(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
18. Januar 2024 (18.01.2024)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2024/012878 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G01B 11/24 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2023/067657

(22) Internationales Anmeldedatum:
28. Juni 2023 (28.06.2023)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2022 117 536.7
13. Juli 2022 (13.07.2022) DE

(71) Anmelder: **PRECITEC OPTRONIK GMBH** [DE/DE]; Schleussnerstr. 54, 63263 Neu-Isenburg (DE).

(72) Erfinder: **VIETZE, Laura**; Kranichsteiner Str. 3, 64289 Darmstadt (DE). **DIETZ, Christoph**; Anton-Bruckner Straße 11, Obertshausen 63179 (DE). **ROELLINGHOFF, Frauke**; Kennedyallee 54, 60596 Frankfurt (DE).

(74) Anwalt: **OSTERTAG & PARTNER PATENTANWÄLTE MBB**; Azenbergstraße 35, 70174 Stuttgart (DE).

(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST,

(54) **Title:** APPARATUS FOR CHROMATIC CONFOCAL MEASUREMENT OF DISTANCES

(54) **Bezeichnung:** VORRICHTUNG ZUR CHROMATISCH KONFOKALEN MESSUNG VON ABSTÄNDEN

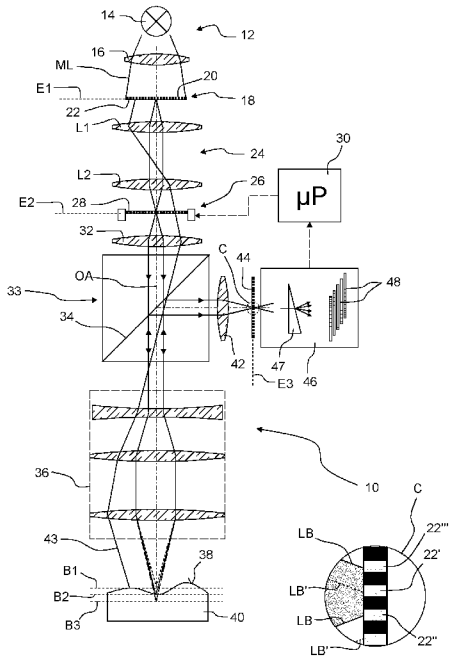


Fig. 1

(57) **Abstract:** The invention relates to an apparatus for chromatic confocal measurement of distances from a plurality of points on a reflective surface (38) of an object (40). The apparatus has: a light source (12) which generates polychromatic measuring light (ML); and a light pattern generating device (18) which generates a light pattern from the measuring light. A chromatically uncorrected objective lens (36) generates images of the light pattern in image planes (B1, B2, B3), the axial position of said image planes being wavelength-dependent due to longitudinal chromatic aberration. The apparatus also comprises a static spatial filter (44), a beam splitter cube (33), and a spectrometer (46) which spectrally analyses the measuring light reflected by the surface (38). According to the invention, the apparatus also comprises a spatial filter (26; 26'; 26") which can be digitally switched pixel-by-pixel and has a plurality of pixels (28) and either forms the light pattern generating device (18) or is located in a plane (E2) that is optically conjugated with respect to the static spatial filter (44). Each pixel (28) can be converted into a first switching state, in which the pixel (28) blocks measuring light (ML), and into a second switching state, in which the pixel (28) does not block measuring light (ML).

(57) **Zusammenfassung:** Angegeben wird eine Vorrichtung zur chromatisch konfokalen Messung von Abständen zu mehreren Punkten auf einer reflektierenden Oberfläche (38) eines Objekts (40). Die Vorrichtung hat eine Lichtquelle (12), die polychromatisches Messlicht (ML) erzeugt, sowie eine Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung (18), die aus dem Messlicht ein Lichtmuster erzeugt. Ein chromatisch unkorrigiertes Objektiv (36) erzeugt Bilder des Lichtmusters in Bildebenen (B1, B2, B3), deren axiale Position aufgrund chromatischer Längsaberration wellenlängenabhängig ist. Die Vorrichtung weist ferner ein statisches Raumfilter (44), einen Strahlteilerwürfel (33) und ein Spektrometer (46) auf, das von der Oberfläche (38) reflektiertes Messlicht spektral analysiert. Erfindungsgemäß umfasst die Vorrichtung ferner ein pixelweise digital

WO 2024/012878 A1

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

schaltbares Raumfilter (26; 26'; 26"), das mehrere Pixel (28) aufweist und entweder die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung (18) bildet oder in einer zum statischen Raumfilter (44) optisch konjugierten Ebene (E2) angeordnet ist. Jedes Pixel (28) ist in einen ersten Schaltzustand, in dem das Pixel (28) Messlicht (ML) blockiert, und in einen zweiten Schaltzustand überführbar, in dem das Pixel (28) Messlicht (ML) nicht blockiert.

Vorrichtung zur chromatisch konfokalen Messung von Abständen

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

1. Gebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur chromatisch konfokalen Messung von Abständen an mehreren, vorzugsweise entlang einer Linie angeordneten Punkten auf Oberflächen von Werkstücken und anderen Objekten.

2. Beschreibung des Standes der Technik

Vorrichtungen zur chromatisch konfokalen Messung von Abständen werden in der industriellen Messtechnik seit vielen Jahren eingesetzt, wenn Abstände zu Werkstücken oder anderen Objekten berührungslos und mit hoher Genauigkeit gemessen werden sollen. Bei transparenten Objekten lassen sich mit solchen Vorrichtungen auch Wandstärken oder andere Dicken messen, da in der Regel für jede optische Grenzfläche ein Abstand ermittelt werden kann und sich die Dicke als Differenz der gemessenen Abstände ergibt.

Herkömmliche Vorrichtungen zur chromatisch konfokalen Messung von Abständen enthalten eine Lichtquelle, die polychromatisches Messlicht erzeugt und auf eine Lochblende richtet, die eine sehr kleine Blendenöffnung hat. Die Blendenöffnung wird von einer Abbildungsoptik auf die zu vermessende Oberfläche abgebildet. Zumindest ein Teil der Abbildungsoptik weist eine signifikante chromatische Längsaberration auf. Verschiedenfarbige Bilder der Blendenöffnung sind deswegen auf der optischen Achse der Abbildungsoptik hintereinander angeordnet. Nur der spektrale Anteil des Messlichts, bei dem das Bild der Blendenöffnung genau auf der zu vermessenden Oberfläche liegt, wird von dieser so zurückreflektiert, dass es in die gleiche Blendenöffnung oder eine hierzu optisch konjungiert angeordnete Blendenöffnung eintreten kann. Die Wellenlänge dieses spektralen Anteils wird mit Hilfe eines Spektrometers erfasst. Jeder Wellenlänge ist dabei ein bestimmter Abstand von der Abbildungsoptik zugeordnet.

Die anderen spektralen Anteile werden zwar von der Objektoberfläche ebenfalls teilweise reflektiert, können aber von der Abbildungsoptik nicht in die gleiche oder eine dazu optisch konjugierte Blendenöffnung fokussiert werden und tragen deswegen nicht signifikant zu dem Teil des Messlichts bei, der vom Spektrometer spektral analysiert wird.

Aus der US 2018/0038680 A1 ist eine chromatisch konfokale Messvorrichtung bekannt, mit der sich die Abstände oder Dicken an mehreren Punkten gleichzeitig messen lassen. Die ansonsten übliche Lochblende ist hier durch eine linienhafte oder flächige Anordnung von Enden optischer Fasern ersetzt. Wenn die Abstände oder Dicken gleichzeitig an mehreren Orten gemessen werden, verkürzt dies die Messzeit erheblich. Selbst von größeren Oberflächen lässt sich dann in kurzer Zeit ein vollständiges Oberflächenprofil erstellen.

Die laterale Auflösung einer derartigen Mehrpunkt-Messvorrichtung, d.h. die Dichte der Messpunkte auf der Oberfläche des Objekts, ist dadurch begrenzt, dass vom Objekt reflektiertes Messlicht, das auf das Ende einer optisch konjugierten optischen Faser trifft, nicht gleichzeitig auch eine benachbarte optische Faser treffen darf. Falls es zu einem solchen optischen Übersprechen kommt, können den einzelnen Messpunkten keine eindeutigen Abstandswerte mehr zugeordnet werden. Zu einem optischen Übersprechen trägt u.a. bei, dass das Bild eines Faserendes auch bei optimal korrigierten Abbildungsoptiken aus physikalischen Gründen nie exakt scharf sein kann, sondern aufgrund von Beugungserscheinungen die Form eines flächig ausgedehnten Beugungs-Scheibchens hat, das mehrere deutlich erkennbare Nebenmaxima hat.

Bei den bekannten Vorrichtungen zur chromatisch-konfokalen Mehrpunktmessung haben deswegen die Faserenden einen relativ großen Abstand, weswegen keine hohe Dichte von Messpunkten möglich ist.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

Aufgabe der Erfindung ist es, eine Vorrichtung zur chromatisch konfokalen Messung von Abständen zu mehreren Punkten auf einer Oberfläche eines Objekts anzugeben, die eine hohe laterale Auflösung hat.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch eine Vorrichtung zur chromatisch konfokalen Messung von Abständen an mehreren Punkten auf einer Oberfläche eines Objekts gelöst, die eine Lichtquelle hat, die dazu eingerichtet ist, polychromatisches Messlicht zu erzeugen. Eine Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung ist dazu eingerichtet, aus dem Messlicht ein Lichtmuster zu erzeugen, das sich in einer ersten Ebene entlang einer Dimension oder entlang zweier Dimensionen erstreckt. Ein chromatisch unkorrigiertes Objektiv ist dazu eingerichtet, Bilder des Lichtmusters in Bildebenen zu erzeugen, deren axiale Position aufgrund chromatischer Längsaberration wellenlängenabhängig ist. Ein statisches Raumfilter ist in einer zweiten Ebene angeordnet und hat eine dem Lichtmuster entsprechende (aber nicht notwendig identische) Filterfunktion, wobei die zweite Ebene optisch konjugiert zu der ersten Ebene ist. Ein vorzugsweise nicht polarisierender Strahlteilerwürfel ist im Lichtweg zwischen der Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung und dem Objektiv angeordnet und leitet Messlicht, das von der Oberfläche reflektiert wurde und das Objektiv durchtreten hat, dem Raumfilter zu. Ein Spektrometer hat mehrere Eingangskanäle, die dazu eingerichtet sind, reflektiertes Messlicht, das einen dem jeweiligen Eingangskanal zugeordneten Punkt des statischen Raumfilters durchtreten hat, spektral zu analysieren. Eine Auswerteeinrichtung ist dazu eingerichtet, aus von dem Spektrometer gemessenen Wellenlängen Abstände von Punkten auf der Oberfläche zu der Messvorrichtung zu berechnen. Erfindungsgemäß weist die Vorrichtung außerdem ein pixelweise schaltbares Raumfilter auf, das mehrere Pixel aufweist und entweder die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung bildet oder in einer dritten Ebene angeordnet ist, die zu der ersten Ebene und der zweiten Ebene optisch konjugiert ist, wobei jedes Pixel in einen ersten Schaltzustand, in dem das Pixel Messlicht blockiert, und in einen zweiten Schaltzustand überführbar ist, in dem das Pixel Messlicht nicht blockiert.

