



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 130 901.5**

(22) Anmeldetag: **04.12.2018**

(43) Offenlegungstag: **04.06.2020**

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

(71) Anmelder:
Precitec Optronik GmbH, 63263 Neu-Isenburg, DE

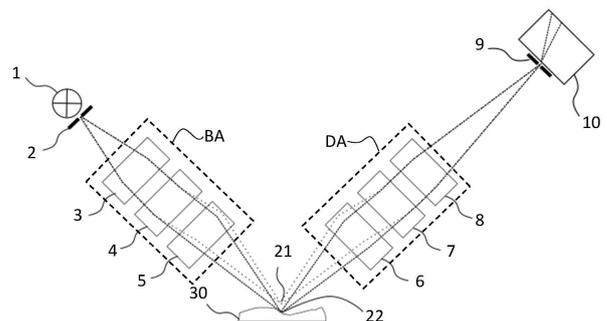
(72) Erfinder:
Dietz, Christoph, 63179 Obertshausen, DE

(74) Vertreter:
Schweiger & Partners, 80687 München, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Optische Messeinrichtung**

(57) Zusammenfassung: Eine Messeinrichtung umfasst eine Lichtquelle (1), welche Licht mit einer Mehrzahl von Wellenlängen emittiert, insbesondere ein kontinuierliches Spektrum aufweist. Die Messeinrichtung umfasst eine erste konfokale Blende (2), durch welche Licht der Lichtquelle (1) tritt, und eine Beleuchtungs-Abbildungsoptik (BA) mit einem ersten aufspaltenden optischen Element, welches als Prisma oder Gitter ausgeführt ist, auf. Die Beleuchtungs-Abbildungsoptik (BA) ist derart ausgebildet, dass das Licht kollimiert in das erste aufspaltende optische Element (4) tritt. Die Beleuchtungs-Abbildungsoptik (BA) weist ein erstes Linsensystem (5) mit mindestens einer ersten Linse, welche von dem ersten aufspaltenden optischen Element (4) räumlich getrennt ist, wobei die effektive Brennweite ($f(\lambda)$) des ersten Linsensystems (5) sich für verschiedene Wellenlängen (λ) signifikant unterscheidet, und wobei die Beleuchtungs-Abbildungsoptik (BA) derart ausgebildet ist, dass Fokuspunkte unterschiedlicher Wellenlängen an unterschiedlichen Orten entlang eines Liniensegments gebildet werden. Die Messeinrichtung ist dazu eingerichtet, ein Objekt (30) zu vermessen, welches das Liniensegment (41) schneidet und zumindest einen Teil des Lichts reflektiert.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Offenbarung betrifft eine optische Messeinrichtung, insbesondere eine optisch-chromatische Messeinrichtung zur Vermessung eines Objekts.

Es sind optische Messeinrichtungen zur Vermessung von Objekten bekannt. Aus der EP 2 076 733 B1 ist ein Messgerät zur Oberflächen- und Dickenbestimmung von Objekten bekannt, welches eine polychromatische Lichtquelle und einen optischen Prozessor- teil mit einer dispersiven Komponente umfasst, welche eine auf das zu messende Objekt gerichtete optische Strahlung chromatisch in eine nicht-axiale Richtung dispergiert. Verschiedene Wellenlänge der optischen Strahlung werden dabei in unterschiedlichen Höhen in Richtung der Normalen der Objekt- oberfläche fokussiert. Ein zweiter Prozessor- teil für optische Strahlung richtet Licht, welches vom Messobjekt in Spiegelreflexionsrichtung reflektiert wird, auf einen Detektor, welcher dazu eingerichtet ist, zur Bestimmung einer Oberflächenhöhe eine Wellenlänge maximaler Intensität zu bestimmen.

[0002] Es ist eine Aufgabe der Erfindung, eine verbesserte Messeinrichtung zur Vermessung eines Objekts anzugeben.

[0003] Gemäß einem Aspekt der Offenbarung wird eine Messvorrichtung vorgeschlagen, welche eine Lichtquelle umfasst, die eine Mehrzahl von Wellenlängen emittiert und deren Licht durch eine erste konfokale Blende in eine Beleuchtungs-Abbildungsoptik geleitet wird. Die Beleuchtungs-Abbildungsoptik umfasst ein erstes aufspaltendes optisches Element, welches als Prisma oder Gitter ausgeführt ist. Das erste aufspaltende optische Element spaltet das Licht in Abhängigkeit der Wellenlänge auf, d.h., dass Licht unterschiedlicher Wellenlängen, welches im gleichen Winkel auf das aufspaltende optische Element fällt, das aufspaltende optische Element unter unterschiedlichem Winkel verlässt. Im Falle eines Prismas ist dies der Dispersion geschuldet, während im Falle eines Gitters als Ausgangslicht die erste oder eine höhere Beugungsordnung (positive oder negative Beugungsordnungen) verwendet wird, welche spektral aufgespalten ist.

[0004] Das Licht tritt dabei für alle Wellenlängen kollimiert in das erste aufspaltende optische Element ein. Dies ist nur dann möglich, wenn zwischen Lichtquelle und erstem aufspaltenden optischen Element kein Element mit einer deutlich wellenlängenabhängigen Brennweite angeordnet ist, insbesondere keine Linse oder Linsenkombination mit ausgeprägter chromatischer Aberration.

[0005] Die Beleuchtungs-Abbildungsoptik umfasst zusätzlich ein erstes Linsensystem mit mindestens einer ersten Linse. Das erste Linsensystem ist vom

ersten aufspaltenden optischen Element räumlich getrennt, es handelt sich um zwei separate Elemente. Das erste Linsensystem zeichnet sich dadurch aus, dass seine effektive Brennweite sich für verschiedene Wellenlängen signifikant unterscheidet. Diese Eigenschaft ist auch als chromatische Längsaberration bekannt.

[0006] Das Licht wird durch die Beleuchtungs-Abbildungsoptik fokussiert, wobei Fokussierorte, insbesondere Fokuspunkte bzw. Fokuslinien, unterschiedlicher Wellenlängen an unterschiedlichen Orten gebildet werden. Die Orte liegen entlang eines Messsegments, insbesondere Liniensegments bzw. Flächensegments, welches einen spitzen Winkel zur Symmetrieachse des ersten Linsensystems bildet.

[0007] Der Bereich des Liniensegments bzw. Flächensegments, auf dem die Fokuspunkte bzw. Fokuslinien liegen, stellt den Messbereich der Messeinrichtung dar. Ein Objekt, welches das Liniensegment schneidet und zumindest ein Teil des Lichts reflektiert, kann vermessen werden.

[0008] Durch die chromatische Längsaberration des ersten Linsensystems wird der Abstand der Fokuspunkte vom Linsensystem wellenlängenabhängig variiert. Ohne eine signifikante Längsaberration wären die Fokuspunkte annähernd senkrecht zur Symmetrieachse aufgereiht.

[0009] Die Messeinrichtung umfasst auch eine Detektions-Abbildungsoptik, welche räumlich getrennt von der Beleuchtungs-Abbildungsoptik ist. Die räumliche Trennung erlaubt die Verwendung kleinerer, leichter optischer Bauteile. Die Detektions-Abbildungsoptik ist dazu eingerichtet, von dem Objekt reflektiertes Licht aus einer Richtung zu empfangen, welche sich von der Richtung, aus der das Beleuchtungslicht auf das Objekt einfällt, unterscheidet und die Fokuspunkte aller verwendeter Wellenlängen auf eine zweite konfokale Blende abzubilden.

[0010] Die zweite konfokale Blende hat den Effekt, Licht von Wellenlängen, die defokussiert auf das Messobjekt treffen und daher nicht genau wieder auf die zweite konfokale Blende abgebildet werden, zu unterdrücken und hierdurch den Hintergrund zu reduzieren und das Signal/Rausch-Verhältnis zu verbessern.

[0011] Die Messeinrichtung umfasst auch einen Detektor, welcher dazu eingerichtet ist, Intensität des durch die zweite Blende tretenden Lichts zu erfassen.

[0012] Aufgrund der signifikanten Längsaberration kann der Lichteinfallswinkel bei einer hohen Abbildungsqualität der Fokussierorte bzw. Fokuspunkte vergrößert werden, so dass die sogenannten Ab-

schattungseffekte effizient unterdrückt bzw. reduziert werden können.

[0013] Die Merkmale der Erfindung haben also den Vorteil, dass der mittlere Einfallswinkel des Messlichts steiler auf dem Messobjekt ist, wodurch Abschattung reduziert wird.

[0014] Andererseits ist der Einfallswinkel auch nicht senkrecht auf dem Objekt, wodurch es möglich wird, dass Beleuchtungs-Abbildungsoptik und Detektions-Abbildungsoptik getrennt ausgeführt werden und die Einfallrichtung bzw. Empfangsrichtung sich von der Richtung der Aufreihung der Fokuspunkte unterscheidet. Hierdurch wird bewirkt, dass Licht von Wellenlängen, welche nicht auf der Oberfläche des Objektes fokussiert sind, nicht nur defokussiert auf der zweiten konfokalen Blende abgebildet werden, sondern zusätzlich seitlich versetzt. Hierdurch tritt weniger Licht derjenigen Wellenlängen, die defokussiert auf dem Objekt sind, durch die zweite konfokale Blende und der Hintergrund wird weiter unterdrückt. Die Auflösung der Messeinrichtung ist alleine durch die Auflösung des verwendeten Objektivs (Beleuchtungs-Abbildungsoptik und Detektions-Abbildungsoptik) vorgegeben.

[0015] Bevorzugt schneidet das Liniensegment, auf dem die Fokuspunkte liegen, die Oberfläche des zu vermessenden Objekts im Mittel senkrecht oder nahezu senkrecht. Dies hat den Vorteil, dass die Messung nicht verzerrt wird. Im senkrechten Fall sind die Koordinatenwerte parallel zur Oberfläche (x-/y-Koordinaten) für jeden Fokuspunkt konstant und hängen nicht von der Höhe über der Oberfläche (z) bzw. der Wellenlänge ab. Damit lässt sich die Topographie der Oberfläche direkt in einem kartesischen Koordinatensystem ohne weitere Umrechnung bestimmen. Es entsteht also keine Verzerrung der Oberfläche in der Messung. Bei einem symmetrischen Aufbau von Beleuchtungs-Abbildungsoptik und Detektions-Abbildungsoptik hat eine senkrechte Anordnung des Liniensegments zur Oberfläche außerdem den Vorteil einer höheren Lichtausbeute.

