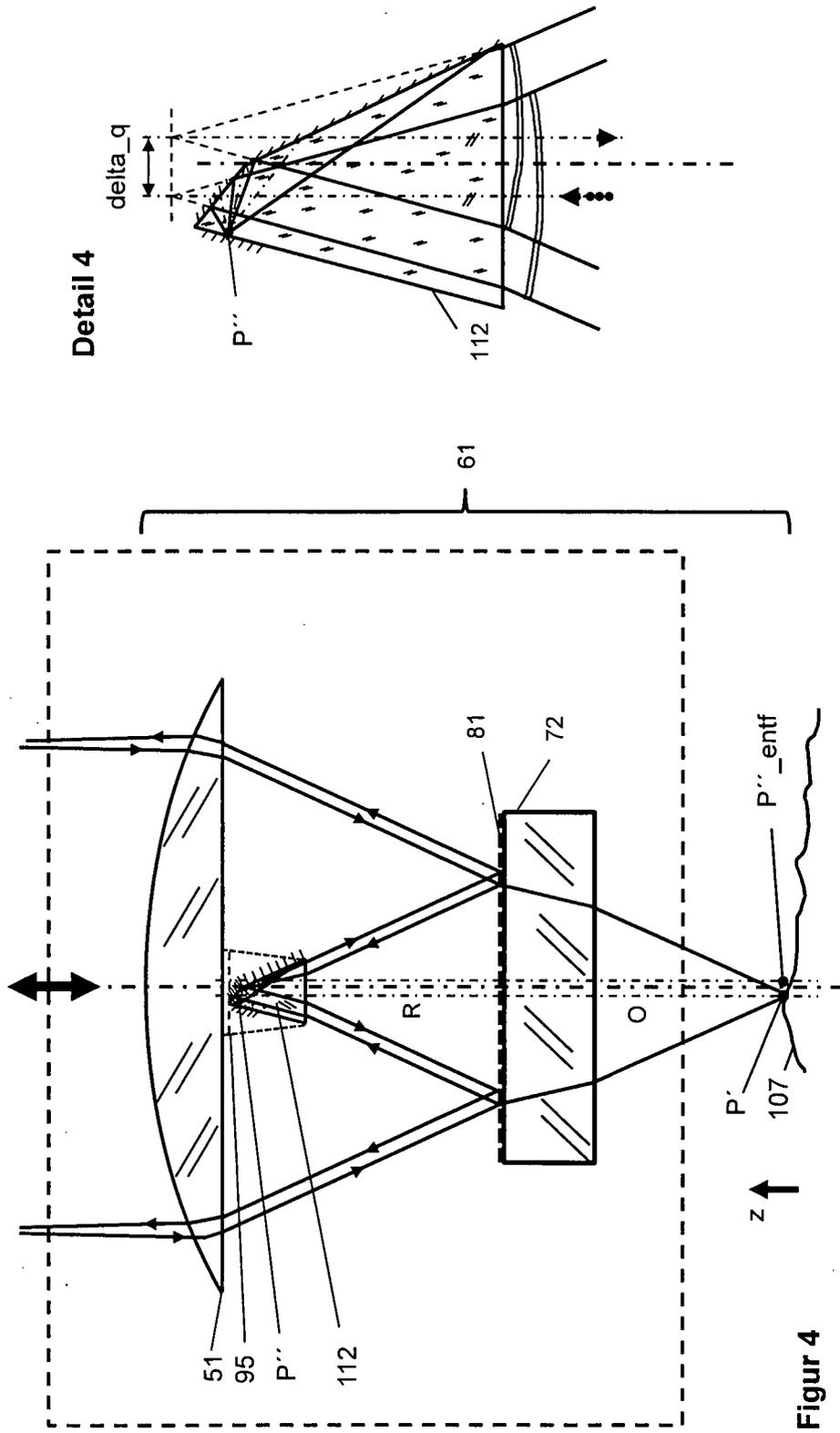


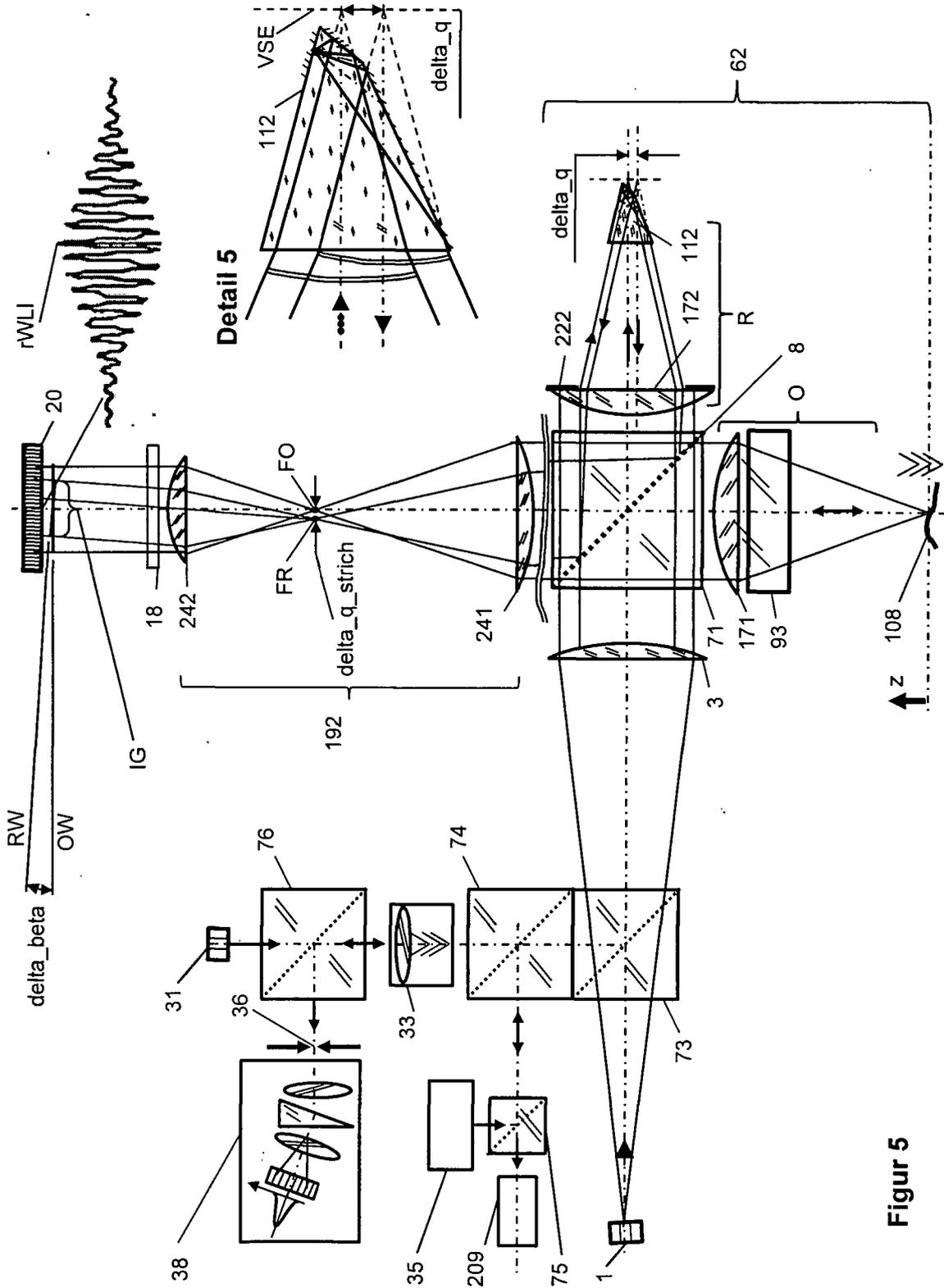