Das pixelweise schaltbare Raumfilter ermöglicht es, zu einem Zeitpunkt während der Messung einen Teil des Messlichts, der zu einem optischen Übersprechen führen würde, abzublenden oder so abzulenken, dass es nicht zum Spektrometer gelangen kann. Zu einem anderen Zeitpunkt wird ein anderer Teil des Messlichts unterdrückt. Auf diese Weise kann man durch die Kombination mehrerer sukzessiver Messungen eine sehr hohe laterale Auflösung erzielen.

Im einfachsten Fall erfolgt die Ansteuerung des pixelweise digital schaltbaren Raumfilters so, dass es bei einer Messung zwischen einer ersten Schaltkonfiguration und einer zweiten Schaltkonfiguration wechselt, wobei in der ersten Schaltkonfiguration keine zwei benachbarten Pixel im gleichen Schaltzustand sind, und wobei die zweite Schaltkonfiguration komplementär zu der ersten Schaltkonfiguration ist. Dadurch sind lediglich zwei Einzelmessungen erforderlich.

Um noch höhere laterale Auflösungen zu erzielen, kann es notwendig werden, dass die Abstände zwischen den jeweils aktiven Pixeln größer sind, so dass sich bei jeder Schaltkonfiguration zwischen zwei aktiven Pixeln mindestens n = 2, 3, ... Pixel in einer inaktiven Schaltstellung befinden. Es müssen dann entsprechend n+1 unterschiedliche Schaltkonfigurationen aufeinander folgen, bis alle Pixel einmal in einer aktiven Schaltstellung waren.

Die Ansteuerung mit verschiedenen Schaltkonfigurationen kann nicht nur von der erforderlichen lateralen Auflösung abhängig gemacht werden, sondern auch von den Eigenschaften der zu vermessenden Objektoberfläche. Bei Oberflächen, bei denen das Signal-Rauschverhältnis günstig ist, kann gegebenenfalls mehr Übersprechen toleriert werden, so dass sich zu einem bestimmten Zeitpunkt die Hälfte oder sogar alle Pixel des Raumfilters im aktiven zweiten Schaltzustand befinden können. Je störender das Übersprechen ist, desto größer sollte zu einem gegebenen Zeitpunkt der Abstand zwischen Pixeln im aktiven zweiten Schaltzustand sein.

Die optische Konjugation zwischen der dritten Ebene, in der sich das pixelweise digital schaltbare Raumfilter befindet, und der ersten Ebene, in der sich die Lichtmuster-Erzeugungseinheit befindet, stellt sicher, dass Pixel des pixelweise digital schaltbaren Raumfilters eindeutig den einzelnen Messpunkten zugeordnet werden können. Als optisch konjugiert werden Ebenen bezeichnet, die durch eine optische Abbildung ineinander überführt werden können. In der Regel befindet sich daher zwischen zwei optisch konjugierten Ebenen ein eine oder mehrere Linsen oder Spiegel aufweisendes Objektiv, das die optische Abbildung bewirkt. Anstelle von Objektiven kann die optische Konjugation jedoch in Sonderfällen auch von anderen optischen Systemen bewirkt werden. Ein Beispiel hierfür sind die gegenüberliegenden Enden von optischen Fasern, die beide als optische konjugiert

angesehen werden können, da die punktartige Lichtverteilung an beiden Enden identisch ist. Mit Bündeln von Lichtleitfasern können daher auch optische Abbildungen erzeugt werden, wie dies z.B. von Endoskopen bekannt ist. Auch zwei unmittelbar hintereinander liegende Ebenen können in einem weiteren Sinne als optisch konjugiert angesehen werden.

Wenn das pixelweise digital schaltbare Raumfilter unabhängig von der Lichtmustererzeugungseinrichtung und in der dritten Ebene angeordnet ist, so kann es sich im Lichtweg zwischen der Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung und dem Strahlteilerwürfel befinden. Eine solche Anordnung ist günstig, dort das Bild des Lichtmusters schärfer ist als nach der erneuten Abbildung durch das Objektiv.

Bevorzugt weist die Vorrichtung dann eine Abbildungsoptik auf, welche die erste Ebene auf die dritte Ebene abbildet. Eine solche Abbildungsoptik ist vor allem dann vorteilhaft, wenn die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung eine Anordnung von Enden optischer Fasern oder eine Blende mit mindestens einer Öffnung umfasst. Aus den Fasern oder der Öffnung tritt das Messlicht üblicherweise stark divergierend aus. Ordnet man das pixelweise digital schaltbare Raumfilter direkt an den Faserenden oder vor der Öffnung einer Blende an, so ist zwar eine optische Konjugation im weiteren Sinne gegeben. Viele besonders geeignete pixelweise digital schaltbare Raumfilter wie beispielsweise Mikrospiegelarrays können aber nicht so dicht an der Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung angeordnet werden, dass man noch von einer optischen Konjugation sprechen kann. Die Abbildungsoptik erlaubt einerseits die Nutzung einer großen numerischen Apertur und andererseits den Einsatz von Mikrospiegelarrays und anderen schaltbaren Raumfiltern, die wegen einer Strahlfaltung oder des erforderlichen Bauraums nur in einem größeren Abstand von der Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung angeordnet werden können.

Das Lichtmuster kann mehrere zweidimensional verteilte Lichtpunkte oder mindestens eine kontinuierliche oder aus Lichtpunkten zusammengesetzte Lichtlinie umfassen. Die Aufteilung einer kontinuierlichen Lichtlinie in einzelne Messpunkte wird durch die Pixel des schaltbaren Raumfilters bewirkt.

Bei einem Ausführungsbeispiel umfasst die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung eine ebene Anordnung von Mikro-Sammellinsen. Die Sammellinsen fokussieren das Messlicht

auf die jeweils zugeordneten Pixel des schaltbaren Raumfilters und bewirken dadurch eine optische Konjugation im weiteren Sinne.

Bei einem anderen Ausführungsbeispiel bildet das pixelweise digital schaltbare Raumfilter die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung. Ein solcher Aufbau ist besonders einfach und erlaubt die Verwendung von Raumfilter in Form von Mikrospiegelarrays, ohne dass eine zusätzliche Abbildungsoptik erforderlich ist.

Das Raumfilter sollte dann mit Licht beleuchtet werden, das eine Winkelverteilung hat, die auf die numerische Apertur des chromatisch unkorrigierten Objektivs abgestimmt ist. Dies gelingt besonders gut, wenn sich das Messlicht zwischen der Lichtquelle und dem pixelweise digital schaltbare Raumfilter als Freistrahl ausbreitet.

Um Lichtverluste zu vermeiden, sollte das als Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung wirkende Raumfilter von der Lichtquelle so beleuchtet werden, dass möglichst viel Licht auf das Raumfilter trifft. Je nach Art der Lichtquelle genügt bereits eine einfache Sammeloptik, um das von einer Austrittsfläche der Lichtquelle ausgehende Licht so zu bündeln, dass es verlustarm auf das Raumfilter trifft. Wenn das vom Raumfilter erzeugte Lichtmuster eine aus mehreren Lichtpunkten zusammengesetzte Lichtlinie umfasst, kann die Sammeloptik eine Zylinderlinse oder in anderer Weise anamorphotisch ausgebildet sein.

Bei einem Ausführungsbeispiel ist im Lichtweg zwischen der Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung und dem Strahlteilerwürfel ein Kollimator angeordnet, der in den Strahlteilerwürfel eintretendes Messlicht kollimiert. Aufgrund der konfokalen Abbildung durchtritt dann auch das vom Objekt reflektierte Messlicht den Strahlteilerwürfel kollimiert. Ein kollimierter Durchtritt ist vorteilhaft, weil der Strahlteilerwürfel dadurch keine sphärische Aberration erzeugt.

Das pixelweise digital schaltbare Raumfilter ist vorzugsweise ein Mikrospiegel-Array. Alternativ kann es sich auch um eine transmissive MEMS Komponente handeln, wie sie z.B. in der US 8,054,527 B2 beschrieben ist. Auch ein LCD-Panel kommt als pixelweise digital schaltbare Raumfilter in Betracht, hat aber infolge der polarisierenden Eigenschaften Nachteile.

Aus dem gleichen Grund ist es zweckmäßig, wenn der Strahlteilerwürfel nicht polarisierend ist. Das Teilungsverhältnis des Strahlteilerwürfels hängt dann nicht vom Polarisationszustand und damit von den Eigenschaften der Objektoberfläche ab.

Bei einem Ausführungsbeispiel enthält die polychromatische Lichtquelle einen Luminophor, wie dies aus der EP 3 764 056 A1 (entspricht US 10,731,965 B1) bekannt ist. Vorzugsweise hat eine solche Lichtquelle eine langgestreckte Lichtaustrittsfläche. Falls optische Fasern zur Lichtleitung eingesetzt werden, können deren Enden eine rechteckige oder kreisförmige Anordnung bilden und Licht aufnehmen, das von einer benachbart angeordneten quadratischen oder kreisrunden Lichtaustrittsfläche des Luminophoren emittiert wird.

Bei einer Luminophor-basierten Lichtquelle wird mittels einer Pumpquelle, bei der es sich meist um einen Laser oder um eine LED handelt, ein als Luminophor bezeichneter Leuchtstoff angeregt, der durch einen physikalischen Prozess, insbesondere Phosphoreszenz, Fluoreszenz oder Szintillation, Licht aussendet. Eine solche Lichtquelle hat den Vorteil, dass sie die gesamte konfokale Apertur ausleuchten kann und dabei eine hohe Effizienz und hohe Lichtausbeute hat.

Um optisches Übersprechen durch Streulicht o.ä. zu verringern, können weitere Raumfilter an Positionen angeordnet sein, die zu der ersten, zweiten und dritten Ebene optisch konjugiert sind.

Das Spektrometer kann mit dem pixelweise digital schaltbare Raumfilter derart synchronisiert sein, dass Eingangskanäle, die Pixeln im zweiten Schaltzustand zugeordnet sind, logisch oder physikalisch deaktiviert sind. Auf diese Weise wird verhindert, dass Messlicht, das infolge Übersprechens in benachbarte Eingangskanäle gelangt, bei der Auswertung berücksichtigt wird. Die Deaktivierung der betreffenden Eingangskanäle erfolgt am einfachsten so, dass diese dort erfassten Intensitäten nicht ausgelesen werden.

