PCT

WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales Büro

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

(51) Internationale Patentklassifikation 4 : G01B 11/00

A2

(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 85/ 01793

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 25. April 1985 (25.04.85)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP84/00317

(22) Internationales Anmeldedatum: 12. Oktober 1984 (12.10.84)

(31) Prioritätsaktenzeichen: P 33 37 251.9

(32) Prioritätsdatum: 13. Oktober 1983 (13.10.83)

(33) Prioritätsland: DE

(71)(72) Anmelder und Erfinder: HÄUSLER, Gerd [DE/DE]; Alterlanger Strasse 33, D-8520 Erlangen (DE). MAUL, Manfred [DE/DE]; Haagstr. 19, D-8520 Erlangen (DE).

(74) Anwalt: WEBER, O., E.; Hofbrunn Str. 47, D-8000 München 71 (DE).

(81) Bestimmungsstaaten: AT (europäisches Patent), CH (europäisches Patent), DE (europäisches Patent), FR (europäisches Patent), GB (europäisches Patent), JP, NL (europäisches Patent), SE (europäisches Patent), US.

Veröffentlicht

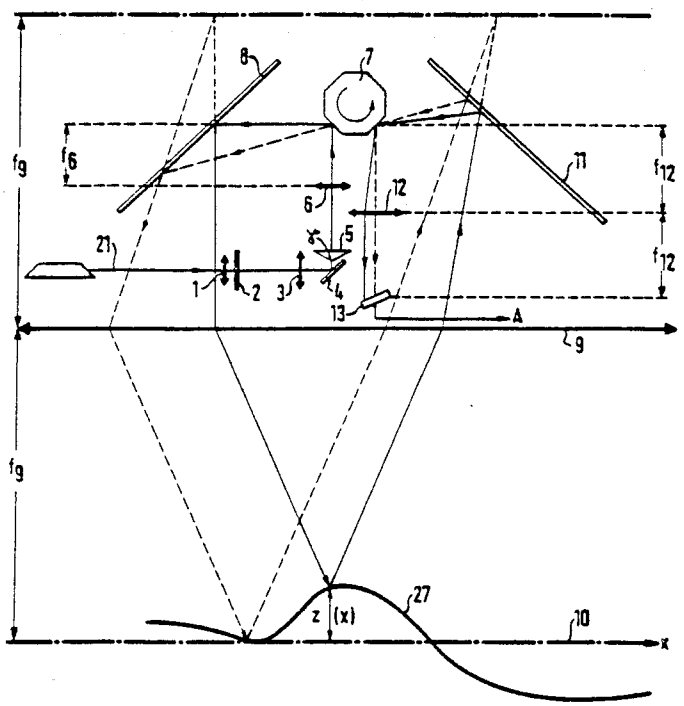
Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.

(54) Title: METHOD AND INSTALLATION FOR THE MULTIDIMENSIONAL MEASUREMENT OF AN OBJECT

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR MEHRDIMENSIONALEN VERMESSUNG EINES OBJEKTES

(57) Abstract

The present invention relates particularly to an optical process with series detection of measurement. In such process and installations, an important disadvantage is mainly the fact that a very large number of receiver elements must be used, which exceeds by far the capacity as presently with electronic apparatus. For large tridimensional objects, another problem is to obtain a good resolution particularly for the third dimension, for example the height. The present invention provides a remedy to these problems by deflecting the lighting and representation light beam. Said deflection is effected so that, with respect to a defined reference object, it is possible to compensate for the displacement of the light beam in a direction corresponding usually to a co-ordinate axis. What is required is a receiver line or a unidimensional direction of receivers to obtain a high measurement dynamic, since all the receiver elements are at disposal to detect the differences of the object to be measured on one co-ordinate axis or in the direction of the axis of the lighting light beam.