Figur 2a

Figur 2

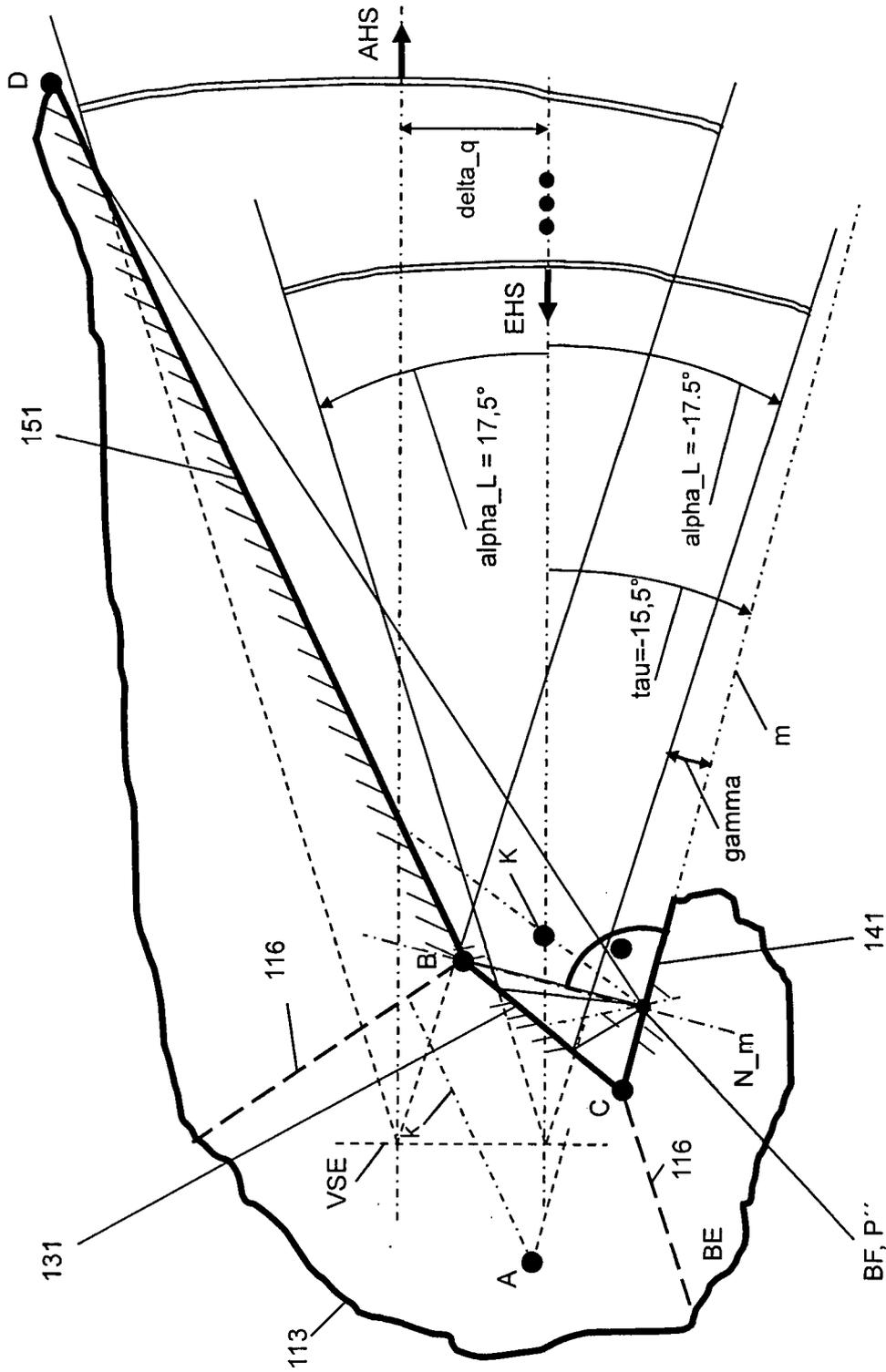