[0016] Nachfolgend sind vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung beschrieben.

[0017] Bevorzugt emittiert die Lichtquelle ein kontinuierliches Spektrum. Besonders bevorzugt ist das emittierte Spektrum im Bereich des sichtbaren Lichts (ca. 400-800nm) oder Infrarotbereich.

[0018] Die Brennweite des ersten Linsensystems für die kleinste Wellenlänge der Lichtquelle unterscheidet sich von der Brennweite des ersten Linsensystems für die größte Wellenlänge der Lichtquelle um einen Betrag δf . Bevorzugt beträgt der Quotient aus δf und der Brennweite der mittleren Wellenlänge f_0

mehr als 5%. Eine solche chromatische Aberration kann als signifikant betrachtet werden.

$$\frac{\delta f}{f_0} > 5\%$$

[0019] Die Distanz zwischen dem Fokuspunkt der kleinsten Wellenlänge und dem Fokuspunkt der größten Wellenlänge der Lichtquelle definiert den Messbereich der Messeinrichtung. Für jede Anwendung gibt es einen Messbereich, der sich besonders eignet, bspw. wird dieser vorteilhafterweise größer als die größten Strukturen bzw. zu erwartenden Höhenunterschiede des zu vermessenden Objektes gewählt. Gleichzeitig sollte der Messbereich nicht zu groß gewählt werden, da in aller Regel eine inverse Beziehung zwischen Messbereich und Auflösung besteht. Der Messbereich dieser Anwendung liegt bevorzugt im Bereich weniger Millimeter oder unter einem Millimeter.

[0020] Der Messbereich wird durch die Querverschiebung und Längsverschiebung der Fokuspunkte der verschiedenen Wellenlängen in Relation zur Symmetrieachse des ersten Linsensystems vorgegeben. Bevorzugt unterscheiden sich Längsverschiebung und Querverschiebung um weniger als einen Faktor 2, besonders bevorzugt sind sie etwa gleich. In anderen Worten sind sowohl Längs- als auch Querverschiebung von derselben Größenordnung wie der Messbereich selbst.

[0021] Vorteilhafterweise werden die Quer- und Längsverschiebungen der Fokuspunkt-Lagen so gewählt, dass das Liniensegment, welche durch die Fokuspunkt-Lagen der unterschiedlichen Wellenlängen geht, einen Winkel kleiner als 60° zur Symmetrieachse des ersten Linsensystems trägt. Besonders vorteilhaft ist ein Winkel kleiner/gleich 45°. Dies ist besonders geeignet um Abschattungen zu vermeiden und erlaubt eine kompakte Bauweise.

[0022] Es ist weiter bevorzugt, dass das Liniensegment, welche durch die Fokuspunkte der unterschiedlichen Wellenlängen geht, einen Winkel größer als 30° zur Symmetrieachse des ersten Linsensystems trägt.

[0023] Bevorzugt unterscheidet sich die Brennweite des ersten Linsensystems für die kleinste Wellenlänge der Lichtquelle von der Brennweite des ersten Linsensystems für die größte Wellenlänge der Lichtquelle um einen Betrag, etwa einem vorgegebenen Messbereich der Messeinrichtung entspricht.

[0024] Um eine hinreichende Fokusverschiebung (chromatische Aberration) zu erreichen, hat vorteilhafterweise mindestens eine der Linsen in dem ersten Linsensystem eine Abbe-Zahl $v_d < 40$.

[0025] Bevorzugt umfasst die Beleuchtungs-Abbildungsoptik eine Kollimatorlinse, welche zwischen Lichtquelle und erstem aufspaltenden optischen Element angeordnet ist. Diese Kollimatorlinse ist bevorzugt achromatisch, d.h. die Brennweite für unterschiedliche Wellenlängen unterscheidet sich nicht oder nur sehr geringfügig. Dies ermöglicht einen kollimierten Strahlengang aller Wellenlängen. Die Kollimatorlinse kann alternativ durch mehrere Linsen ersetzt werden, welche insgesamt betrachtet die genannten Eigenschaften haben.

[0026] Es ist auch möglich, die Kollimatorlinse mit chromatischer Aberration zu versehen, so dass sich die Längsverschiebung der Spots zwischen der Kollimatorlinse und dem ersten Linsensystem aufteilt. Dadurch ist der Strahlengang durch das erste aufspaltende optische Element nicht für alle Wellenlängen perfekt kollimiert.

[0027] Vorteilhafterweise wird sichergestellt, dass das Liniensegment, auf dem die Fokuspunkte liegen, gerade ist, indem die Wellenlängenabhängigkeit der Brennweite des ersten Linsensystems und die Wellenlängenabhängigkeit der Aufspaltung des ersten aufspaltenden optischen Elements aufeinander abgestimmt werden. Dies erfolgt besonders vorteilhaft über eine Betrachtung einer rechnerischen Beziehung zwischen den Wellenlängenabhängigkeiten (siehe Erläuterungen zu den **Fig. 3a** und **Fig. 3b**). Bevorzugt wird entweder als erstes aufspaltendes optisches Element ein Prisma gewählt, in Kombination mit einem ersten Linsensystem aus einer oder mehreren dispersiven Linsen, oder es wird als aufspaltendes optisches Element ein Gitter gewählt, in Kombination mit mindestens einer Diffraktivlinse im ersten Linsensystem. Es werden also entweder disperseive Elemente miteinander verwendet oder diffraktive Elemente miteinander. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Querverschiebung und Längsverschiebung der Fokuspunkte zusammenpassen (d.h. einer bis auf einen Proportionalitätsfaktor gleichen mathematischen Beziehung zwischen Verschiebung und Wellenlänge genügen), so dass das Liniensegment gerade ist.

[0028] Nach einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst die Detektions-Abbildungsoptik ein zweites aufspaltendes optisches Element - Prisma oder Gitter - und ein zweites Linsensystem. Dies ermöglicht die Abbildung auf die zweite konfokale Blende auf besonders einfache Weise. Der Strahlengang entspricht dabei vom Prinzip her dem Strahlengang der Beleuchtungs-Abbildungsoptik, jedoch mit Elementen in umgekehrter Reihenfolge. Das zweite aufspaltende optische Element wirkt hier - bedingt durch die umgekehrte Durchlaufrichtung - derart, dass die durch das erste aufspaltende optische Element Aufspaltung rückgängig gemacht wird. Licht, welches von einem der Fokuspunkte der Be-

leuchtungs-Abbildungsoptik kommt und die dem Fokuspunkt entsprechende Wellenlänge hat, wird also durch die Detektions-Abbildungsoptik für alle Wellenlängen auf denselben Ort fokussiert, vorteilhafterweise auf die Öffnung der zweiten konfokalen Blende.

[0029] Bevorzugt ist das zweite aufspaltende optische Element baugleich zum ersten aufspaltenden optischen Element ausgeführt. Insbesondere ist das zweite aufspaltende optische Element ein Prisma, wenn das erste aufspaltende optische Element ein Prisma ist und ist diesem baugleich bzw. das zweite aufspaltende optische Element ist ein Gitter, wenn das erste aufspaltende optische Element ein Gitter ist und ist diesem baugleich.

[0030] Bevorzugt ist das zweite Linsensystem ist baugleich zum ersten Linsensystem ausgeführt.

[0031] Besonders vorteilhaft ist es, wenn die gesamte Beleuchtungs-Abbildungsoptik und Detektions-Abbildungsoptik baugleich ausgeführt sind. Diese sind dabei spiegelsymmetrisch, so dass der Detektionsstrahlengang genau so ist wie der Beleuchtungsstrahlengang.

[0032] Für diese Ausführungsform ist es vorteilhaft, wenn das Liniensegment, auf dem die Fokuspunkte aufgereiht sind, zumindest näherungsweise senkrecht zum zu vermessenden Objekt ist, damit der gesamte Aufbau symmetrisch sein kann.

[0033] Vorteilhafterweise liegt das Liniensegment, auf dem die Fokuspunkte aufgereiht sind, auf der Winkelhalbierenden zwischen Beleuchtungsstrahlengang und Detektionsstrahlengang.

[0034] Nach einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst der Detektor ein Spektrometer und ist dazu eingerichtet, Intensitätsmaxima der Wellenlängen zu bestimmen und daraus Abstandswerte des Objektes zu berechnen.

[0035] Besonders bevorzugt wird eine Beziehung zwischen Wellenlänge des Intensitätsmaximums und Abstandswerten aufgestellt. Dies erfolgt vorteilhafterweise über eine Kalibrierung der Messeinrichtung. Anhand dieser Beziehung werden die Abstandswerte bestimmt.

[0036] Durch den konfokalen Aufbau der Messeinrichtung wird jeweils diejenige Wellenlänge wieder scharf auf der Öffnung der zweiten konfokalen Blende abgebildet, welche auf dem zu vermessenden Objekt fokussiert war. Daher tritt am meisten Intensität dieser Wellenlänge durch die Blende, so dass das Intensitätsmaximum der auf dem Objekt fokussierten Wellenlänge entspricht. Hierdurch lässt sich auf die Lage der Oberfläche des Objektes in Bezug zu den Fokuslagen zurückschließen.

[0037] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung sind die erste konfokale Blende und die zweite konfokale Blende jeweils Punktblenden, d.h. sie haben eine kreisförmige Öffnung mit einem geringen Querschnitt. Bevorzugt ist der Durchmesser kleiner 100µm, um eine gute laterale Auflösung sicherzustellen. Besonders bevorzugt ist der Durchmesser kleiner 50µm. Es resultiert eine Messung an einem einzelnen Punkt der Objektoberfläche.

[0038] In einer alternativen Ausführungsform der Erfindung sind die erste konfokale Blende und die zweite konfokale Blende jeweils Schlitzblenden, d.h. sie haben eine spaltförmige Öffnung. In dieser Ausführungsform werden statt Fokuspunkten Fokuslinien an verschiedenen Orten gebildet, welche statt entlang eines Liniensegments auf einem Flächensegment liegen, dessen eine Dimension der langen Kante der Schlitzblende entspricht und dessen andere Dimension alle Eigenschaften des oben beschriebenen Liniensegments hat. Alle in Bezug auf Fokuspunkte und Liniensegment beschriebene Merkmale finden analog auf Fokuslinien und Flächensegment Anwendung. Die Beleuchtungs-Abbildungsoptik ist derart ausgebildet, dass die Fokuslinien unterschiedlicher Wellenlängen an unterschiedlichen Orten gebildet werden, wobei die Orte entlang eines Flächensegments liegen, welches einen spitzen Winkel zur Symmetrieachse des ersten Liniensystems bildet. Die Messeinrichtung ist dazu ausgebildet, ein Objekt zu vermessen, welches das Flächensegment schneidet. Die Detektions-Abbildungsoptik ist dazu eingerichtet, die Fokuslinien aller Wellenlängen auf die zweite konfokale Blende abzubilden.