Wenn das pixelweise digital schaltbares Raumfilter im Lichtweg zwischen der Lichtquelle und dem Strahlteilerwürfel angeordnet ist, kann ein weiteres pixelweise digital schaltbares Raumfilter ist im Lichtweg zwischen dem Strahlteilerwürfel und dem Spektrometer in einer vierten Ebene angeordnet sein, die zu der ersten Ebene und der zweiten Ebene optisch

konjugiert ist. Jedes Pixel des weiteren pixelweise digital schaltbaren Raumfilters ist in einen ersten Schaltzustand, in dem das Pixel Messlicht blockiert, und in einen zweiten Schaltzustand überführbar, in dem das Pixel Messlicht nicht blockiert.

Hintergrund dieser Maßnahme ist, dass das Bild des Lichtmusters bei jeder optischen Abbildung an Schärfe verliert. Wenn etwa zwei benachbarte Beugungsscheibchen sich auf der Objektoberfläche nur vernachlässigbar überlappen, kann die Überlappung nach erneuter Abbildung durch das Objektiv auf der Höhe des Spektrometers bereits signifikant sein. Das weitere pixelweise digital schaltbare Raumfilter kann hier Abhilfe schaffen, indem es die betreffenden Lichtbündel wieder so beschneidet, dass auch nach erneuter Abbildung kein Übersprechen am Spektrometer stattfindet.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnungen näher erläutert. In diesen zeigen:

Figur 1 eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur Abstandsmessung gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel in einem schematischen meridionalen Schnitt;

Figur 2 eine in der Vorrichtung gemäß der Figur 1 als Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung verwendete Lochblende in einer Draufsicht;

Figuren 3a und 3b ein in der Vorrichtung gemäß der Figur 1 enthaltenes transmissives MEMS-Raumfilter in einem vergrößerten schematischen Schnitt in unterschiedlichen Schaltkonfigurationen;

Figur 4 eine anderes Ausführungsbeispiel für eine in der Vorrichtung gemäß der Figur 1 als Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung verwendbare Lochblende in einer Draufsicht;

Figur 5 eine weiteres Ausführungsbeispiel für eine in der Vorrichtung gemäß der Figur 1 als Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung verwendbare Lochblende in einer Draufsicht;

Figur 6 eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur Abstandsmessung gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel in einem schematischen meridionalen Schnitt;

Figuren 7a und 7b ein in der Vorrichtung gemäß der Figur 6 enthaltenes reflektives MEMS-Raumfilter in einem vergrößerten schematischen Schnitt in unterschiedlichen Schaltkonfigurationen;

Figur 8 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels, bei dem die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung durch eine lineare Anordnung von Mikrolinsen gebildet wird;

Figuren 9a und 9b weitere Möglichkeiten für mögliche Schaltkonfigurationen in an die Figuren 3a und 3b angelehnten schematischen Darstellungen;

Figur 10 einen Ausschnitt aus einer weiteren Variante mit zwei transmissiven MEMS-Raumfiltern; und

Figur 11 eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur Abstandsmessung gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel in einem schematischen meridionalen Schnitt, bei der das pixelweise digital schaltbare Raumfilter die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung bildet.

BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSBEISPIELE

1. Aufbau der Messvorrichtung

Die Figur 1 zeigt eine erfindungsgemäße und insgesamt mit 10 bezeichnete Vorrichtung zur Abstandsmessung gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel in einem schematischen meridionalen Schnitt.

Die Vorrichtung 10 hat eine Lichtquelle 12, die polychromatisches Messlicht ML erzeugt. Das Messlicht ML hat dabei vorzugsweise ein kontinuierliches Spektrum. Die Verwendung von Kammspektren oder anderen diskreten Spektren kommt jedoch grundsätzlich eben-

falls in Betracht, sofern die Wellenlängenpeaks ausreichend dicht benachbart sind. Im dargestellten Ausführungsbeispiel umfasst die Lichtquelle 12 eine Superlumineszenzdiode 14 und eine in Lichtausbreitungsrichtung dahinter angeordnete Sammellinse 16.

Das von der Lichtquelle 12 erzeugte Messlicht ML trifft auf eine Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung 18, die aus dem auftreffenden Messlicht ML ein Lichtmuster erzeugt. Im dargestellten Ausführungsbeispiel umfasst die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung 18 eine Lochblende 20, die in der Figur 2 in Draufsicht gezeigt ist. Die Lochblende 20 hat mehrere Blendenöffnungen 22, die entlang einer Linie angeordnet sind. Bei Beleuchtung mit dem Messlicht ML stellen die Blendenöffnungen 22 Punktlichtquellen dar, aus denen das Messlicht ML divergent austritt.

Die Blendenöffnungen 22 sind in einer ersten Ebene E1 angeordnet, die mit einer Objektebene einer Abbildungsoptik 24 zusammenfällt. Im dargestellten Ausführungsbeispiel ist die Abbildungsoptik 24 als 4f-Optik ausgebildet. Eine solche 4f-Optik zeichnet sich dadurch aus, dass zwei Objektive oder Linsen L1, L2 so angeordnet sind, dass die hintere Brennebene der Linse L1 mit der vorderen Brennebene der Linse L2 zusammenfällt. Dies führt zu einem beidseitig telezentrischen Strahlengang mit der Folge, dass die Winkelverteilung an den Blendenöffnungen 22 in die Bildebene E2 der Abbildungsoptik 24 ohne Verkippungen übertragen wird. Ist wie im dargestellten Ausführungsbeispiel die Brennweite der Linsen L1, L2 gleich, ist der Abbildungsmaßstab $\beta = -1$.

In der Bildebene E2 der Abbildungsoptik 24 ist ein transmissives MEMS-Raumfilter 26 angeordnet, wobei MEMS eine Akronym für mikro-elektro-mechanisches System ist. Solche Filter 26 umfassen eine Vielzahl von regelmäßig angeordneten Elementen oder Pixeln 28, die individuell mechanisch bewegt werden können, um den Lichtweg wahlweise freizugeben oder zu blockieren. Geeignete Beispiele für derartige MEMS-Filter sind an sich bekannt und z.B. in der US 2006/0012781 A1 beschrieben. Alternativ kann auch ein LCD-Panel verwendet werden, das allerdings polarisierend wirkt, was bei einigen Messaufgaben nachteilig sein kann.

Die Figuren 3a und 3b zeigen das transmissive MEMS-Raumfilter 26 in einem vergrößerten schematischen Schnitt. Im dargestellten Ausführungsbeispiel sind die Pixel 28 des transmissiven MEMS-Raumfilters 26 so entlang einer Linie angeordnet, dass jedem Pixel 28 genau eine Blendenöffnung 22 der Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung 18 zugeordnet ist. Diese Zuordnung resultiert aus der von der Abbildungsoptik 24 bewirkten Abbildung der Blendenöffnungen 22 auf die Pixel 28.

Die individuelle Schaltbarkeit der einzelnen Pixel 28 ist in der Figur 3a durch helle und dunkle Hinterlegungen angedeutet. Ein dunkel hinterlegtes Pixel 28 befindet sich in einem ersten Schaltzustand, in dem das Pixel 28 Messlicht ML blockiert. Ein hell hinterlegtes Pixel 28 befindet sich in einem zweiten Schaltzustand, in dem das Pixel 28 für Messlicht transparent ist. Die Schaltzustände der Pixel 28 werden von einer Steuer- und Auswerteeinrichtung 30 vorgegeben. Der Wechsel zwischen unterschiedlichen Schaltzuständen, wie er aus einem Vergleich der Figuren 3a und 3b deutlich wird, erfolgt typischerweise innerhalb von wenigen Mikrosekunden.

Für das in der Figur 3a ganz links gezeigte Pixel 28, das sich in dem zweiten Schaltzustand befindet, ist mit weiteren Strahlen angedeutet, dass die Winkelverteilung des Messlichts ML beim Durchtritt durch das transmissive MEMS-Raumfilter 26 erhalten bleibt. Das transmissive MEMS-Raumfilter 26 filtert somit nur im Ortsraum, aber nicht im Winkelraum. Folglich tritt das Messlicht ML am Ausgang des Pixels 28 mit der numerischen Apertur NA des Abbildungssystems 24 aus.

Die Pixel 28 des transmissiven MEMS-Raumfilters 26 stellen somit ebenfalls Punktlichtquellen dar, die aber im Gegensatz zu den Blendenöffnungen 22 der Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung 18 individuell ein- und ausschaltbar sind.

Die Figuren 3a und 3b illustrieren zwei unterschiedliche Schaltkonfigurationen, zwischen denen bei diesem Ausführungsbeispiel gewechselt werden kann. In der ersten Schaltkonfiguration, die in der Figur 3a gezeigt ist, sind keine zwei benachbarten Pixel 28 im gleichen Schaltzustand. Der Schaltzustand alterniert somit abwechseln von Pixel zu Pixel. Die zweite Schaltkonfiguration gemäß der Figur 3b ist komplementär zu der ersten Schaltkonfiguration der Figur 3a. Auch dort ist sind folglich keine zwei benachbarten Pixel 28 im gleichen

Schaltzustand, der abwechselnd von Pixel zu Pixel alterniert. Das Schaltmuster ist aber um ein Pixel versetzt, so dass man zwischen den beiden Schaltkonfigurationen gemäß den Figuren 3a und 3b wechseln kann, indem man bei jedem Pixel 28 in den jeweils anderen Schaltzustand wechselt. Welche Vorteile mit dem transmissiven MEMS-Raumfilter 26 und dem Wechsel der Schaltkonfigurationen verbunden sind, wird weiter unten im Abschnitt 2 erläutert.

Im Lichtweg hinter dem transmissiven MEMS-Raumfilter 26 ist eine Kollimatorlinse 32 angeordnet, deren vordere Brennebene mit der Ebene E2 zusammenfällt. Die aus den Pixeln 28 austretenden Strahlenbündel werden daher beim Durchtritt durch die Kollimatorlinse 32 kollimiert.

Die kollimierten Strahlenbündel treffen auf einen nicht-polarisierenden Strahlteilerwürfel 33, der eine um 45° zur optischen Achse geneigt angeordnete Strahlteilerfläche 34 hat. Ein vorgegebener Anteil des auftreffenden Lichts, z.B. 50%, wird an der Strahlteilerfläche reflektiert und geht für die Messung verloren. Das übrige Messlicht ML durchtritt den Strahlteilerwürfel aufgrund des kollimierten Strahlengangs ohne Ablenkung und trifft auf ein chromatisch unkorrigiertes Objektiv 36, das eine im Unendlichen liegenden Objektebene hat. Zusammen mit der Abbildungsoptik 24 und der Kollimatorlinse 32 bildet das Objektiv 36 aufgrund seiner chromatischen Längsaberration die in der Ebene E1 angeordneten Blendenöffnungen 22 in Bildebenen B1 bis B3 ab, deren axiale Positionen wellenlängenabhängig sind. In der Figur 2 ist dies mit durch unterschiedliche Strichelungen angedeutet. Jeder Wellenlänge ist dabei genau eine Bildebene zugeordnet. Wenn – wie im vorliegenden Ausführungsbeispiel – das von der Lichtquelle 12 erzeugte Spektrum kontinuierlich ist, entsteht folglich eine kontinuierliche Folge von Bildebenen.