Figur 3





Figur 5



Figur 6

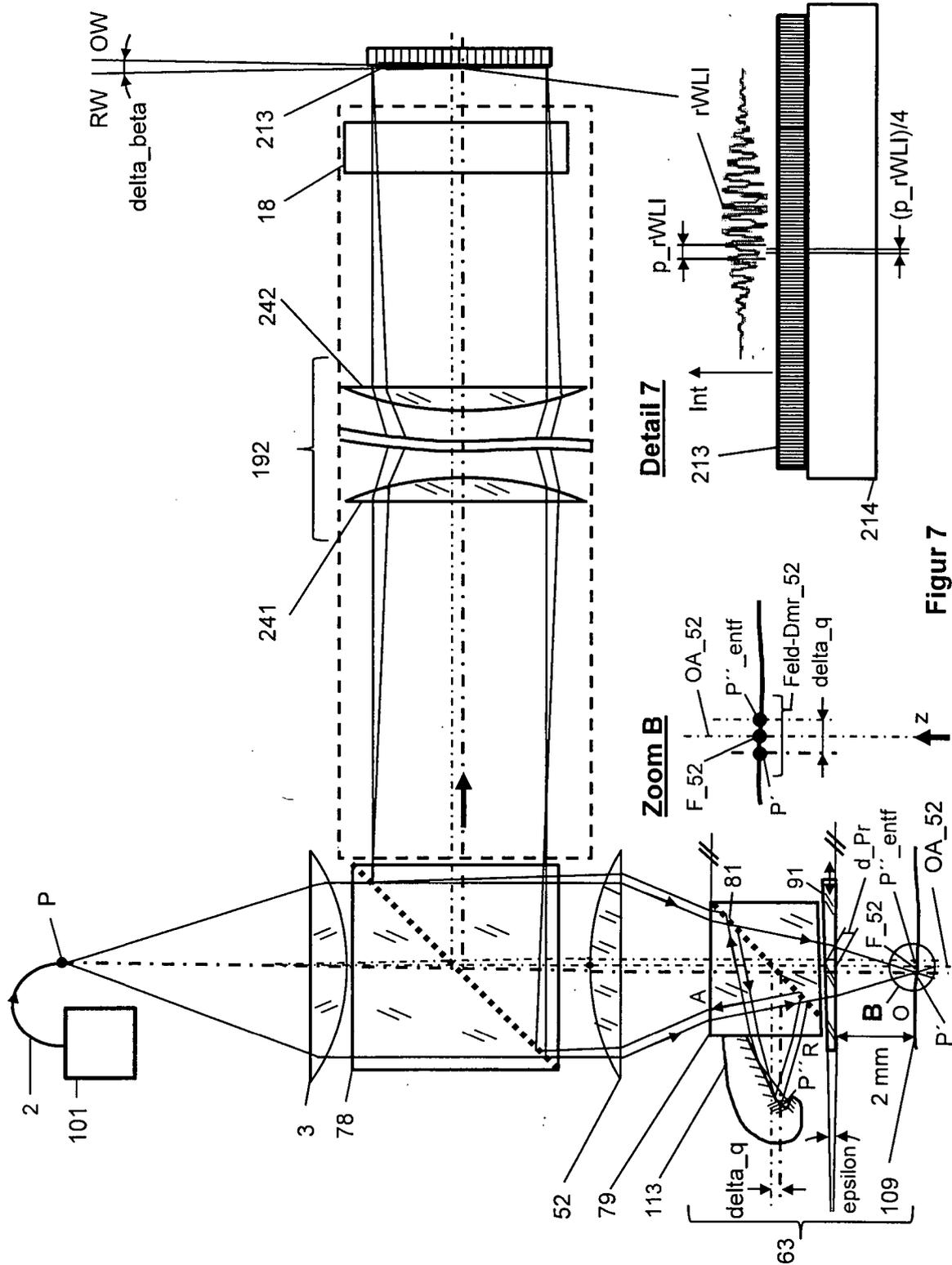
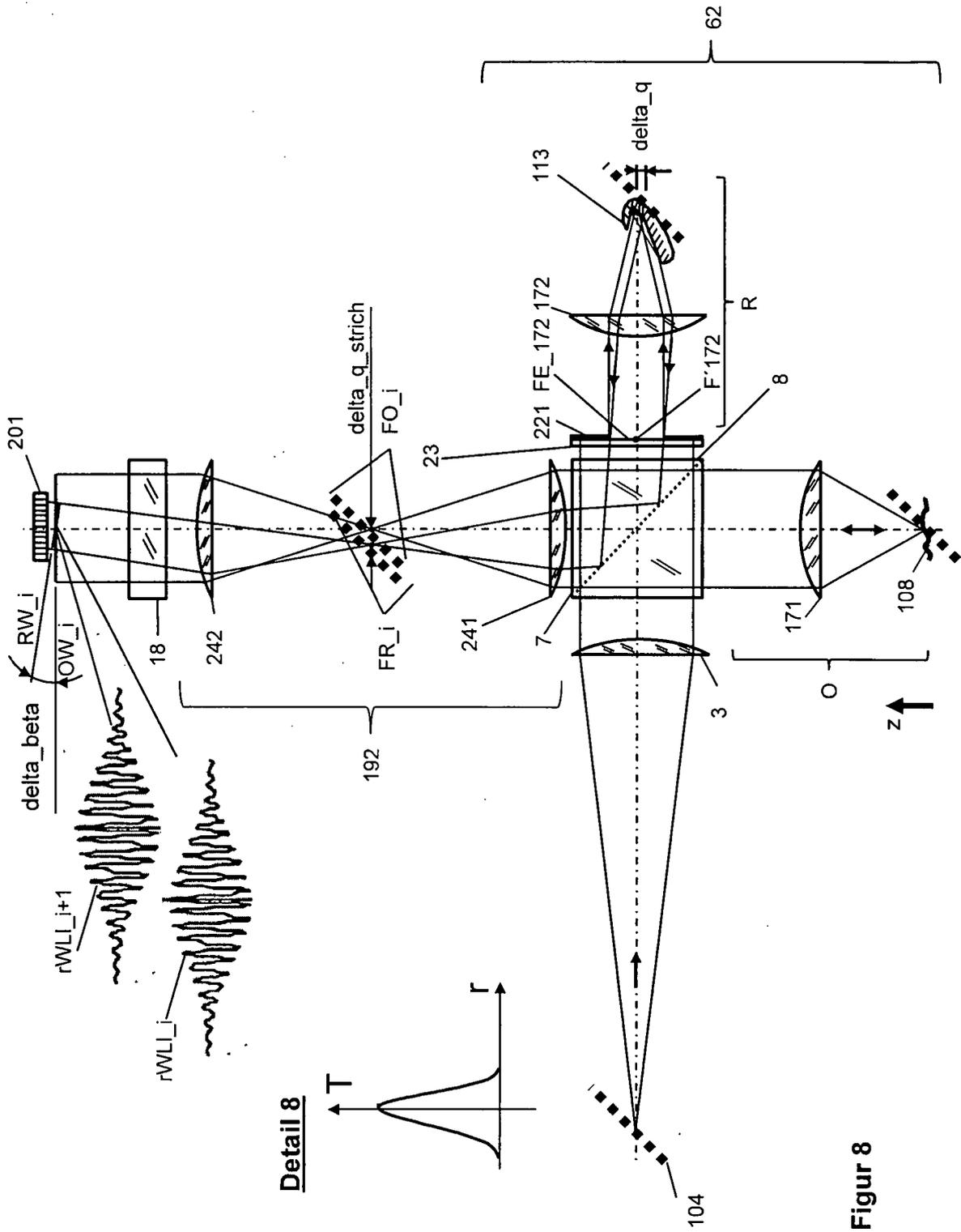