[0039] Die Schlitzblenden sind so orientiert, dass die erste konfokale Blende auf die zweite konfokale Blende abgebildet wird. Vorteilhafterweise sind die Schlitzblenden so orientiert, dass die Aufspaltung durch das erste aufspaltende optische Element quer zur längeren Dimension des Spalts erfolgt.

[0040] Die laterale Auflösung (d.h. in den Richtungen quer zur Höhenmessung) dieser Anordnung ist alleine durch die Auflösung der verwendeten Objektive (Beleuchtungs-Abbildungsoptik und Detektions-Abbildungsoptik) gegeben, da nur der Bereich der Fokuslinien abgebildet wird. Es besteht keine Problematik mit Übersprechen zwischen einzelnen Bildpunkten.

[0041] Als eine Variante dieser Ausführungsform sind in einer Reihe angeordnete Punktöffnungen zu verstehen.

[0042] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst der Detektor einen Sensor, welcher die durch die zweite konfokale Blende tretende Intensität räumlich aufgelöst misst. Besonders bevorzugt erfolgt in dieser Ausführungsform keine spektra-

le Aufspaltung innerhalb des Detektors, so dass ein Bild der Gesamtintensität am Ort der zweiten konfokalen Blende erfasst wird. So entsteht eine Bildaufnahme der Objektoberfläche mit durch die chromatische Aufspaltung erhöhte Tiefenschärfe. Vorteilhafterweise ist der Sensor dazu eingerichtet, den Ort des einfallenden Lichts räumlich aufzulösen. Dabei werden Intensitäten einfallenden Lichts an mehreren Orten bestimmt, beispielsweise durch eine Mehrzahl einzelner Pixel. Derart ist eine räumliche Auflösung des einfallenden Lichts entlang mindestens einer Dimension möglich, wobei bevorzugt die Dimension räumlich aufgelöst wird, die der längeren Kante der Schlitzblende entspricht.

[0043] Bevorzugt werden Matrixdetektoren verwendet, also Sensoren, welche eine Auflösung der einfallenden Lichtintensität in zwei Dimensionen erlauben.

[0044] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst der Detektor einen Strahlteiler, welcher einen Teil des Lichts zu einem ersten Detektorteil leitet und einen zweiten Teil des Lichts zu einem zweiten Detektorteil. Besonders bevorzugt wird das Licht im ersten Detektorteil spektral aufgespalten und die Wellenlänge maximaler Intensität bestimmt, während im zweiten Detektorteil keine spektrale Aufspaltung erfolgt und ein Gesamtintensitätsbild aufgenommen wird. Das durch den zweiten Detektorteil gewonnene Gesamtintensitätsbild und die durch den ersten Detektorteil gleichzeitig für den gleichen Messbereich gewonnene Höheninformationen kombiniert werden, beispielsweise durch eine Anzeigevorrichtung überlagert dargestellt werden. Besonders bevorzugt ist es möglich, sowohl eine Höheninformation als auch eine in der Ebene quer zur Höhe genauer aufgelöste Gesamtintensitätsabbildung auszuwerten und auszugeben.

[0045] Um die Vorteile der Schlitzblende gegenüber einem Raster von Lochblenden auszunutzen, wird bevorzugt das vom Messobjekt reflektierte Licht durch eine Freistrahloptik zwischen dem Messobjekt und dem Detektor propagiert. Es ist weiter bevorzugt, dass das Licht von der Lichtquelle bis zum Messobjekt durch eine Freistrahloptik propagiert. Dies hat außerdem die Vorteile, dass sich die Messeinrichtung robuster gestalten lässt und billiger zu bauen ist, sowie weitgehend temperaturunabhängig ist.

[0046] Nach einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist der Strahlteiler ein Strahlteilerwürfel, welcher besonders bevorzugt zwei miteinander verbundene Prismen umfasst, zwischen denen eine Strahlteilerfläche verläuft.

[0047] Vorteilhafterweise können das zu vermessende Objekt und die Messeinrichtung relativ zueinander bewegt werden, bevorzugt in zwei oder drei Dimensionen. Diese Bewegung erfolgt bevorzugt auto-

matisch. Es kann auf diese Weise ein Scan über das Objekt erfolgen, so dass eine Mehrzahl an Punkten vermessen werden kann.

[0048] Nachfolgend sind beispielhafte vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung anhand von Figuren erläutert.

[0049] Es zeigen:

Fig. 1: eine Schemazeichnung einer beispielhaften Ausführungsform der chromatisch konfokalen Messeinrichtung,

Fig. 2: eine Beleuchtungs-Abbildungsoptik einer aus dem Stand der Technik bekannten Messeinrichtung,

Fig. 3a: eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung,

Fig. 3b: eine weitere bevorzugte Ausführungsform der Erfindung,

Fig. 4: eine weitere bevorzugte Ausführungsform der Erfindung,

Fig. 5: eine weitere bevorzugte Ausführungsform der Erfindung.

[0050] **Fig. 1** zeigt eine Schemazeichnung einer beispielhaften Ausführungsform der chromatisch konfokalen Messeinrichtung.

[0051] Eine Lichtquelle **1** emittiert Strahlung einer Mehrzahl von Wellenlängen. Bevorzugt emittiert sie ein kontinuierliches Spektrum, welches besonders bevorzugt im sichtbaren Bereich liegt. Bei der Lichtquelle handelt es sich beispielsweise um eine LED oder eine Halogenlampe oder eine Lichtquelle, welche durch einen Laser angeregtes Phosphor enthält oder um eine Superkontinuumslichtquelle.

[0052] Das Licht tritt durch eine erste konfokale Blende **2**. Die Blende hat eine Öffnung, welche bevorzugt kreisförmig mit einem kleinen Durchmesser ist (Punktblende). Alternativ kann die Blende eine spaltförmige Öffnung haben, wobei der Spalt in die Zeichenebene hinein ausgedehnt ist.

[0053] Eine Beleuchtungs-Abbildungsoptik (**BA**) der Messeinrichtung umfasst mindestens eine Kollimatorlinse **3**, ein erstes aufspaltende optische Element (erstes Prisma oder erstes Gitter) **4** sowie ein erstes Linsensystem **5** mit mindestens einer ersten Linse. Diese Elemente sind räumlich voneinander getrennt.

[0054] Das erste Linsensystem **5** ist mit einer ausgeprägten chromatischen Längsaberration behaftet, so dass effektive Brennweite $f(\lambda)$ sich für verschiedene Wellenlängen λ signifikant unterscheidet. Die effektive Brennweite ist dabei die Brennweite des Gesamt-

systems. Es kann vorteilhaft sein, mehrere Linsen in Folge im Linsensystem einzusetzen statt einer Einzellinse, da sich hierdurch die chromatische Aberration gezielt einstellen lässt.

[0055] Die Beleuchtungs-Abbildungsoptik **BA** bewirkt, dass durch Licht einer ersten Wellenlänge, welches durch die Beleuchtungs-Abbildungsoptik tritt, die erste Blende **2** an einem Fokuspunkt **21** abgebildet wird, während dieselbe Blende **2** durch Licht einer anderen Wellenlänge durch die Beleuchtungs-Abbildungsoptik an einem anderen Ort **22** abgebildet wird. Erfindungsgemäß sind die Orte entlang eines Liniensegments aufgereiht. Das Liniensegment bildet dabei einen spitzen Winkel mit der Symmetrieachse des ersten Linsensystems **5**. Ohne die chromatische Aberration des ersten Linsensystems **5** würde das Liniensegment näherungsweise senkrecht zur Symmetrieachse stehen, da durch das aufspaltende optische Element **4** nur eine Aufspaltung der Fokuslagen quer zur optischen Achse bewirkt werden kann, da dieses ein Prisma oder Gitter ist.

[0056] Im Falle der Verwendung einer spaltförmigen konfokalen Blende **2** bewirkt die Beleuchtungs-Abbildungsoptik **BA**, dass durch Licht einer ersten Wellenlänge, welches durch die Beleuchtungs-Abbildungsoptik tritt, die erste Blende **2** an einer Fokuslinie **21** abgebildet wird, welche in die Papierebene hinein ausgedehnt ist. Dieselbe Blende **2** wird durch Licht einer anderen Wellenlänge durch die Beleuchtungs-Abbildungsoptik auf einer anderen Fokuslinie **22** abgebildet. Erfindungsgemäß sind die Fokuslinien entlang eines Flächensegments aufgereiht. Das Flächensegment wird einerseits durch die räumliche Ausdehnung jeder Fokuslinie und andererseits durch die für verschiedene Wellenlängen unterschiedlichen Lagen der Fokuslinien aufgespannt. Das Flächensegment bildet dabei einen spitzen Winkel mit der Symmetrieachse des ersten Linsensystems **5**. Genaue gesagt besteht das Flächensegment aus einer Reihe von Liniensegmenten, die jeweils den Abbildungen eines Punktes der Spaltblende entsprechen. Jedes dieser Liniensegmente bildet einen spitzen Winkel mit der Symmetrieachse des ersten Linsensystems

[0057] **5**. Im Bereich der Fokuslagen **21** und **22**, also im Messbereich der Messeinrichtung, wird ein zu vermessendes Objekt **30** angeordnet. Das Objekt **30** reflektiert dabei zumindest ein Teil des Lichts. Reflektiertes Licht wird durch die Detektions-Abbildungsoptik **DA** eingefangen, und zwar aus einer räumlichen Richtung, die sich von der Einfallrichtung unterscheidet. Die Beleuchtungs-Abbildungsoptik und Detektions-Abbildungsoptik sind räumlich getrennte Optiken.

[0058] Die Detektions-Abbildungsoptik umfasst bevorzugt ein zweites Linsensystem **6**, ein zweites auf-

spaltendes optisches Element (zweites Prisma oder zweites Gitter) **7**, sowie eine Fokussierlinse **8**. Die gesamte Detektions-Abbildungsoptik ist dazu eingerichtet, Licht, welches auf der Oberfläche des Objektes **30** fokussiert war und von dieser reflektiert wurde, auf eine zweite Blende **9** abzubilden. Die zweite Blende **9** dient als zweite konfokale Blende - sie ist konfokal zur ersten Blende

[0059] 2. Durch die zweite Blende **9** tretendes Licht wird durch einen Detektor **10** erfasst.