Liegt das Bild einer Blendenöffnung 22 in einer Bildebene, auf deren Höhe sich eine zumindest teilweise reflektierende Oberfläche 38 eines Objekts 40 befindet, so wird das dort auftreffende Lichtbündel in sich zurückreflektiert und gelangt auf dem gleichen Weg über das Objektiv 36 zurück zur Strahlteilerfläche 34 des Strahlteilerwürfels 33. Für die hier gezeigte Konstellation ist diese Voraussetzung beispielsweise für die auf der optischen Achse OA der Vorrichtung 10 liegende Blendenöffnung 22 bei einer Wellenlänge erfüllt, für die

das Bild der Blendenöffnung 22 in der Bildebene B2 liegt. Für den Lichtstrahl 43, der durch eine andere Blendenöffnung 22 getreten ist, ist diese Voraussetzung bei dem hier unterstellten Objekt 40 bei einer anderen Wellenlänge erfüllt, für die das Bild der betreffenden Blendenöffnung 22 in der Bildebene B1 liegt. An der Oberfläche 38 wird natürlich nicht nur Licht einer einzelnen Wellenlänge reflektiert. Es gibt aber nur eine Wellenlänge, bei der das Messlichtbündel in sich reflektiert wird, weil der Fokus nur für diese Wellenlänge exakt auf der Oberfläche 38 liegt.

An der Strahlteilerfläche 34 wird ein vorgegebener Anteil des reflektierten Messlichts ML um 90° reflektiert und von einer Sammellinse 42 auf ein statisches Raumfilter 44 fokussiert, das in einer dritten Ebene E3 angeordnet ist und eine dem Lichtmuster entsprechende Filterfunktion hat. Das statische Raumfilter 44 ist an einzelnen Orten für Messlicht ML durchlässig (oder im Falle eines reflektierenden Raumfilters reflektierend), während es an den übrigen Orten das Messlicht ML blockiert. Am einfachsten Fall handelt es sich beim dem statischen Raumfilter 44 um die gleiche Lochblende, die für die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung 18 verwendet wurde, ggf. um den Abbildungsmaßstab der dazwischen liegenden Optik verkleinert oder vergrößert. Die gesamte Optik im Lichtweg zwischen der Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung 18 und dem statischen Raumfilter 44, d.h. die Abbildungsoptik 24, die Kollimatorlinse 32, das Objektiv 36 und die Fokussierlinse 42, bewirkt nämlich, dass die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung 18 auf das statische Raumfilter 44 abgebildet wird. Die Ebenen E1, E2 und E3 sind daher optisch konjugiert. Zwischenbilder entstehen auf der Höhe des transmissiven MEMS-Raumfilters 26 und in den Bildebenen B1 bis B3 auf der Oberfläche 38 des Objekts 40.

Das statische Raumfilter 44 stellt sicher, dass nur Messlichtbündel, die mit einer ganz bestimmten Wellenlänge an der Oberfläche 38 in sich reflektiert wurden, weiter ausgewertet werden können. Messlicht ML, das diese Bedingung nicht erfüllt, wird gemäß dem chromatisch-konfokalen Messprinzip durch das statische Raumfilter 44 abgeblendet.

Im Lichtweg hinter dem statischen Raumfilter 44 ist ein Spektrometer 46 mit mehreren Eingangskanälen angeordnet, die reflektiertes Messlicht ML, das einen dem jeweiligen Eingangskanal zugeordneten Punkt des statischen Raumfilters 44 durchtreten hat, spektral

analysieren. Das Spektrometer 46 enthält typischerweise ein dispersives optisches Element, z.B. eine optisches Gitter oder ein Prisma 47, und für jeden Eingangskanal eine zeilenartige Anordnung 48 lichtempfindlicher Zellen, wie dies in der Figur 1 schematisch angedeutet ist. Da Spektrometer 46 dieser Art an sich bekannt sind, sind weitere Erläuterungen dazu an dieser Stelle entbehrlich.

2. Funktion

Die Steuer- und Auswerteeinrichtung 30 berechnet bei einer Messung aus von dem Spektrometer 46 gemessenen Wellenlängen Abstände von Punkten auf der Oberfläche 38 zu der Messvorrichtung 10, wie dies für chromatisch konfokale Messvorrichtungen an sich bekannt ist. Diese Punkte sind Bilder der Punktlichtquellen, d.h. der Blendenöffnungen 22. Jeder Punktlichtquelle ist dabei ein eigener Eingangskanal zugeordnet, so dass die Abstandsmessung im Prinzip für alle Punktlichtquellen gleichzeitig durchgeführt werden kann.

Bei einer gleichzeitigen Abstandsmessung für alle Punktlichtquellen kann es aber zu einem optischen Übersprechen kommen, wenn die Punktlichtquellen sehr dicht beieinander liegen. Die Ursache dafür liegt darin, dass die Bilder der Punktlichtquellen selbst bei optimaler optischer Abbildung aufgrund von Beugung verwaschen sind und sich daher überlagern können. Dies ist schematisch in dem vergrößerten Ausschnitt C des statischen Raumfilters 44 gezeigt. In dem Ausschnitt C ist erkennbar, dass das grau hinterlegte Lichtbündel LB in der Ebene E3 nicht auf eine einzige Blendenöffnung 22‘ fokussiert wird, sondern sich teilweise auch über die beiden benachbarten Blendenöffnungen 22‘‘, 22‘‘‘ hinweg erstreckt. In die falschen Blendenöffnungen 22‘‘, 22‘‘‘ eintretendes Messlicht ML würde von den entsprechenden Eingangskanälen des Spektrometers 46 erfasst und die Abstandsmessung verfälschen. In die Blendenöffnung 22‘‘‘ etwa würde nicht nur ein mit gestrichelten Linien angedeutetes Lichtbündel LB‘ fallen, sondern teilweise auch das Lichtbündel LB.

Verhindert werden könnte das optische Übersprechen, indem die Abstände zwischen den Punktlichtquellen (d.h. hier der Blendenöffnungen 22) vergrößert werden. Diese Maßnahme würde jedoch auf Kosten der lateralen Auflösung der Vorrichtung 10 gehen.

Erfindungsgemäß steuert deswegen die Steuer- und Auswerteeinrichtung 30 das transmissive MEMS-Raumfilter 26 so an, dass die Messung in zwei Teilmessungen unterteilt wird. Bei der ersten Teilmessung befinden sich die Pixel 28 des transmissiven MEMS-Raumfilters 26 in einer der beiden in den Figuren 3a und 3b gezeigten Schaltkonfigurationen. Bei der zweiten Teilmessung befinden sich die Pixel 28 in der jeweils anderen Schaltkonfiguration. Für das benachbarte Lichtbündel LB', das im Ausschnitt C der Figur 1 mit gestrichelten Linien angedeutet ist, bedeutet dies, dass es von dem transmissiven MEMS-Raumfilter 26 an der Ausbreitung gehindert wird und nicht in Eingangskanäle des Spektrometers 46 eintreten kann, die diesem Lichtbündel LB' nicht zugeordnet sind; für das andere, in dem Ausschnitt C allerdings nicht angedeutete Lichtbündel, das dem Lichtbündel LB auf der anderen Seite benachbart ist, gilt dies entsprechend.

Gleichzeitig wird das Spektrometer 46 mit dem pixelweise digital schaltbare Raumfilter 26 so synchronisiert, dass die beiden Eingangskanäle, die den benachbarten Blendenöffnungen 22'' zugeordnet sind, deaktiviert sind. Der Anteil des Lichtbündels LB, der auf die lichtempfindlichen Zellen dieser beiden Eingangskanäle fällt, wird daher nicht ausgewertet.

Durch die Aufteilung der Messung in zwei Einzelmessungen, zwischen denen zwischen den in den Figuren 3a und 3b gezeigten Schaltkonfigurationen gewechselt wird, wird somit wirkungsvoll ein optisches Übersprechen verhindert. Dadurch lässt sich eine hohe laterale Auflösung bei einer ungefähren Verdoppelung der Messdauer erzielen. Die Steuer- und Auswerteeinrichtung 30 kann dabei so programmiert sein, dass dieser Modus nur bei solchen Messungen verwendet wird, bei denen eine hohe laterale Auflösung benötigt wird und das Objekt eine Oberfläche hat, die ein optisches Übersprechen besonders begünstigt. Sind die Anforderungen an die laterale Auflösung geringer, wird nur eine Messung mit einer der in den Figuren 3a und 3b gezeigten Schaltkonfigurationen durchgeführt.

3. Weitere Ausführungsbeispiele

Die Figur 4 zeigt in einer an die Figur 2 angelehnten Darstellung eine Schlitzblende 20' mit einer schlitzförmigen Blendenöffnung 22', die alternativ zu der in der Figur 2 gezeigten

Lochblende 20 als Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung 18 verwendet werden kann. Messlicht ML, das zu einem optischen Übersprechen führen würde, wird auch hier mit Hilfe des transmissiven MEMS-Raumfilters 26 an einer Ausbreitung gehindert.

Die Figur 5 zeigt in einer an die Figuren 2 und 3 angelehnten Darstellung eine 2D-Lochblende 20‘‘, die ebenfalls alternativ zu der in der Figur 2 gezeigten Lochblende 20 als Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung 18 verwendet werden kann. Die Blendenöffnungen 22‘‘ sind bei der 2D-Lochblende 20‘‘ in einem gleichmäßigen zweidimensionalen Raster verteilt.

Das transmissive MEMS-Raumfilter 26 muss dann über eine entsprechende zweidimensionale Anordnung von Pixeln 28 verfügen, damit jeder Blendenöffnung 22‘‘ ein schaltbares Pixel zugeordnet ist. Auch das statische Raumfilter 44 und das Spektrometer 46 sind entsprechend zweidimensional zu erweitern, wie dies an sich im Stand der Technik bekannt ist.

Die Figur 6 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel für eine Messvorrichtung, die insgesamt mit 10‘ bezeichnet ist. Dieses Ausführungsbeispiel unterscheidet sich von der Vorrichtung 10 gemäß der Figur 1 vor allem in folgenden Punkten:

Zum einen wird als Lichtquelle 12 keine Superlumineszenzdiode, sondern ein Luminophor 52 verwendet, der im dargestellten Ausführungsbeispiel eine langgestreckte Lichtaustrittsfläche hat und von einer Pumpquelle 54 beleuchtet wird, bei der es sich z.B. um einen Laser handeln kann. Das aus der Lichtaustrittsfläche des Luminophors 52 austretende polychromatische Messlicht wird im dargestellten Ausführungsbeispiel zunächst kollimiert und dann mit Hilfe einer Zylinderlinse 55 in die Enden einer linearen Anordnung paralleler optischer Fasern 56 eingekoppelt. Mit dem Luminophor 52 lässt sich eine besondere hohe Lichtintensität erzielen. Bei einer Variante hat der Luminophor 52 eine runde oder quadratische Lichtaustrittsfläche. Die Enden der optischen Fasern 56 bilden dann keine linear Anordnung, sondern eine runde bzw. quadratische Anordnung; die Zylinderlinse 55 entfällt bei dieser Variante.