Figure 7



Detail 8

Figure 8

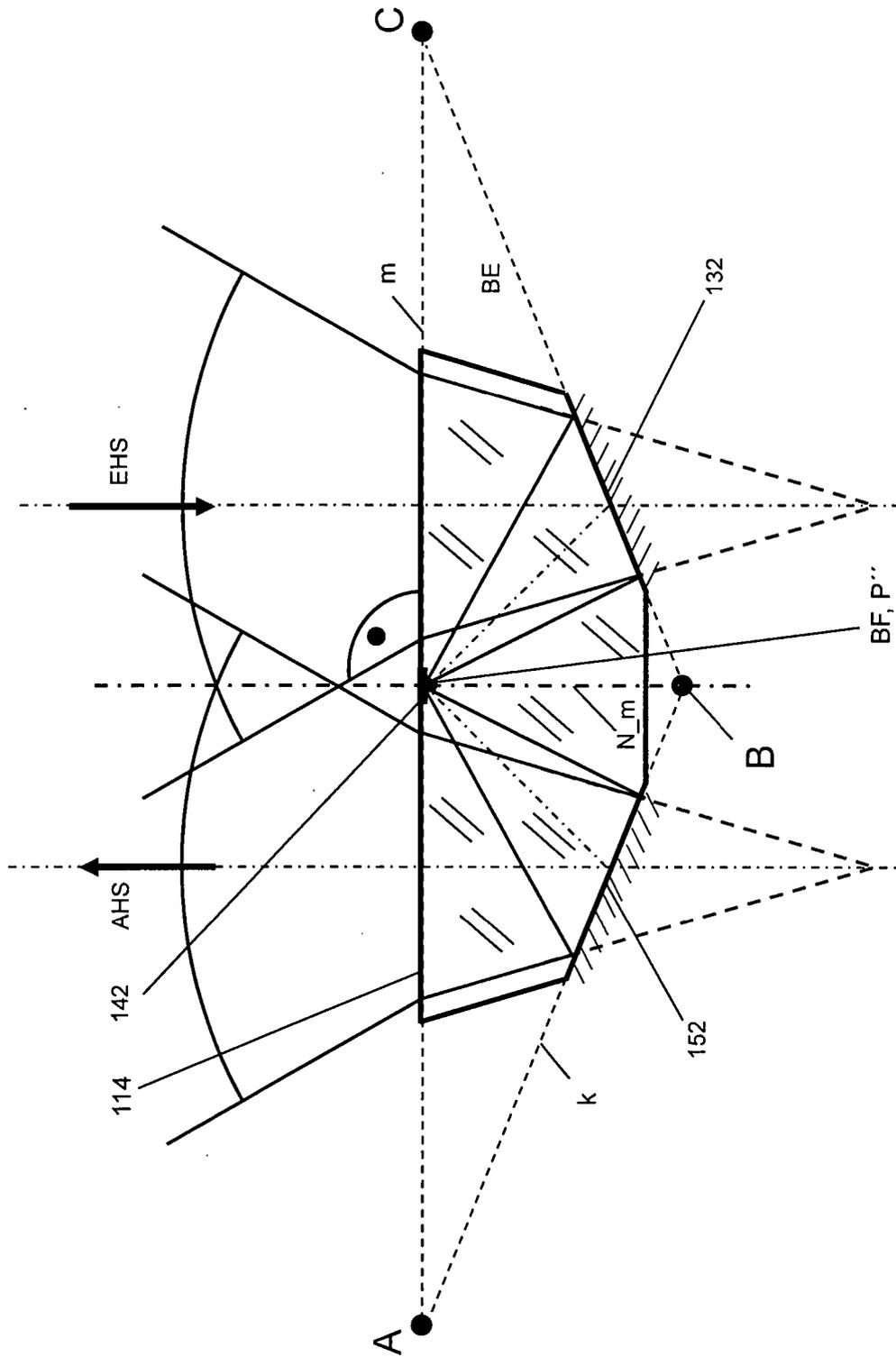
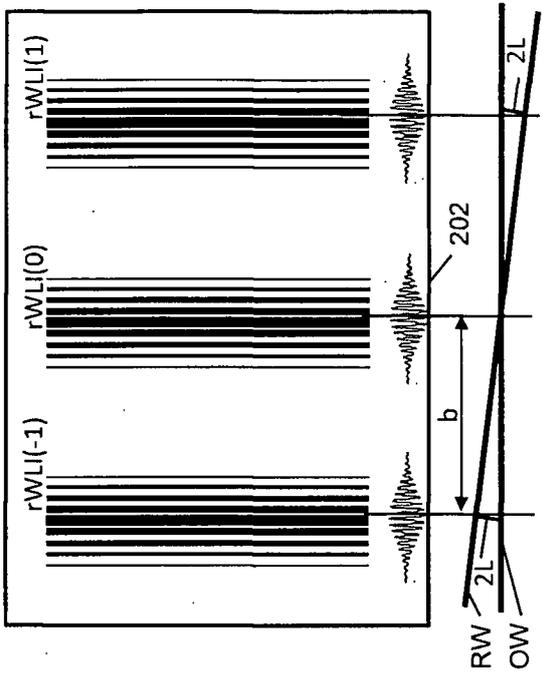
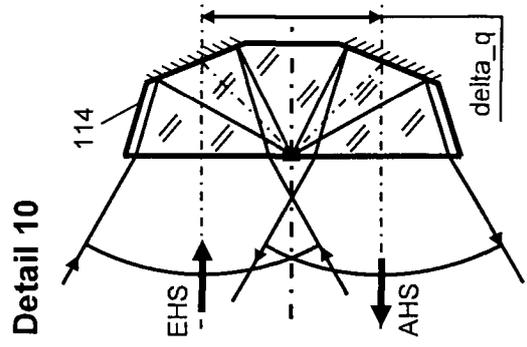