[0060] Fig. 2 zeigt die Beleuchtungs-Abbildungsoptik einer aus dem Stand der Technik bekannten gattungsgemäßen Anordnung einer Messeinrichtung zur Verdeutlichung von sogenannten Abschattungseffekten. In dieser Anordnung erfolgt eine seitliche Auslenkung des Lichts durch ein Prisma **204** und eine Fokussierung durch eine Linse **205**. Die Linse **205** verfügt über keine oder eine sehr geringe chromatische Aberration, so dass die Fokussierungen näherungsweise senkrecht zur Symmetrieachse dieser Linse aufgereiht sind. Der Einfallswinkel β auf dem Messobjekt **30** ist sehr klein.

[0061] Wie aus Fig. 2 ersichtlich, lässt sich der mittlere Einfallswinkel zur Oberfläche der Mittenwellenlänge auf dem Objekt für ein solches Messgerät überschlagen zu:

$$\beta(\lambda_0) \approx \alpha(\lambda_0) \left(1 - \frac{L}{f}\right)$$

[0062] Wobei $\alpha(\lambda_0)$ der durch die dispersive Komponente verursachte Beugungswinkel für die Mittenwellenlänge λ_0 ist, L der Abstand zwischen dispersiver Komponente und Fokussierelement sowie f die Brennweite des Fokussierelements. Dies bedingt, dass β stets kleiner als α ist, so dass der Einfallswinkel auf dem Objekt notwendigerweise relativ flach ist.

[0063] Um große Winkel β ($>30^\circ$) zu erreichen, muss auch der Winkel α zwischen dem einfallenden Lichtbündel und der optischen Achse der Fokussieroptik Werte $>30^\circ$ erreichen. Dies ist jedoch nicht praktikabel, da bei solch großen Kippwinkeln die optische Abbildungsqualität drastisch verschlechtert wird, verbunden mit einer großen Unschärfe des Fokuspunkts, die sich direkt negativ auf das laterale und axiale Auflösungsvermögen der Messeinrichtung auswirkt.

[0064] Andererseits sind große Winkel β wünschenswert, da ein flacher Einfallswinkel auf rauen Objekten häufig zu Abschattung führt, was die Messqualität beeinträchtigt. Außerdem ist ein solcher Aufbau notwendigerweise groß und muss nah am Messobjekt platziert werden.

[0065] Fig. 3a zeigt die geometrischen Zusammenhänge einer beispielhaften bevorzugten Ausführungsform der Erfindung.

[0066] Dabei bezeichnet $\alpha(\lambda)$ den Winkel zwischen der auf das erste Linsensystem einfallenden Strahlung und der Symmetrieachse **40** des ersten Linsensystems **5**. Der Winkel $\alpha(\lambda)$ ist abhängig von der Wellenlänge.

[0067] Im Ausführungsbeispiel der Fig. 3a entspricht die Symmetrieachse der Linse **3** ebenfalls der Achse **40** und die Symmetrieachse **40** verläuft auch durch die Öffnung der Blende **2**, so dass der Winkel $\alpha(\lambda)$ gleichzeitig dem wellenlängenabhängigen Ablenkungswinkel des ersten aufspaltenden optischen Elements entspricht. Im Falle eines Prismas ist dies der Dispersionswinkel, im Falle eines Gitters die Beugungswinkel der ersten (oder höheren) positiven oder negativen Beugungsordnung.

[0068] Die wellenlängenabhängige Brennweite des ersten Linsensystems ist mit $f(\lambda)$ bezeichnet.

[0069] Der Abstand H zwischen der verlängerten Symmetrieachse **40** des ersten Linsensystems **5** und dem Fokuspunkt einer Wellenlänge λ berechnet sich zu

$$H(\lambda) \approx f(\lambda) * \tan(\alpha(\lambda))$$

[0070] Damit die Fokuspunkte auf einem Liniensegment liegen, ergibt sich eine Bedingung für die wellenlängenabhängige Brennweite $f(\lambda)$ des ersten Linsensystems **5** unter Berücksichtigung der Steigung des Liniensegments c und einem Versatz f_0 .

$$H(\lambda) = c * f(\lambda) - f_0$$

$$f(\lambda) * \tan(\alpha(\lambda)) = c * f(\lambda) - f_0$$

$$f(\lambda) = \frac{f_0}{(c - \tan(\alpha(\lambda)))}$$

[0071] Es ergibt sich also eine Beziehung zwischen der Brennweite $f(\lambda)$ und dem Dispersionswinkel $\alpha(\lambda)$ sowie der Steigung c. Der Versatz f_0 ist der Arbeitsabstand zwischen Beleuchtungs-Abbildungsoptik und Objekt.

[0072] In den meisten Anwendungen ist der Messbereich, und damit $H(\lambda)$ klein im Vergleich zur mittleren Brennweite, so dass man die Näherung

$$H(\lambda) \approx f_0 * \tan(\alpha(\lambda))$$

anwenden kann und erhält:

$$f(\lambda) = \frac{f_0}{c} \left(1 + \tan(\alpha(\lambda)) \right) \approx \frac{f_0}{c}$$

[0073] Hierdurch werden Längsverschiebung und Querverschiebung der Fokuslagen näherungsweise entkoppelt. Die Querverschiebung relativ zur Achse **40** wird dabei von der Wellenlängenabhängigkeit des Dispersionswinkels bestimmt, während die Längsverschiebung in Richtung der Achse **40** von der Wellenlängenabhängigkeit der Brennweite des ersten Linsensystems **5** bestimmt wird.

[0074] Eine Linearität der Aufreihung der Fokuslagen wird dabei hergestellt, indem der Dispersionswinkel näherungsweise proportional zur Wellenlänge ist, also linear:

$$\alpha(\lambda) = c_1 \lambda$$

und die Wellenlängenabhängigkeit $f(\lambda)$ der Brennweite des ersten Linsensystems **5** ebenfalls näherungsweise linear ist.

[0075] Die Steigung beeinflusst direkt den Einfallswinkel β auf dem Objekt:

$$\beta(\lambda) = 90^\circ - \text{atan}(c) + \alpha(\lambda)$$

[0076] Vorteilhafterweise wird das erste Linsensystem **5** so ausgelegt, dass ein durch das verwendete Prisma oder Gitter **4** vorgegebener Ablenkungswinkel $\alpha(\lambda)$ (Dispersionswinkel bzw. Beugungswinkel) berücksichtigt wird und ein gewünschter Einfallswinkel der Mittenwellenlänge β_0 erreicht wird.

[0077] Dies hat zur Folge, dass durch eine geeignete Wahl der effektiven chromatischen Aberration des ersten Linsensystems ein zusätzlicher Freiheitsgrad eingeführt wird, welcher eine Wahl des Einfallswinkels ermöglicht.

[0078] Anders betrachtet ist bei festem Arbeitsabstand f_0 und vorgegebenem Messbereich $H(\lambda)$ der Ablenkungswinkel $\alpha(\lambda)$ festgelegt. Durch den Freiheitsgrad der chromatischen Längsaberration $f(\lambda)$ lässt sich dann der Einfallswinkel β_0 der Mittenwellenlänge zusätzlich als unabhängiger Wert einstellen.

[0079] Vorteilhafterweise wird ein Einfallswinkel β_0 der Mittenwellenlänge zwischen ca. 30° - 60° gewählt, da dies eine geringe Abschattung durch Unebenheiten auf dem Objekt ermöglicht. Bevorzugt wird der Winkel in Abhängigkeit der zu erwartenden Rauheit des Messobjektes gewählt.

[0080] In einem weiteren bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung, welches in **Fig. 3b** gezeigt ist, ist das erste Linsensystem **5** geneigt zu der Linse **3** und dem ersten aufspaltenden optischen Element **4** angeordnet. Die Symmetrieachse **40**, auf die sich alle Winkel beziehen, bezeichnet weiterhin die Symmetrieachse des ersten Linsensystems **40**, wobei die Linse **3** und die erste Blende **2** geneigt und dezentriert dazu angeordnet sind.

[0081] Besonders bevorzugt sind die Elemente so geneigt zueinander angeordnet, dass die Mittenwellenlänge entlang der Symmetrieachse **40** des ersten Linsensystems **5** einfällt ($\alpha(\lambda_0) = 0$). Dies hat weniger Abbildungsfehler zur Folge als ein schräger und/oder dezentrierter Einfall.

[0082] Die Beziehung $f(\lambda) = \frac{f_0}{(c - \tan(\alpha(\lambda)))}$ bzw.

$f(\lambda) \approx \frac{f_0}{c}$ ist weiterhin gültig. Jedoch entspricht $\alpha(\lambda)$

[0083] Nun nicht mehr dem Ablenkungswinkel des ersten aufspaltenden optischen Elements **4**, sondern ist um den relativen Neigungswinkel zwischen erstem aufspaltenden optischen Element **4** und Linsensystem **5** verringert. Der Ablenkungswinkel des ersten aufspaltenden optischen Elements **4** ist in **Fig. 3b** als $\vartheta(\lambda)$ bezeichnet. Besonders bevorzugt ist $\alpha(\lambda) = \vartheta(\lambda) - \vartheta_0$. ϑ_0 ist der Ablenkungswinkel der Mittenwellenlänge.

[0084] **Fig. 4** zeigt eine Ausführungsbeispiel der Erfindung.

[0085] Es sind die Elemente der chromatischen Messeinrichtung wie bei **Fig. 1** beschrieben gezeigt, wobei das erste aufspaltende optische Element **4** hier als erstes Prisma ausgeführt ist und auch das zweite aufspaltende optische Element **7** als Prisma ausgeführt ist.

[0086] Das erste Linsensystem **5** besteht aus einer Gruppe von drei aufeinanderfolgenden Linsen **51**, **52** und **53**. Die mittlere Linse **52** hat eine Abbe-Zahl $v_d < 40$. Die anderen Linsen **51**, **53** dienen der Korrektur der Abbildung.

[0087] Das zweite Linsensystem **6** besteht ebenfalls aus drei aufeinanderfolgenden Linsen **61**, **62** und **63**, welche den Linsen des ersten Linsensystems **5** entsprechen.