Das in den optischen Fasern 56 geführte Messlicht ML tritt an den gegenüberliegenden Enden der Fasern 56 aus. Diese Enden sind entlang einer senkrecht zur Papierebene verlaufenden Linie angeordnet und stellen gleichzeitig die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung 18 dar. Die Abbildungsoptik 24 bildet die Faserenden über einen planen Umlenkspiegel 58 auf ein schaltbares Raumfilter 26‘ ab, das im darstellten Ausführungsbeispiel als eindimensionales digitales Mikrospiegelarray (DMD, *digital micromirror device*) ausgebildet ist. Das Mikrospiegelarray erstreckt sich dabei senkrecht zur Papierebene der Figur 6.

Das statische Raumfilter 44 wird bei diesem Ausführungsbeispiel ebenfalls durch eine lineare Anordnung von Enden optischer Fasern 60 gebildet, wobei sich die Linie auch hier senkrecht zur Papierebene erstreckt. Die optischen Fasern 60 leiten das Messlicht an das Spektrometer 46.

In die optischen Fasern 56, 60 können optische Faserstecker 62, 62‘, 64, 64‘ integriert sein. Auf diese Weise können die mit gestrichelten Linien umrandeten Teile der Vorrichtung 10‘ in getrennten Gehäusen untergebracht sein, die einen mobilen Messkopf 66 und ein ortsfestes Steuergerät 68 bilden.

Die Figuren 7a und 7b illustrieren in an die Figuren 3a und 3b angelehnten Darstellungen die beiden Schaltkonfigurationen des reflektiven schaltbaren Raumfilters 26‘. Jedes Pixel 28 wird durch einen Mikrospiegel gebildet, der zwei stabile Schaltzustände einnehmen kann. Grau hinterlegte Pixel 28 befinden sich im zweiten Schaltzustand und reflektieren das auftreffende Messlicht ML so, dass es auf einen Absorber fällt. Die weiß hinterlegten Pixel 28 reflektieren das auftreffende Messlicht ML so, dass es über den Strahlteilerwürfel 33 in das Objektiv 36 eintreten kann.

Die Figur 8 illustriert in einer schematischen Darstellung ein Ausführungsbeispiel, bei dem die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung 18 durch eine lineare Anordnung von Mikrolinsen 70 gebildet wird. Die Lichtquelle umfasst eine Kollimatorlinse 72, die das Messlicht kollimiert auf die Mikrolinsen 70 richtet. Diese fokussieren das Messlicht ML jeweils auf ein zugeordnetes Pixel 28 des transmissiven schaltbaren Raumfilters 26. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist somit keine Abbildungsoptik 24 erforderlich. Da die Mikrolinsen 70 unmittelbar vor dem transmissiven schaltbaren Raumfilter 26 angeordnet sind, fällt die Ebene

E1 der Mikrolinsen 70 mit der Ebene E2 quasi zusammen, was einer optischen Konjugation entspricht. Die numerische Apertur NA der Mikrolinsen 70 ist dabei an die numerische Apertur NA des Objektivs 36 angepasst.

Die Figuren 9a und 9b illustrieren in an die Figuren 3a und 3b angelehnten schematischen Darstellungen weitere Möglichkeiten für mögliche Schaltkonfigurationen. Wenn die Bilder der Punktlichtquellen auf der Höhe des statischen Raumfilters 44 besonders groß sind, kann es dazu kommen, dass diese Bilder sich nicht nur über die unmittelbar benachbarten Blendenöffnungen 22‘ erstrecken, sondern über zwei oder sogar drei benachbarte Blendenöffnungen 22‘. In diesem Fall sollte die Messung auf nicht zur zwei, sondern drei oder mehr Einzelmessungen unterteilt werden, um ein optisches Übersprechen zu verhindern.

Bei den Figuren 9a und 9b wird unterstellt, dass insgesamt vier Einzelmessungen vorgesehen sind. Von vier entlang einer Richtung benachbarten Pixeln 28 befinden sich in jeder Schaltkonfigurationen daher immer nur eines im zweiten Schaltzustand, während sich die übrigen drei Pixel im ersten Schaltzustand befinden und das auftreffende Messlicht blockieren. Zwei der hintereinander einzustellenden vier Schaltkonfigurationen sind in den Figuren 9a und 9b gezeigt.

Die Figur 10 zeigt in einem Ausschnitt eine weitere Variante; die nicht in der Figur 10 dargestellten Teile der Vorrichtung 10 entsprechen denjenigen der Figur 1.

Bei dieser Variante ist im Lichtweg zwischen dem Strahlteilerwürfel 33 und dem Spektrografen 46 ein weiteres transmissives MEMS-Raumfilter 74 in einer vierten Ebene E4 angeordnet ist, die zu der ersten Ebene E1 und der zweiten Ebene E2 optisch konjugiert ist. Eine weitere Abbildungsoptik 75 bildet das weitere transmissive MEMS-Raumfilter 74 in der Ebene E4 auf das statische Raumfilter 44 in der Ebene E3 ab. Die Pixel des weiteren transmissiven MEMS-Raumfilters 74 haben ebenfalls die Eigenschaft, in einen ersten Schaltzustand, in dem das Pixel Messlicht ML blockiert, und in einen zweiten Schaltzustand überführbar zu sein, in dem das Pixel Messlicht ML nicht blockiert. Bei einer Variante entfällt das statische Raumfilter 44; in der Ebene E3 befindet sich dann der Eingangsschlitz des Spektrografen 46.

Ein solches weiteres transmissives MEMS-Raumfilter 74 ist dann vorteilhaft, wenn die Eingangskanäle im Spektrografen nicht individuell deaktiviert werden können und sich die Bilder der Punktlichtquellen trotz des vorne im Strahlengang angeordneten MEMS-Raumfilters 26 hinter dem Objektiv 34 teilweise auf dem statischen Raumfilter 44 überlappen würden. Das weitere transmissive MEMS-Raumfilter 74 „bereinigt" die Lichtverteilung und stellt auf diese Weise sicher, dass es nicht zu einem Überlapp der Bilder der Punktlichtquellen auf dem statischen Raumfilter 44 kommt. Die Schaltkonfigurationen des weiteren transmissiven MEMS-Raumfilters 74 sind dabei stets an die Schaltkonfigurationen des vorderen transmissiven MEMS-Raumfilters 26 angepasst.

Wenn der Spektrograf hingegen über individuell deaktivierbare Eingangskanälen verfügt, kann auf das weitere MEMS-Raumfilter 74 verzichtet werden.

Die Figur 11 zeigt in einer an die Figur 1 angelehnten Darstellung ein zweites Ausführungsbeispiel für eine Messvorrichtung, die insgesamt mit 10'' bezeichnet ist. Während bei den zuvor beschriebenen Ausführungsbeispielen das pixelweise digital schaltbare Raumfilter 26, 26' eine von der Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung 18 unabhängige Baugruppe ist, bildet bei der Vorrichtung 10'' das pixelweise digital schaltbare Raumfilter 26'' die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung 18. Dadurch wird keine separate Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung benötigt, mit der Folge, dass keine Abbildungsoptik erforderlich ist, die eine Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung auf das pixelweise digital schaltbare Raumfilter 26'' abbildet.

Bei der Vorrichtung 10'' wird im dargestellten Ausführungsbeispiel das von der Lichtquelle 14 erzeugte Messlicht ML von einer Sammellinse 16 zunächst kollimiert. Eine weitere Sammellinse 16' bündelt das Messlicht ML so, dass es gerade noch vollständig das pixelweise digital schaltbare Raumfilter 26'' ausleuchtet. In der Figur 11 ist unterstellt, dass das pixelweise digital schaltbare Raumfilter 26'' quadratisch ist und ein kreisförmig begrenzter Bereich von dem Messlicht ML beleuchtet wird. Bei einem linearen, d.h. sich nur entlang einer Richtung erstreckenden, pixelweise digital schaltbaren Raumfilter kann die Sammellinse 16' als Zylinderlinse oder als ein anderes anamophotisches optisches Element ausgebildet sein, das entlang orthogonaler Richtungen eine unterschiedliche Brechkraft hat. Auf

diese Weise kann das lineare Raumfilter streifenförmig beleuchtet werden, um Lichtverluste zu minimieren. Alternativ kann eine Lichtquelle mit länglicher Austrittsfläche verwendet werden, welche auf den linearen pixelweise digital schaltbaren Raumfilter abgebildet wird und diesen entsprechend ausleuchtet.

PATENTANSPRÜCHE

1. Vorrichtung zur chromatisch konfokalen Messung von Abständen zu mehreren Punkten auf einer Oberfläche (38) eines Objekts (40), die zumindest teilweise auftreffendes Messlicht (ML) reflektiert, mit:

   a) einer Lichtquelle (12), die dazu eingerichtet ist, polychromatisches Messlicht (ML) zu erzeugen,

   b) einer Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung (18), die dazu eingerichtet ist, aus dem Messlicht ein Lichtmuster zu erzeugen, das sich in einer ersten Ebene (E1) entlang einer Dimension oder entlang zweier Dimensionen erstreckt,

   c) ein chromatisch unkorrigiertes Objektiv (36), das dazu eingerichtet ist, Bilder des Lichtmusters in Bildebenen (B1, B2, B3) zu erzeugen, deren axiale Position aufgrund chromatischer Längsaberration wellenlängenabhängig ist,

   d) einem statischen Raumfilter (44), das in einer zweiten Ebene (E3) angeordnet ist und eine dem Lichtmuster entsprechende Filterfunktion hat, wobei die zweite Ebene (E2) optisch konjugiert zu der ersten Ebene (E1) ist,

   e) einem Strahlteilerwürfel (33), der im Lichtweg zwischen der Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung (18) und dem Objektiv (36) angeordnet ist und Messlicht (ML), das von der Oberfläche (38) reflektiert wurde und das Objektiv (36) durchtreten hat, dem statischen Raumfilter (44) zuleitet,

   f) einem Spektrometer (46) mit mehreren Eingangskanälen, die jeweils dazu eingerichtet sind, reflektiertes Messlicht, das einen dem jeweiligen Eingangskanal zugeordneten Punkt des statischen Raumfilters (44) durchtreten hat, spektral zu analysieren, und mit

   g) einer Auswerteeinrichtung (30), die dazu eingerichtet ist, aus von dem Spektrometer (46) gemessenen Wellenlängen Abstände von Punkten auf der Oberfläche (38) zu der Vorrichtung (10; 10') zu berechnen,

gekennzeichnet durch

ein pixelweise digital schaltbares Raumfilter (26; 26'; 26''), das mehrere Pixel (28) aufweist und entweder die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung (18) bildet oder in einer dritten Ebene (E2) angeordnet ist, die zu der ersten Ebene (E1) und der zweiten Ebene (E3) optisch konjugiert ist, wobei jedes Pixel (28) in einen ersten Schaltzustand, in dem das Pixel (28) Messlicht (ML) blockiert, und in einen zweiten Schaltzustand überführbar ist, in dem das Pixel (28) Messlicht (ML) nicht blockiert.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das pixelweise digital schaltbare Raumfilter (26; 26'; 26'') bei einer Messung zwischen einer ersten Schaltkonfiguration und einer zweiten Schaltkonfiguration wechselt, wobei in der ersten Schaltkonfiguration keine zwei benachbarten Pixel (28) im gleichen Schaltzustand sind, und wobei die zweite Schaltkonfiguration komplementär zu der ersten Schaltkonfiguration ist.

3. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das pixelweise digital schaltbare Raumfilter (26'') die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung (18) bildet, und dass sich das Messlicht (ML) zwischen der Lichtquelle (14) und dem pixelweise digital schaltbare Raumfilter (26'') als Freistrahl ausbreitet.

4. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das pixelweise digital schaltbare Raumfilter (26; 26') unabhängig von der Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung (18) und in der dritten Ebene (E2) angeordnet ist.

5. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass sich das pixelweise digital schaltbare Raumfilter (26; 26') im Lichtweg zwischen der Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung (18) und dem Strahlteilerwürfel (33) befindet.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung (10; 10') eine Abbildungsoptik (24) aufweist, welche die erste Ebene (E1) auf die dritte Ebene (E2) abbildet.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Lichtmuster mehrere zweidimensional verteilte Lichtpunkte (22; 22'') oder mindestens eine kontinuierliche oder aus Lichtpunkten zusammengesetzte Lichtlinie (20; 22') umfasst.

8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung (18) eine Anordnung von Enden optischer Fasern (56) umfasst.

9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung (18) eine Blende (20; 20'; 20'') mit mindestens einer Öffnung (22; 22', 22'') umfasst.

10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung (18) eine ebene Anordnung von Mikro-Sammellinsen (70) umfasst.

11. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass im Lichtweg zwischen der Lichtmuster-Erzeugungseinrichtung (18) und dem Strahlteilerwürfel (33) ein Kollimator (32) angeordnet ist, der in den Strahlteilerwürfel (33) eintretendes Messlicht (ML) kollimiert.

12. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das pixelweise digital schaltbare Raumfilter (26') ein Mikrospiegel-Array ist.

13. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die polychromatische Lichtquelle (12) einen Luminophor (52) enthält.

14. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Spektrometer (46) mit dem pixelweise digital schaltbaren Raumfilter (26; 26'; 26'') derart synchronisiert ist, dass Eingangskanäle, die Pixeln (28) im zweiten Schaltzustand zugeordnet sind, deaktiviert sind.

15. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

das pixelweise digital schaltbares Raumfilter (26; 26‘; 26‘‘) im Lichtweg zwischen der Lichtquelle (14) und dem Strahlteilerwürfel (33) angeordnet ist,

ein weiteres pixelweise digital schaltbares Raumfilter (74) im Lichtweg zwischen dem Strahlteilerwürfel (33) und dem Spektrometer (46) in einer vierten Ebene (E4) angeordnet ist, die zu der ersten Ebene (E1) und der zweiten Ebene (E2) optisch konjugiert ist, und dass

jedes Pixel des weiteren pixelweise digital schaltbaren Raumfilters (74) in einen ersten Schaltzustand, in dem das Pixel Messlicht (ML) blockiert, und in einen zweiten Schaltzustand überführbar ist, in dem das Pixel Messlicht (ML) nicht blockiert.

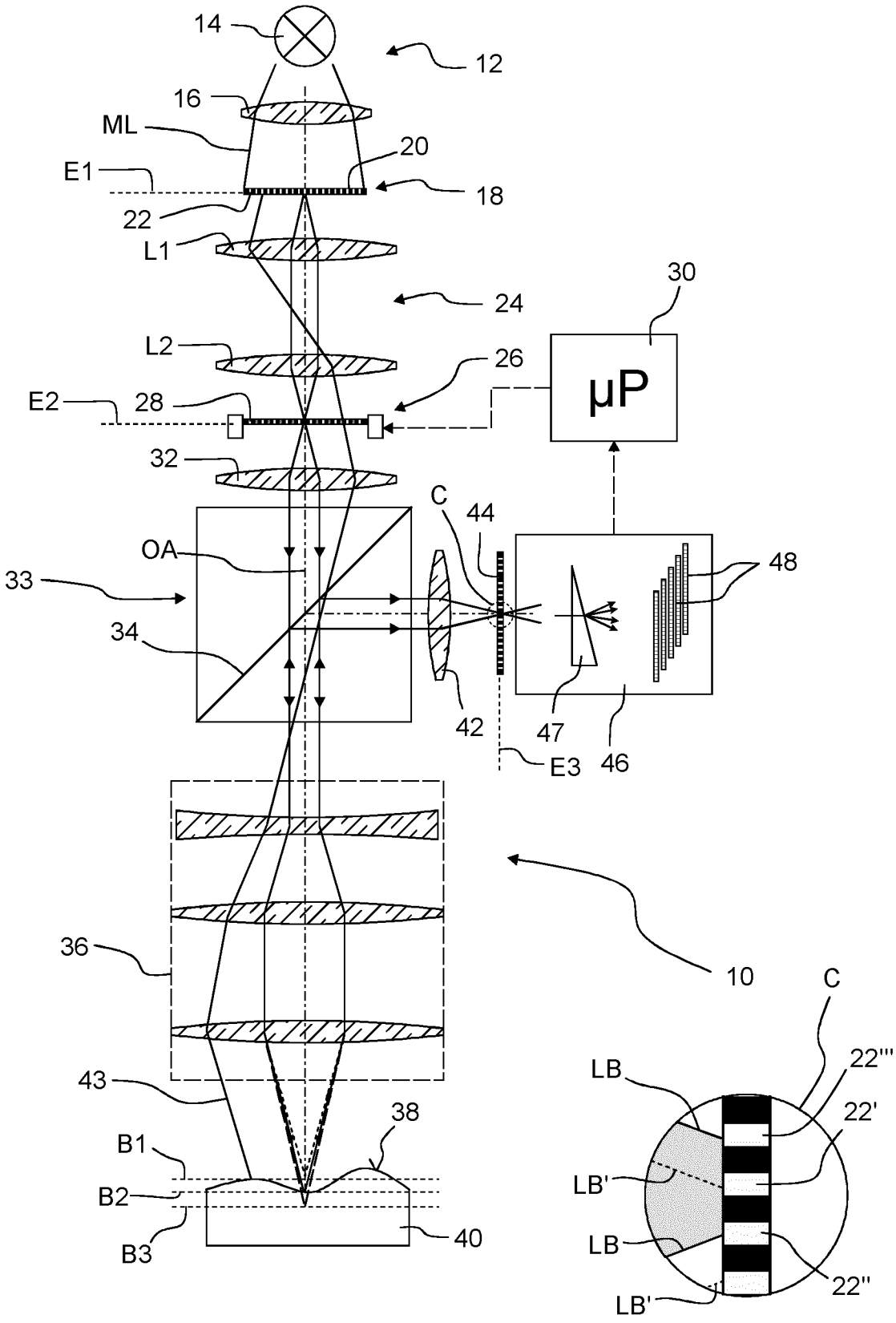

14
12
16
ML
20
E1
18
22
L1
30
24
L2
26
μP
E2
28
32
C
44
OA
48
33
34
42
47
46
E3
36
10
C
22'''
LB
22'
43
38
LB'
B1
B2
LB
22''
B3
40
LB'