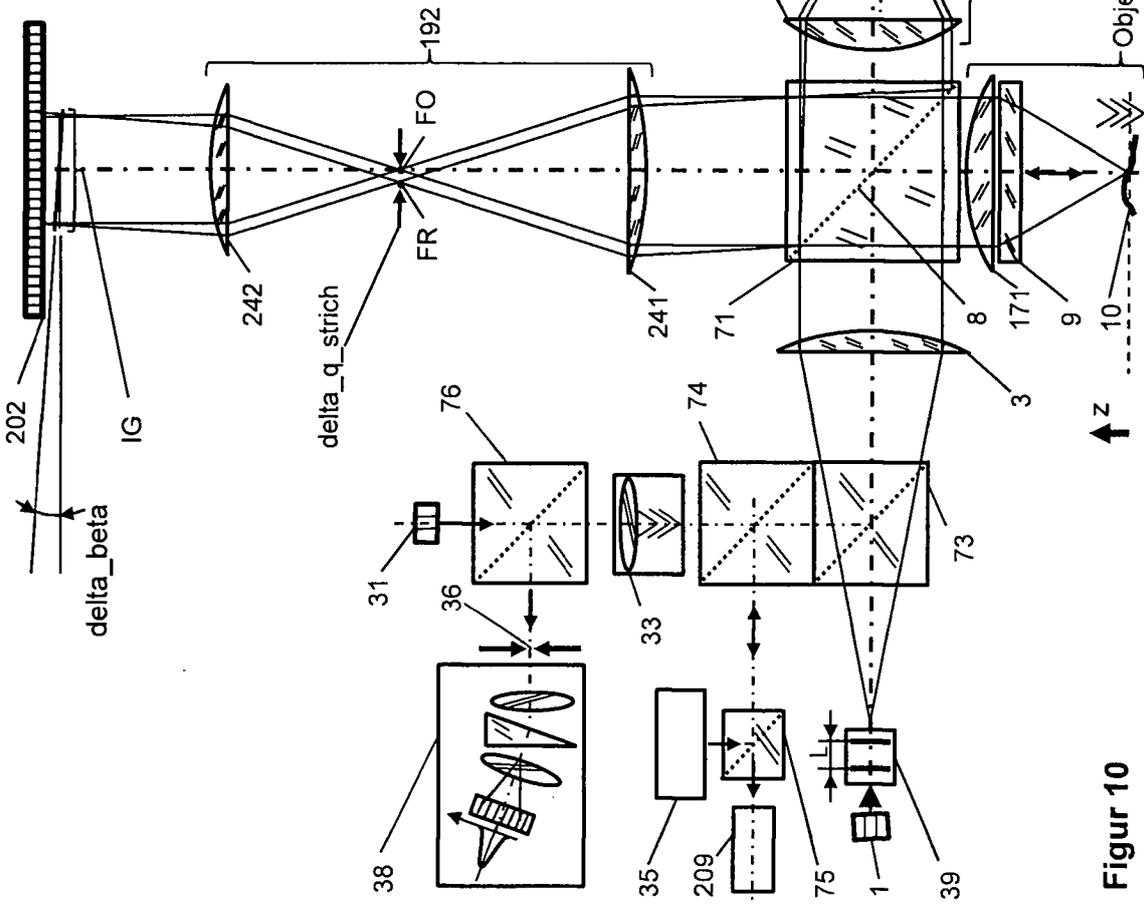
Figure 9



Figur 11