[0088] Auf die zweite konfokale Blende **9** folgt eine erste Detektorlinse, welche die Strahlen kollimiert. Diese werden anschließend spektral aufgespalten. Dies erfolgt durch ein Spektrometer bestehend aus einem Diffraktivgitter **101**, einer zweiten Detektorlinse **102**, welche die Strahlen fokussiert und einem Sen-

sor **103**, welcher als Liniensensor ausgeführt ist und die Intensitäten des spektral aufgespaltenen Lichts erfasst.

[0089] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung kann das Diffraktivgitter des Spektrometers durch ein Prisma ersetzt werden (Prismenspektrometer). Es ist als vorteilhaft anzusehen, wenn bei Verwendung von Prismen als erstes aufspaltendes Element und zweites aufspaltendes Element ein Prismenspektrometer verwendet wird, während bei Verwendung von Gittern als erstes aufspaltendes Element und zweites aufspaltendes Element ein Gitter im Spektrometer eingesetzt wird. Dies hat den Vorteil, dass die Beziehung zwischen Spektrometerpixel und Höhenwert linear ist. Die Wahl zwischen einem Prismenspektrometer und einem Diffraktivspektrometer ist für alle Ausführungsformen, welche ein Spektrometer umfassen, möglich.

[0090] Fig. 5 zeigte ein weitere Ausführungsform der Erfindung. Die einzelnen Bestandteile der Fig. 5 können frei mit den entsprechenden Bestandteilen der Fig. 4 ausgetauscht und kombiniert werden.

[0091] Im Unterschied zu Fig. 4 bestehen hier das erste und zweite Linsensystem jeweils aus zwei Linsen (**51** und **52** bzw. **61** und **62**).

[0092] Der Detektor **10** umfasst hier zusätzlich zu den Spektrometerbestandteilen Diffraktivgitter **101**, Linse **102** und Sensor **103** zusätzlich einen Strahlteilerwürfel **105**, welcher das Licht aufteilt. Während ein erster Teil in das Spektrometer geleitet wird und die Intensität wellenlängenabhängig bestimmt wird, wird der zweite Teil in einen Bildsensor **104** geleitet, welcher die Spektralbereiche nicht aufspaltet und ein Gesamtintensitätsbild aufnimmt.

[0093] Bevorzugt sind die erste konfokale Blende **2** und die zweite konfokale Blende **9** als Spaltblenden ausgeführt, deren längere Dimension in die Bildebene hinein ausgerichtet ist. Auf diese Weise können mehrere Bildpunkte gleichzeitig erfasst werden, wodurch bei einem Scan eine schnellere Erfassung eines großen Bildbereichs möglich ist. Durch den Bildsensor **104** können Gesamtintensitätswerte entlang des Spaltes aufgenommen werden. Erfolgt ein Scan, so können die aufgenommenen Gesamtintensitätswerte zu einem Bild der Oberfläche mit verbesserter Tiefenschärfe zusammengesetzt werden.

[0094] Im Folgenden sind Beispiele von möglichen Ausführungsformen der Messeinrichtung aufgeführt.

Beispiele:

1. Chromatisch konfokale Messeinrichtung, umfassend
 - eine Lichtquelle (**1**), welche Licht einer Mehrzahl von Wellenlängen emittiert, insbesondere ein kontinuierliches Spektrum, und
 - eine erste konfokale Blende (**2**), durch welche Licht der Lichtquelle (**1**) tritt
2. Messeinrichtung nach dem vorhergehenden Beispiel, weiter umfassend eine Beleuchtungs-Abbildungsoptik (**BA**), umfassend mindestens ein erstes aufspaltendes optisches Element (**4**).
3. Messeinrichtung nach dem vorhergehenden Beispiel 3, wobei das optische Element (**4**) als Prisma oder Gitter ausgeführt ist.
4. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele 2 oder 3, wobei das Licht kollimiert in das erste aufspaltende optische Element (**4**) tritt.
5. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele 2 bis 4, wobei die Beleuchtungs-Abbildungsoptik (**BA**) weiter ein erstes Linsensystem (**5**) mit mindestens einer ersten Linse umfasst.
6. Messeinrichtung nach dem vorhergehenden Beispiel 5, wobei das erste Linsensystem (**5**) vom ersten aufspaltenden optischen Element (**4**) räumlich getrennt ist,
7. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele 5 oder 6, wobei die effektive Brennweite ($f(\lambda)$) des ersten Linsensystems (**5**) sich für verschiedene Wellenlängen (λ) signifikant unterscheidet
8. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele 2 bis 7, wobei die Beleuchtungs-Abbildungsoptik (**BA**) derart ausgebildet ist, dass Fokuspunkte unterschiedlicher Wellenlängen an unterschiedlichen Orten gebildet werden,
9. Messeinrichtung nach dem vorhergehenden Beispiel 8, wobei die Orte entlang eines Liniensegments (**41**) liegen, welches einen spitzen Winkel zur Symmetrieachse (**40**) des ersten Linsensystems (**5**) bildet.
10. Messeinrichtung nach dem vorhergehenden Beispiel 9, wobei die Messeinrichtung dazu eingerichtet ist, ein Objekt (**30**) zu vermessen, welches das Liniensegment (**41**) schneidet und zumindest einen Teil des Lichts reflektiert.
11. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele, wobei die Messeinrichtung eine Detektions-Abbildungsoptik (**DA**) umfasst,

welche räumlich getrennt von der Beleuchtungs-Abbildungsoptik (**BA**) ist.

12. Messeinrichtung nach dem vorhergehenden Beispiel 11, wobei die Detektions-Abbildungsoptik (**DA**) dazu eingerichtet ist, von dem Objekt (**30**) reflektiertes Licht ausschließlich aus einer Richtung zu empfangen, welche sich von der Richtung, aus der das Beleuchtungslicht auf das Objekt einfällt, unterscheidet.

13. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele 11 oder 12, wobei die Detektions-Abbildungsoptik (**DA**) dazu eingerichtet ist, die Fokuspunkte aller Wellenlängen auf eine zweite konfokale Blende (**9**) abzubilden.

14. Messeinrichtung nach dem vorhergehenden Beispiel 13, wobei die Messeinrichtung einen Detektor (**10**) umfasst, welcher dazu eingerichtet ist, Intensität des durch die zweite Blende (**9**) tretenden Lichts zu erfassen.

15. Messeinrichtung zur Vermessung eines Objekts, umfassend:

- eine Lichtquelle (**1**) zur Erzeugung eines eine Mehrzahl von Wellenlängen aufweisenden Lichts,

- eine Beleuchtungs-Abbildungsoptik (**BA**), die ausgebildet ist, dass Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen an unterschiedlichen Fokussierorten in einem Messbereich entlang eines Messsegments (**41**) fokussierbar sind, und

- eine von der Beleuchtungs-Abbildungsoptik (**BA**) räumlich getrennte Detektions-Abbildungsoptik (**DA**), die dazu ausgebildet ist, ein von einem sich mit dem Messbereich überschneidenden Oberflächenbereich des zu messenden Objekts (**30**) reflektiertes Licht aus einer Richtung zu erfassen, welche sich von der Richtung, aus der das Beleuchtungslicht auf das Objekt einfällt, unterscheidet.

16. Messeinrichtung nach dem vorhergehenden Beispiel 15, wobei die Beleuchtungs-Abbildungsoptik umfasst:

- eine der Lichtquelle (**1**) nachgeschaltete erste konfokale Blende (**2**),

- ein erstes aufspaltendes optisches Element (**4**) zum chromatischen Aufspalten eines in das erste aufspaltende optische Element (**4**) eintretenden Lichts, und

- ein von dem aufspaltenden optischen Element (**4**) räumlich getrenntes erstes Linsensystem (**5**) mit einer wellenlängenabhängigen effektiven Brennweite ($f(\lambda)$).

17. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele 15 oder 16, wobei die Detektions-Abbildungsoptik (**DA**) dazu eingerichtet ist,

die Fokussierorte unterschiedlicher Wellenlängen auf eine zweite konfokale Blende (**9**) abzubilden.

18. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele 15 bis 17, wobei die Messeinrichtung einen der zweiten konfokalen Blende (**9**) nachgeschalteten Detektor (**10**) umfasst, welcher dazu eingerichtet ist, Intensität des durch die zweite Blende (**9**) tretenden Lichts zu erfassen.

19. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele 15 bis 18, wobei das Messsegment (**41**) durch eine Querverschiebung und durch eine Längsverschiebung der Fokussierorte für verschiedene Wellenlängen in Relation zu einer optischen Achse bzw. Symmetrieachse des ersten Linsensystems definierbar ist.

20. Messeinrichtung zur Vermessung eines Objekts, umfassend:

- eine Lichtquelle (**1**) zur Erzeugung eines eine Mehrzahl von Wellenlängen aufweisenden Lichts,

- eine Beleuchtungs-Abbildungsoptik (**BA**), umfassend:

- eine der Lichtquelle (**1**) nachgeschaltete erste konfokale Blende (**2**),

- ein erstes aufspaltendes optisches Element (**4**) zum chromatischen Aufspalten eines in das erste aufspaltende optische Element (**4**) eintretenden Lichts,

- ein von dem aufspaltenden optischen Element (**4**) räumlich getrenntes erstes Linsensystem (**5**) mit einer wellenlängenabhängigen effektiven Brennweite ($f(\lambda)$), wobei die Beleuchtungs-Abbildungsoptik (**BA**) derart ausgebildet ist, dass Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen an unterschiedlichen Fokussierorten in einem Messbereich entlang eines Messsegments (**41**) fokussierbar sind, und

- eine von der Beleuchtungs-Abbildungsoptik (**BA**) räumlich getrennte Detektions-Abbildungsoptik (**DA**), die dazu ausgebildet ist, ein von einem sich mit dem Messbereich überschneidenden Oberflächenbereich des zu messenden Objekts (**30**) reflektiertes Licht aus einer Richtung zu erfassen, welche sich von der Richtung, aus der das Beleuchtungslicht auf das Objekt einfällt, unterscheidet, wobei die Detektions-Abbildungsoptik (**DA**) dazu eingerichtet ist, die Fokussierorte unterschiedlicher Wellenlängen auf eine zweite konfokale Blende (**9**) abzubilden, und wobei die Messeinrichtung einen der zweiten konfokalen Blende (**9**) nachgeschalteten Detektor (**10**) umfasst, welcher dazu eingerichtet ist, Intensität des durch die zweite Blende (**9**) tretenden Lichts zu erfassen, dadurch gekenn-

zeichnet, dass das Messsegment (**41**) durch eine Querverschiebung und durch eine Längsverschiebung der Fokussierorte für verschiedene Wellenlängen in Relation zu einer optischen Achse bzw. Symmetrieachse des ersten Linsensystems definierbar ist.

21. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele, wobei die Beleuchtungs-Abbildungsoptik (**BA**) derart ausgebildet ist, dass die Querverschiebung und die Längsverschiebung der Fokussierorte zur Bildung eines geraden, zu der Symmetrieachse des ersten Linsensystems einen spitzen Winkel bildenden Messsegments (**41**) aufeinander abstimbar sind.

22. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele, wobei die Querverschiebung und die Längsverschiebung von Fokussierorten im Wesentlichen voneinander entkoppelt bzw. unabhängig einstellbar sind.

23. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele, wobei die Detektions-Abbildungsoptik (**DA**) ein zweites Linsensystem (**6**) und ein zweites aufspaltendes optisches Element (**7**) zur Rückgängigmachung der durch das erste aufspaltende Element (**4**) bewirkten Aufspaltung umfasst.

24. Messeinrichtung nach Beispiel 23, dadurch gekennzeichnet, dass das zweite aufspaltende optische Element (**7**) baugleich zum ersten aufspaltenden optischen Element (**4**) ausgeführt ist und dass das zweite Linsensystem (**6**) baugleich zum ersten Linsensystem (**5**) ausgeführt ist.

25. Messeinrichtung nach Beispiel 23 oder 24, wobei die Detektions-Abbildungsoptik (**DA**) derart ausgebildet ist, dass der Strahlengang der Detektions-Abbildungsoptik (**DA**) im Wesentlichen dem Strahlengang der Beleuchtungs-Abbildungsoptik (**BA**) in umgekehrter Reihenfolge entspricht.

26. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele, dadurch gekennzeichnet, dass die effektive Brennweite des ersten Linsensystems (**5**) für die kleinste Wellenlänge der Lichtquelle (**1**) sich von der Brennweite des ersten Linsensystems für die größte Wellenlänge der Lichtquelle (**1**) um einen Betrag δf unterscheidet, wobei der Quotient aus δf und der Brennweite des ersten Linsensystems (**5**) für die mittleren Wellenlänge f_0 mehr als 5% beträgt.

27. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele, dadurch gekennzeichnet, dass die Längsverschiebung der Fokussierorte mindestens 0,1-mal die laterale Aufspaltung der Fokussierorte beträgt.

28. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele, dadurch gekennzeichnet,

dass das erste Linsensystem (**5**) mindestens eine Linse mit einer Abbe-Zahl kleiner 40 umfasst.

29. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele, dadurch gekennzeichnet, dass das Messsegment (**41**), einen Winkel kleiner als 60° und/oder größer als 30° , insbesondere gleich 45° , zur Symmetrieachse (**40**) des ersten Linsensystems (**5**) beträgt.

30. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele, dadurch gekennzeichnet, dass die Beleuchtungs-Abbildungsoptik (**BA**) eine der ersten Blende nachgeschaltete Kollimationsoptik zum Kollimieren des in das erste aufspaltende optische Element (**4**) eintretenden Lichts aufweist.

31. Messeinrichtung nach Beispiel 29, wobei die Kollimationsoptik eine achromatische Linse umfasst.

32. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele, dadurch gekennzeichnet, dass das erste aufspaltende optische Element (**4**) ein Gitter und das erste Linsensystem (**5**) mindestens eine Diffraktivlinse umfasst.

33. Messeinrichtung nach einem der Beispiele 1 bis 31, dadurch gekennzeichnet, dass das erste aufspaltende optische Element (**4**) ein Prisma und das erste Linsensystem (**5**) mindestens eine dispersive Linse umfasst.

34. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Linsensystem (**5**) geneigt zum ersten aufspaltenden optischen Element (**4**) angeordnet ist, insbesondere derart, dass die mittlere Wellenlänge parallel zur Symmetrieachse (**40**) des ersten Linsensystems (**5**) auf das erste Linsensystem (**5**) fällt.

35. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele, dadurch gekennzeichnet, dass die erste konfokale Blende (**2**) eine Schlitzblende ist, wobei die Fokussierorte als Fokuslinien ausgebildet sind, und wobei das Messsegment als Flächensegment ausgebildet ist, und wobei die Fokuslinien entlang des Flächensegments angeordnet sind.

36. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Beispiele, dadurch gekennzeichnet, dass der Detektor (**10**) ein Spektrometer umfasst und dazu eingerichtet ist, Intensitätsmaxima der Wellenlängen zu bestimmen und daraus Abstandswerte des Objektes zu berechnen.

Bezugszeichenliste

| | |
|--------------------------------|---|
| 1 | Lichtquelle |
| 2 | Erste konfokale Blende |
| 3 | Kollimatorlinse |
| 4 | Erstes aufspaltendes optisches Element, erstes Prisma oder erstes Gitter |
| 5 | Erstes Linsensystem |
| 6 | Zweites Linsensystem |
| 7 | Zweites aufspaltendes optisches Element, zweites Prisma oder zweites Gitter |
| 8 | Fokussierlinse |
| 9 | Zweite konfokale Blende |
| 10 | Detektor |
| 11 | Erste Detektorlinse |
| 21 | Erster Fokuspunkt |
| 22 | Zweiter Fokuspunkt |
| 30 | Objekt |
| 40 | Symmetrieachse des ersten Linsensystems |
| 41 | Liniensegment |
| 51 | Erste Linse des ersten Linsensystems |
| 52 | Zweite Linse des ersten Linsensystems |
| 53 | Dritte Linse des ersten Linsensystems |
| 61 | Erste Linse des zweiten Linsensystems |
| 62 | Zweite Linse des zweiten Linsensystems |
| 63 | Dritte Linse des zweiten Linsensystems |
| 101 | Spektrometergitter |
| 102 | Zweite Detektorlinse |
| 103 | Sensor |
| 104 | Bildsensor |
| 105 | Strahlteiler |
| BA | Beleuchtungs-Abbildungsoptik |
| DA | Detektions-Abbildungsoptik |
| α | Dispersionswinkel |
| β | Einfallswinkel |
| $f(\lambda)$ | Brennweite des ersten Linsensystems |

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

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

Zitierte Patentliteratur

- EP 2076733 B1 [0001]

Patentansprüche

1. Chromatisch konfokale Messeinrichtung, umfassend

- eine Lichtquelle (1), welche Licht einer Mehrzahl von Wellenlängen emittiert, insbesondere ein kontinuierliches Spektrum,
- eine erste konfokale Blende (2), durch welche Licht der Lichtquelle (1) tritt
- eine Beleuchtungs-Abbildungsoptik (BA), umfassend mindestens
- ein erstes aufspaltendes optisches Element (4), welches als Prisma oder Gitter ausgeführt ist,
- wobei das Licht kollimiert in das erste aufspaltende optische Element (4) tritt,
- sowie ein erstes Linsensystem (5) mit mindestens einer ersten Linse, welche vom ersten aufspaltenden optischen Element (4) räumlich getrennt ist, wobei die effektive Brennweite ($f(\lambda)$) des ersten Linsensystems (5) sich für verschiedene Wellenlängen (λ) signifikant unterscheidet,
- so dass die Beleuchtungs-Abbildungsoptik (BA) derart ausgebildet ist, dass Fokuspunkte unterschiedlicher Wellenlängen an unterschiedlichen Orten gebildet werden, wobei die Orte entlang eines Liniensegments (41) liegen, welches einen spitzen Winkel zur Symmetrieachse (40) des ersten Linsensystems (5) bildet
- wobei die Messeinrichtung dazu eingerichtet ist, ein Objekt (30) zu vermessen, welches das Liniensegment (41) schneidet und zumindest einen Teil des Lichts reflektiert,
- wobei die Messeinrichtung eine Detektions-Abbildungsoptik (DA) umfasst, welche räumlich getrennt von der Beleuchtungs-Abbildungsoptik (BA) ist,
- und wobei die Detektions-Abbildungsoptik (DA) dazu eingerichtet ist, von dem Objekt (30) reflektiertes Licht ausschließlich aus einer Richtung zu empfangen, welche sich von der Richtung, aus der das Beleuchtungslicht auf das Objekt einfällt, unterscheidet,
- wobei die Detektions-Abbildungsoptik (DA) dazu eingerichtet ist, die Fokuspunkte aller Wellenlängen auf eine zweite konfokale Blende (9) abzubilden und
- wobei die Messeinrichtung einen Detektor (10) umfasst, welcher dazu eingerichtet ist, Intensität des durch die zweite Blende (9) tretenden Lichts zu erfassen.

2. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Brennweite des ersten Linsensystems (5) für die kleinste Wellenlänge der Lichtquelle (1) sich von der Brennweite des ersten Linsensystems für die größte Wellenlänge der Lichtquelle (1) um einen Betrag δf unterscheidet, wobei der Quotient aus δf und der Brennweite des ersten Linsensystems (5) für die mittleren Wellenlänge f_0 mehr als 5% beträgt.

3. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass

die longitudinale Aufspaltung der Fokuspunkt-Lagen mindestens 0,1-mal die laterale Aufspaltung der Fokuspunkt-Lagen beträgt.

4. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das erste Linsensystem (5) mindestens eine Linse mit einer Abbe-Zahl kleiner 40 umfasst.

5. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Liniensegment (41), welche durch die Fokuspunkt-Lagen der unterschiedlichen Wellenlängen geht, einen Winkel kleiner als 60° und/oder größer als 30° zur Symmetrieachse (40) des ersten Linsensystems (5) beträgt, insbesondere gleich 45° .

6. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Beleuchtungs-Abbildungsoptik (BA) eine Kollimatorlinse (3) umfasst, welche zwischen Lichtquelle (1) und erstem aufspaltendem optischen Element (4) angeordnet ist und achromatisch ist.

7. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das erste aufspaltende optische Element (4) ein Gitter ist und das erste Linsensystem (5) mindestens eine Diffraktivlinse umfasst.

8. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das erste Linsensystem (5) geneigt zum ersten aufspaltenden optischen Element (4) angeordnet ist, insbesondere derart, dass die mittlere Wellenlänge parallel zur Symmetrieachse (40) des ersten Linsensystems (5) auf das erste Linsensystem (5) fällt.

9. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste konfokale Blende (2) eine Schlitzeblende ist, wobei statt Fokuspunkten für jede Wellenlänge Fokuslinien gebildet werden, welche entlang einem Flächensegment angeordnet sind welches einen spitzen Winkel zur Symmetrieachse (40) des ersten Linsensystems (5) bildet.

10. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Detektions-Abbildungsoptik (DA) ein zweites aufspaltendes optisches Element (7), welches als Prisma oder Gitter ausgeführt ist, und ein zweites Linsensystem (6) umfasst.

11. Messeinrichtung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass das zweite aufspaltende optische Element (7) baugleich zum ersten aufspaltenden optischen Element (4) ausgeführt ist und dass das zweite Linsensystem (6) baugleich zum ersten Linsensystem (5) ausgeführt ist.

12. Messeinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Detektor (10) ein Spektrometer umfasst und dazu eingerichtet ist, Intensitätsmaxima der Wellenlängen zu bestimmen und daraus Abstandswerte des Objektes zu berechnen.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

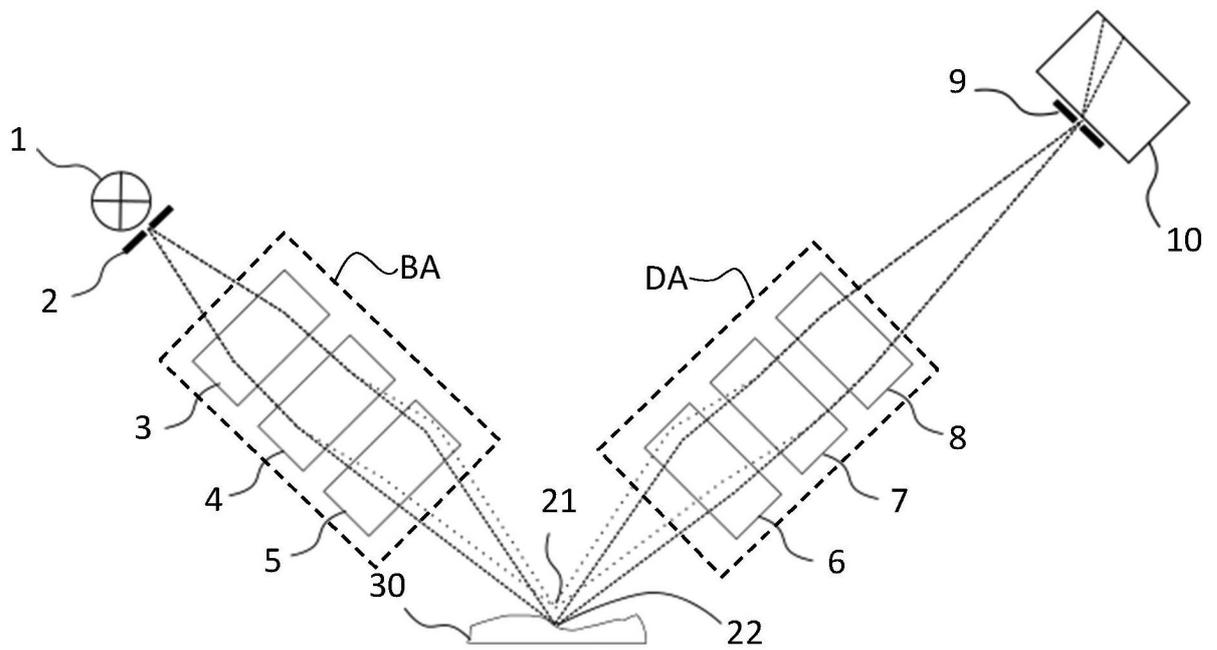


Fig. 1

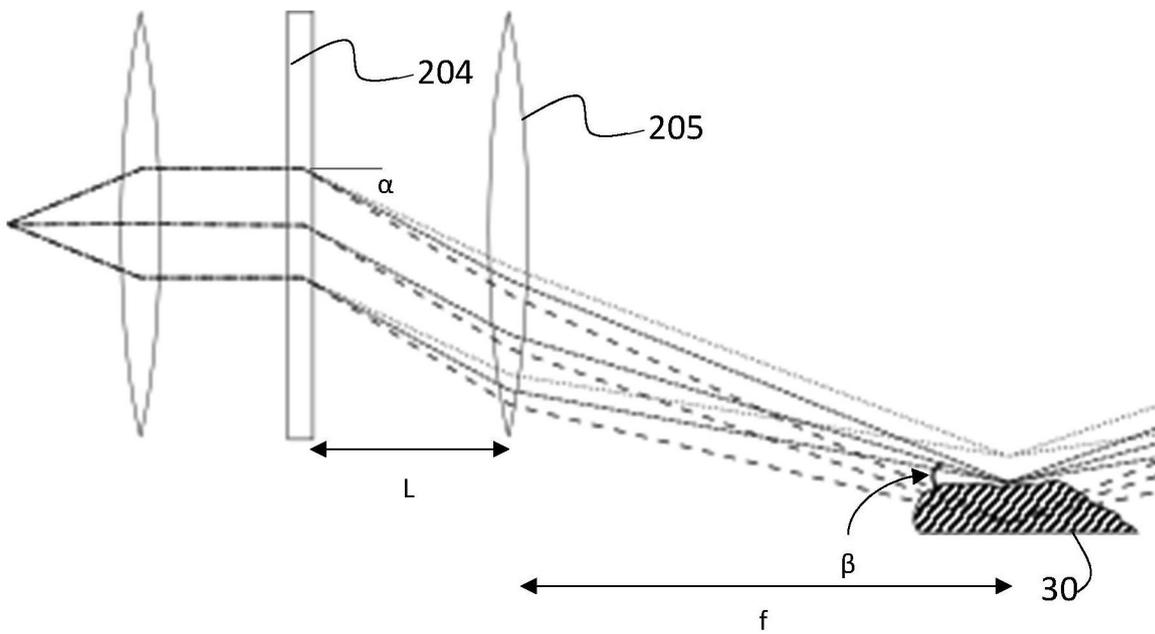


Fig. 2 (Stand der Technik)