Fig. 1

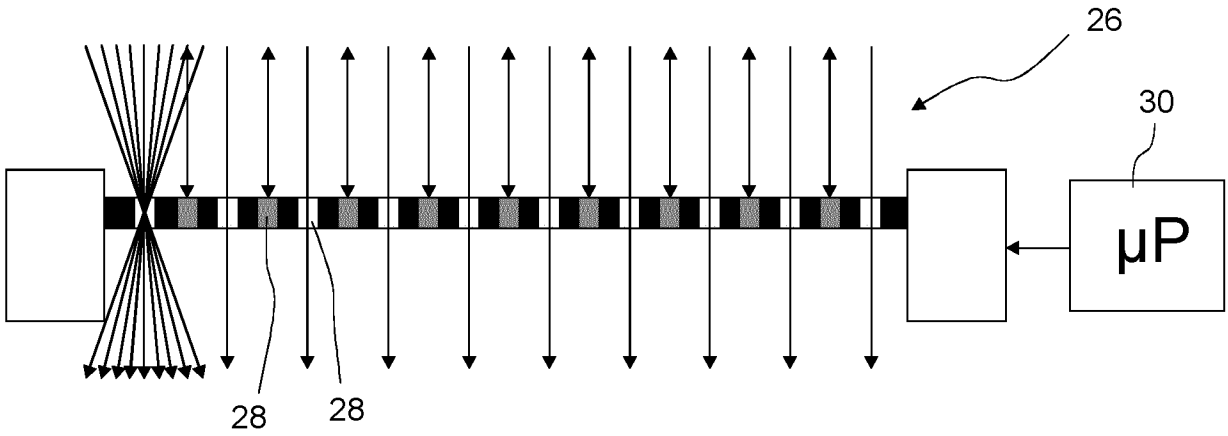


Fig. 3a

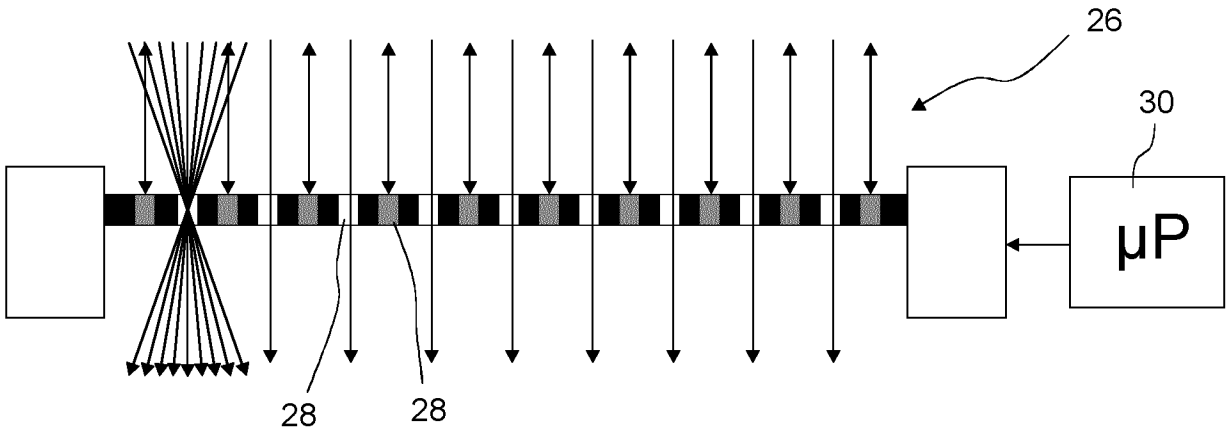


Fig. 3b

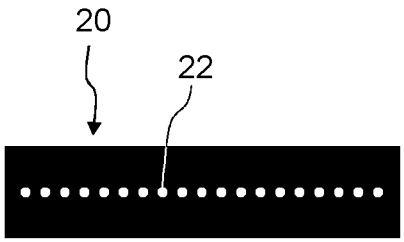


Fig. 2

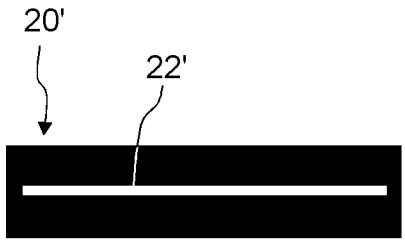


Fig. 4

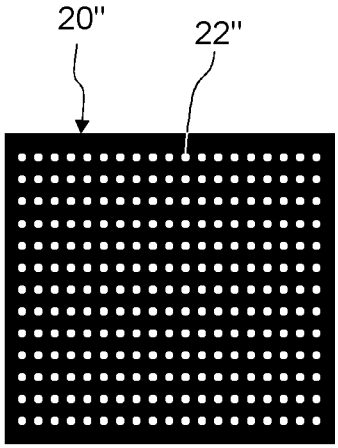


Fig. 5

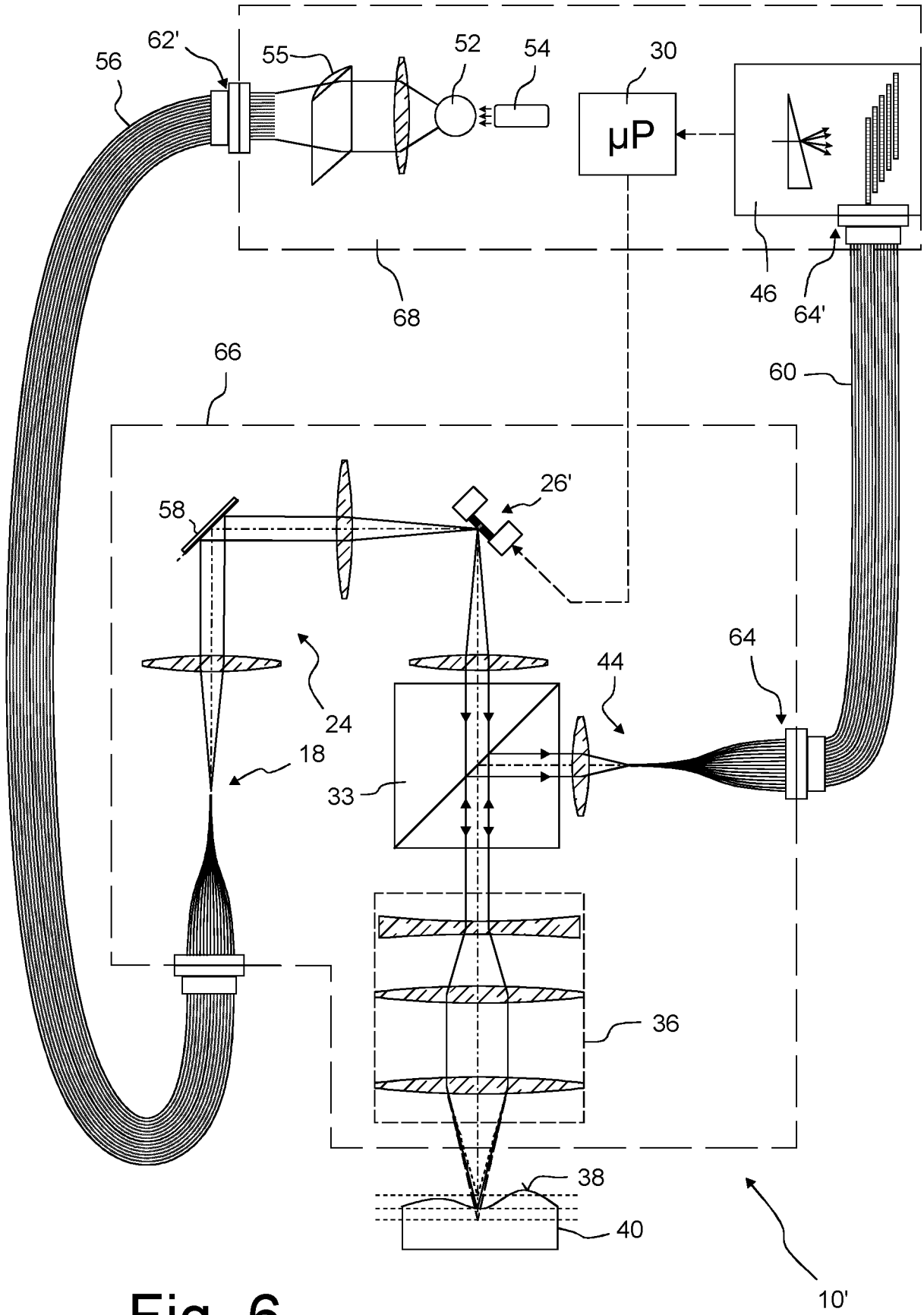


Fig. 6

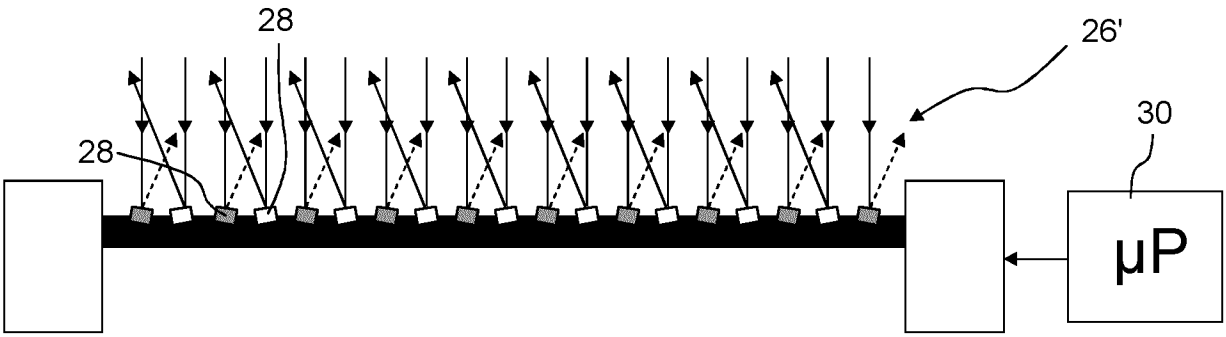


Fig. 7a

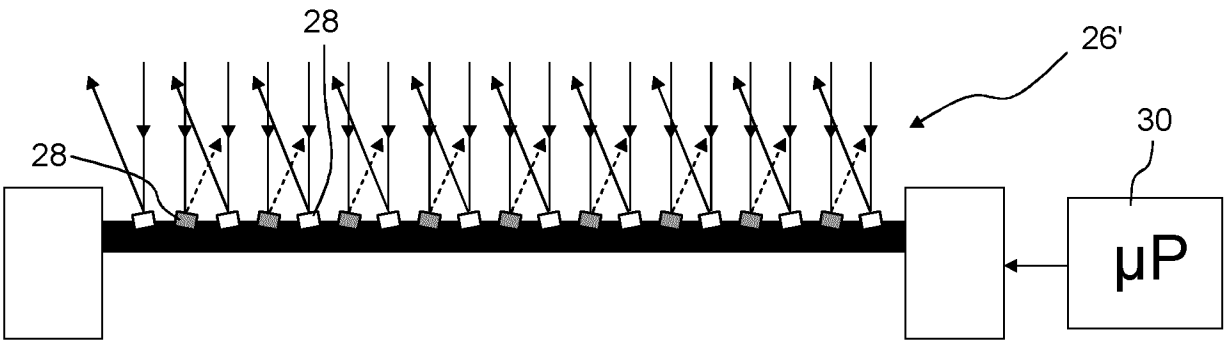


Fig. 7b

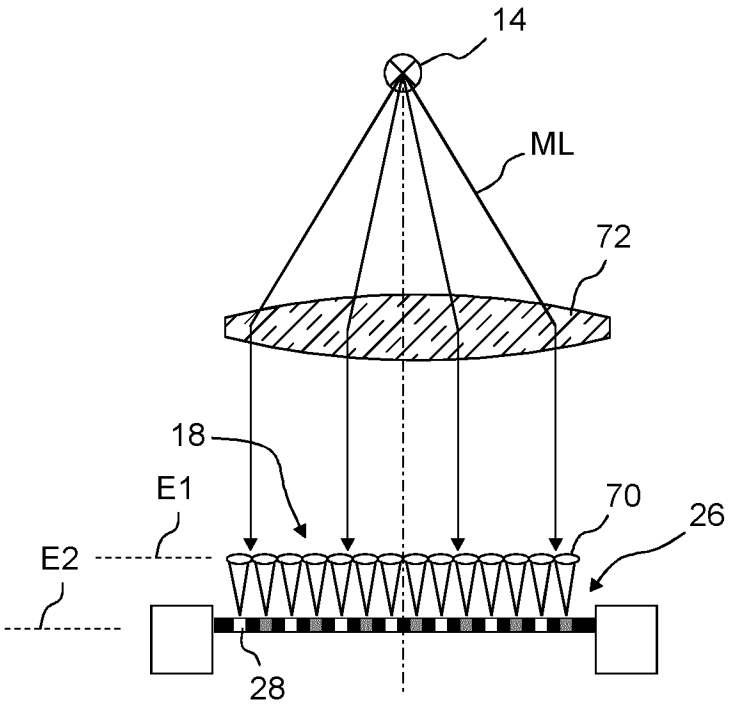


Fig. 8

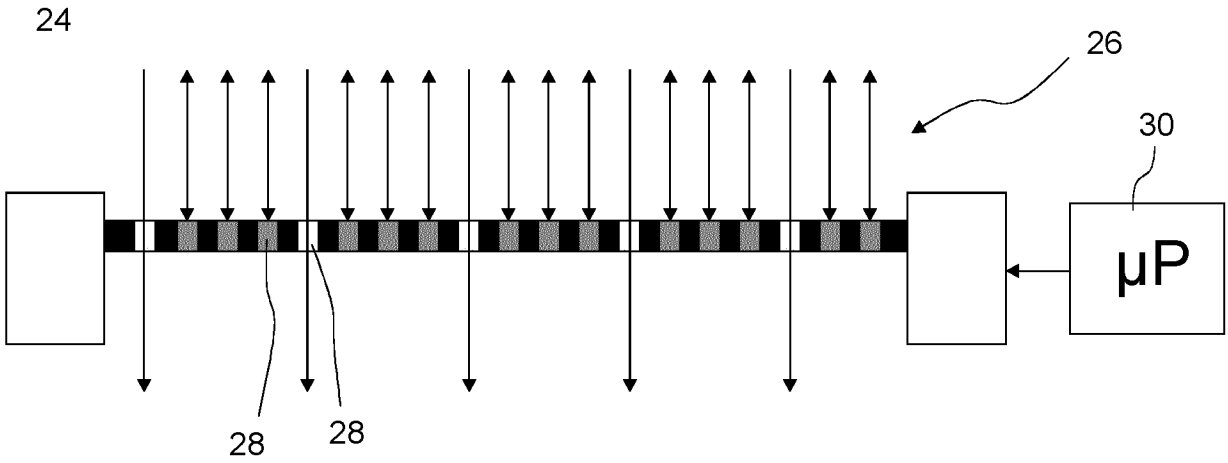


Fig. 9a

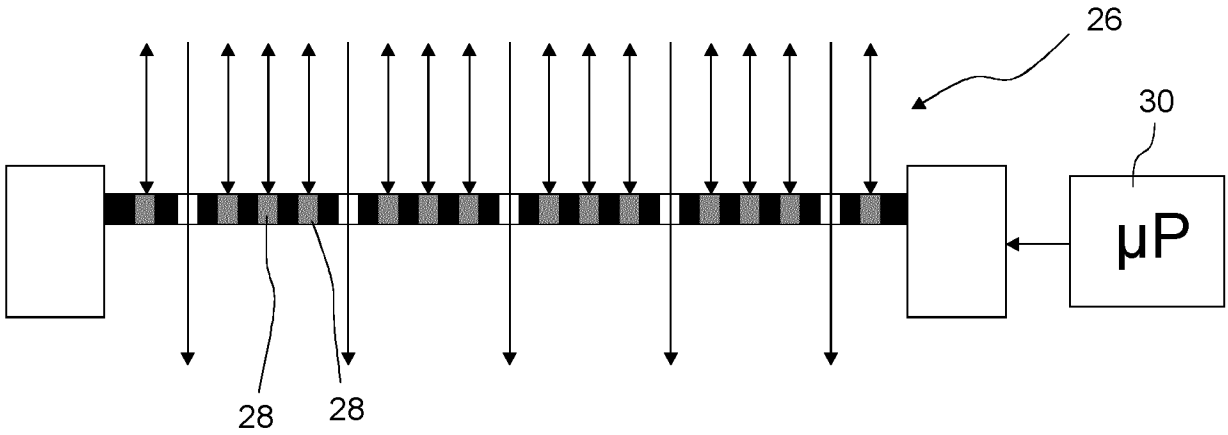


Fig. 9b

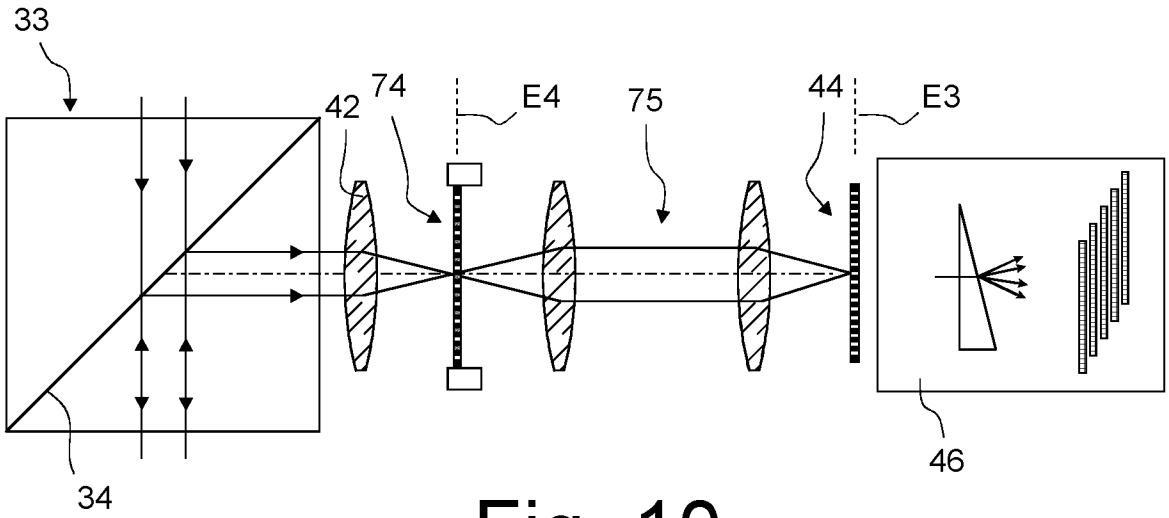


Fig. 10

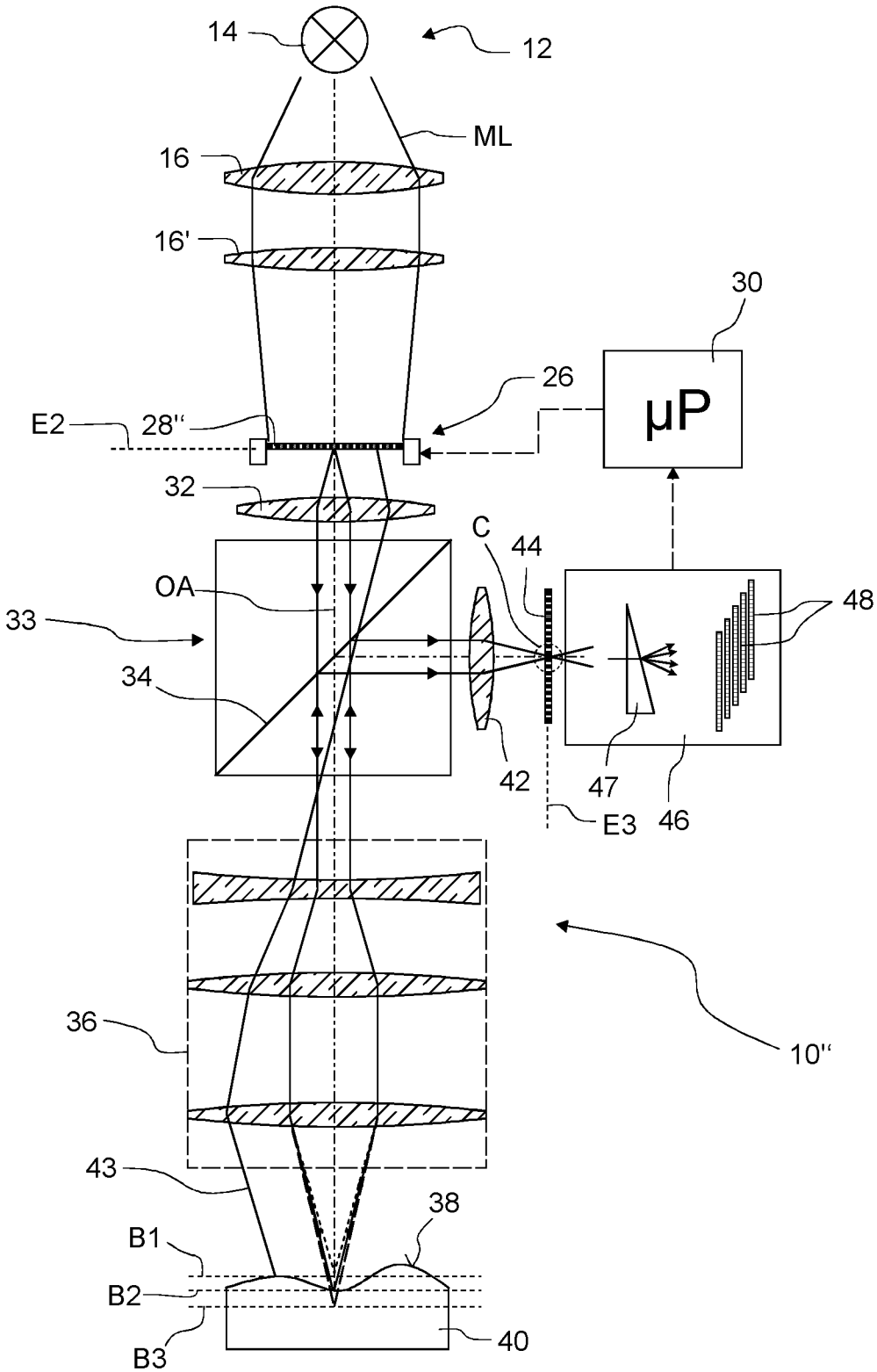

14
12
ML
16
16'
30
26
μP
E2
28''
32
C
44
OA
48
33
34
42
47
46
E3
36
10''
43
38
B1
B2
B3
40

Fig. 11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2023/067657

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01B 11/24(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2006012781 A1 (FRADKIN KEREN [IL] ET AL) 19 January 2006 (2006-01-19)	1,3-15
A	paragraphs [0020] - [0033]; figures 1-2	2
Y	DE 102019001498 A1 (PRECITEC OPTRONIK GMBH [DE]) 10 September 2020 (2020-09-10)	1,3-15
A	paragraphs [0054] - [0082]; figures 1-4	2
Y	US 2020363619 A1 (NIKITIN VLADISLAV [HK] ET AL) 19 November 2020 (2020-11-19) cited in the application	1,3-15
A	claim 1; figure 1	2

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
13 September 2023	**22 September 2023**

Name and mailing address of the ISA/EP	Authorized officer
European Patent Office **p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk** **Netherlands** Telephone No. **(+31-70)340-2040** Facsimile No. **(+31-70)340-3016**	**Trique, Michael** Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/EP2023/067657