Detail 10



Figur 10

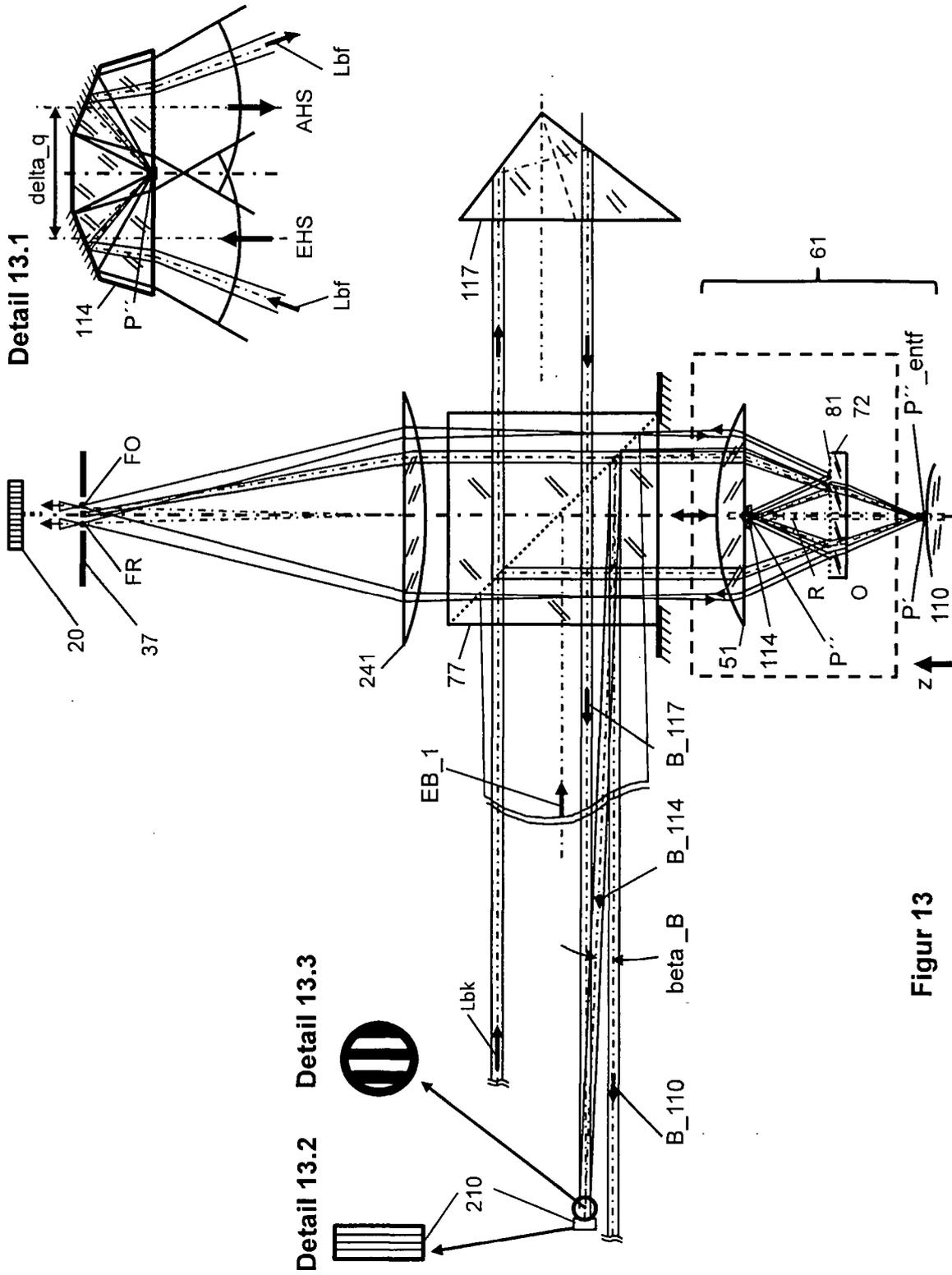