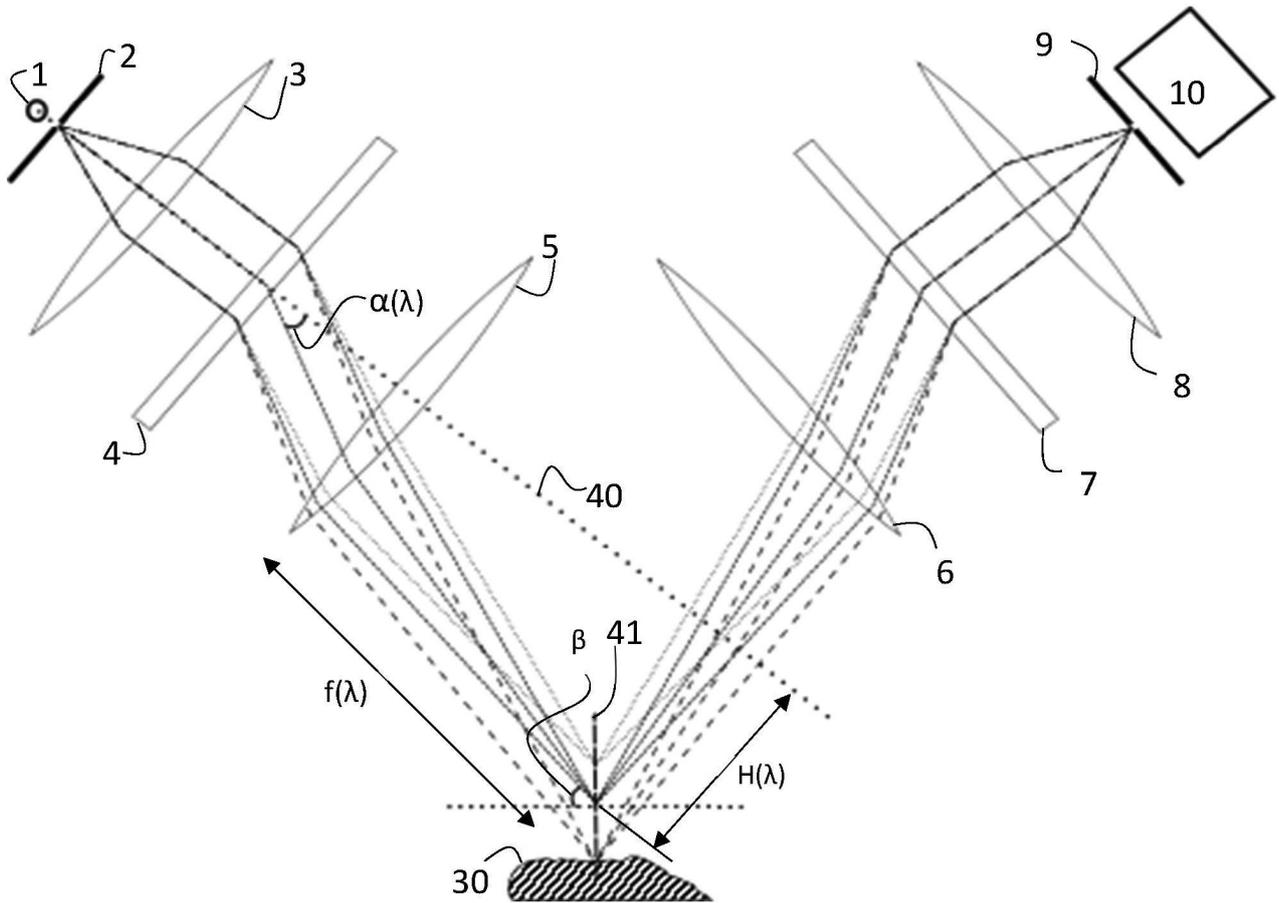


Fig. 3a

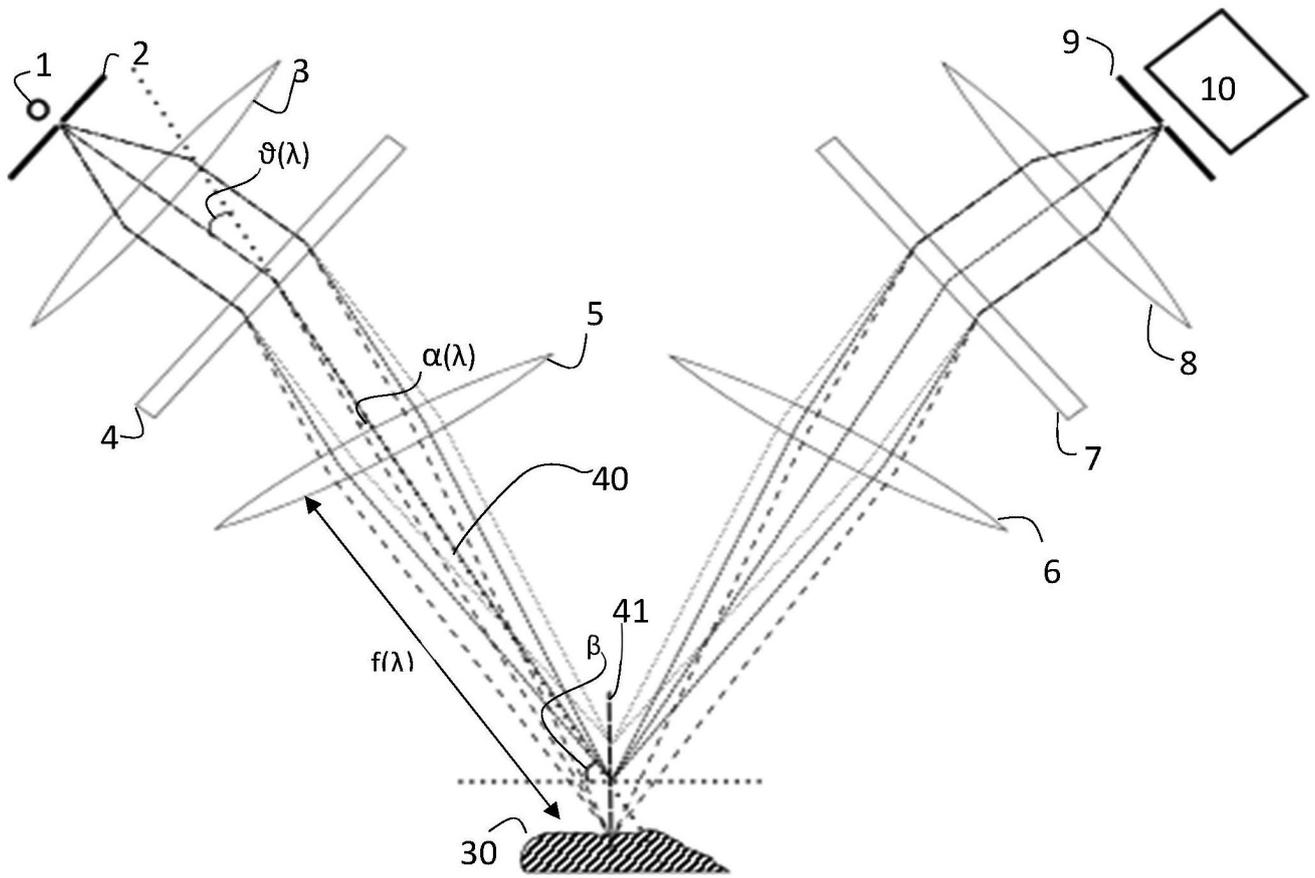


Fig. 3b

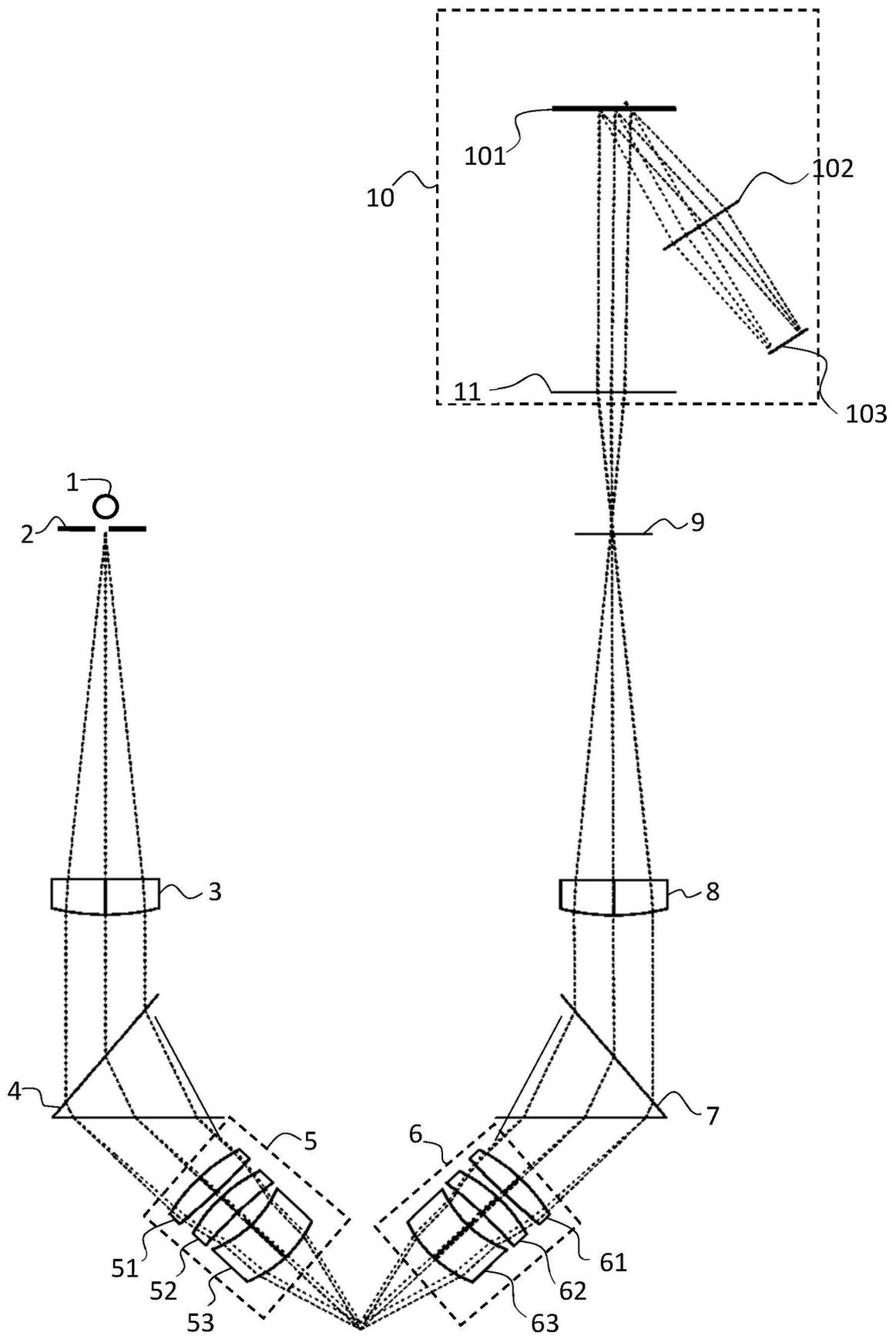


Fig. 4

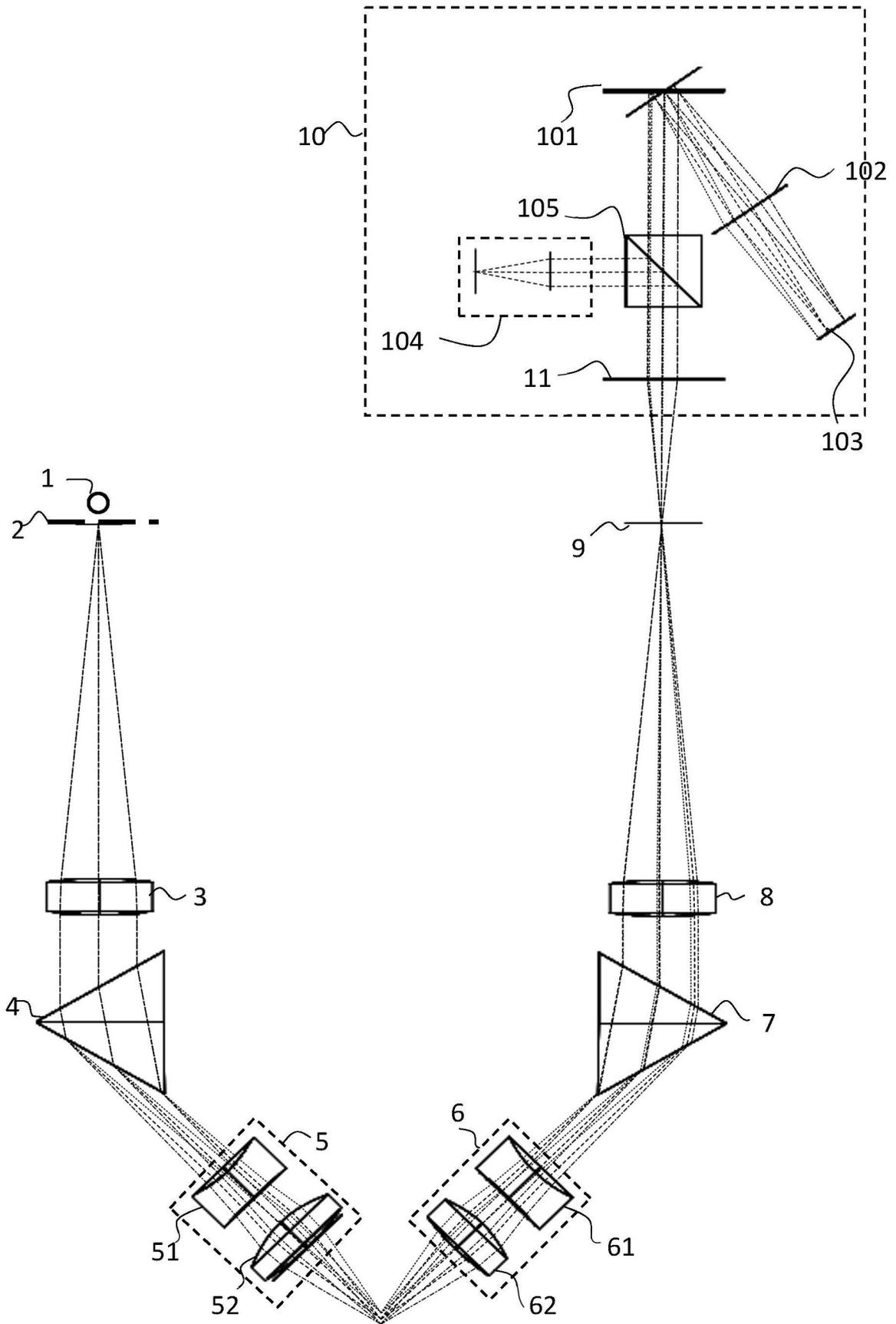


Fig. 5