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US 2006012781 A1	19 January 2006	NONE	
DE 102019001498 A1	10 September 2020	NONE	
US 2020363619 A1	19 November 2020	US 2020363619 A1	19 November 2020
		WO 2020232739 A1	26 November 2020

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2023/067657

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G01B11/24
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G01B

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2006/012781 A1 (FRADKIN KEREN [IL] ET AL) 19. Januar 2006 (2006-01-19)	1,3-15
A	Absätze [0020] - [0033]; Abbildungen 1-2	2
Y	DE 10 2019 001498 A1 (PRECITEC OPTRONIK GMBH [DE]) 10. September 2020 (2020-09-10)	1,3-15
A	Absätze [0054] - [0082]; Abbildungen 1-4	2
Y	US 2020/363619 A1 (NIKITIN VLADISLAV [HK] ET AL) 19. November 2020 (2020-11-19) in der Anmeldung erwähnt	1,3-15
A	Anspruch 1; Abbildung 1	2

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung;; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung;; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
13. September 2023	22/09/2023

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde	Bevollmächtigter Bediensteter
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Trique, Michael

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2023/067657

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2006012781 A1	19-01-2006	KEINE	
DE 102019001498 A1	10-09-2020	KEINE	
US 2020363619 A1	19-11-2020	US 2020363619 A1	19-11-2020
		WO 2020232739 A1	26-11-2020