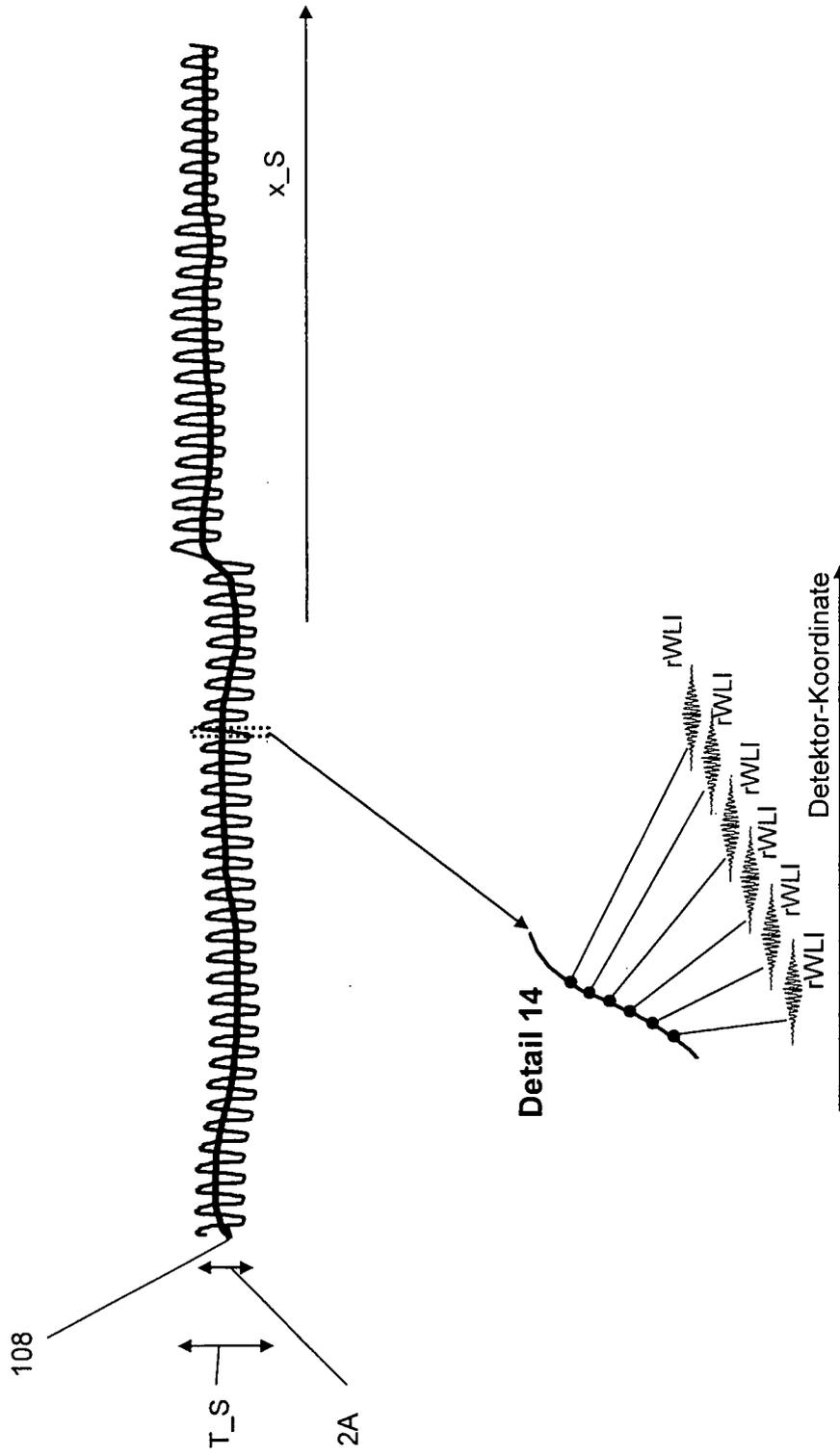


Figure 13



Figur 14