(57) Zusammenfassung Speziell bezieht sich die Erfindung auf optische Verfahren mit serieller Erfassung der Vermessungspunkte. Bei derartigen Verfahren und Vorrichtungen ist ein gravierender Nachteil vor allen Dingen darin zu sehen, dass eine extrem hohe Anzahl von Empfängerelementen verwendet werden muss, die die bisher bekannte Kapazität elektronischer Apparaturen weit übersteigt. Als weiteres Problem ist bei grossen dreidimensionalen Objekten keine hohe Auflösung insbesondere in der dritten Dimension, z.B. der Höhe, erreichbar. Diese Probleme werden bei der Erfindung dadurch gelöst, dass das Beleuchtungs- und Abbildungslichtbündel abgelenkt wird. Hierbei erfolgt diese Ablenkung so gekoppelt, dass bezüglich eines definierten Referenzobjektes die Verschiebung der Beleuchtungslichtbündel in einer Richtung, die üblicherweise einer Koordinatenrichtung entspricht, kompensiert werden kann. Hierdurch genügt bereits eine Empfängerlinie oder eine eindimensionale Empfängereinrichtung, um eine hohe Messdynamik zu erreichen, da sämtliche Empfängerelemente zur Erfassung der Abweichungen des zu vermessenden Objektes in einer Koordinatenrichtung bzw. in der Richtung der Achse des Beleuchtungslichtbündels zur Verfügung stehen.

LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Code, die zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AT	Österreich	**KR**	Republik Korea
AU	Australien	**LI**	Liechtenstein
BE	Belgien	**LK**	Sri Lanka
BG	Bulgarien	**LU**	Luxemburg
BR	Brasilien	**MC**	Monaco
CF	Zentrale Afrikanische Republik	**MG**	Madagaskar
CG	Kongo	**MR**	Mauritanien
CH	Schweiz	**MW**	Malawi
CM	Kamerun	**NL**	Niederlande
DE	Deutschland, Bundesrepublik	**NO**	Norwegen
DK	Dänemark	**RO**	Rumänien
FI	Finnland	**SD**	Sudan
FR	Frankreich	**SE**	Schweden
GA	Gabun	**SN**	Senegal
GB	Vereinigtes Königreich	**SU**	Soviet Union
HU	Ungarn	**TD**	Tschad
JP	Japan	**TG**	Togo
KP	Demokratische Volksrepublik Korea	**US**	Vereinigte Staaten von Amerika

Bei einem ersten Verfahren wird der Meßkopf der Form des zu vermessenden Objektes punktweise in den drei Dimensionen x,y und z nachgeführt. Die optische Empfängereinrichtung dient nur dazu, einen konstanten Abstand zwischen dem Meßkopf und der Fläche des zu vermessenden Objektes einzustellen (vergleiche dazu "Technische Anwendungen des Lasers", Herausgeber D. Rosenberger, Springer Verlag 1975, Seite 60). Bei diesem ersten Verfahren wird aus dem jeweiligen Ort des Meßkopfes die Form des Objektes abgeleitet, wobei im Prinzip nur ein einzelnes Empfängerelement benötigt wird.

Ebenfalls aus Rosenberger (vergleiche a.a.O., Seite 62) ist ein zweites Verfahren bekannt. Bei diesem zweiten Verfahren wird der Meßkopf in zwei Koordinaten x,y über das Objekt bewegt und die Höheninformation z aus der Lage des Bildpunktes auf der eindimensionalen Empfängereinrichtung bestimmt. Die Anzahl der benötigten Empfängerelemente bzw. Auflösungszellen der Empfängereinrichtung ist dabei gleich der Anzahl der zu unterscheidenden Höhenstufen. Ein derartiges, zweites Verfahren ist auch der "Produktinformation der Firma Selcom, Bruchfeld 100, 4150 Krefeld 12"zum Gerät "Optocator" zu entnehmen.

Bei einem weiteren bekannten Verfahren, dem dritten Verfahren, wird auf dem zu vermessenden Objekt mittels eines Spiegels, eines akustooptischen Ablenkers oder einer ähnlichen Einrichtung, ein Beleuchtungslichtbündel abgelenkt, so daß in einer Zeile, z.B. in x-Richtung, sequentiell ein Beleuchtungsfleck oder Lichtfleck auf dem Objekt erzeugt wird. Hierbei wird die Lage des Beleuchtungsfleckes auf dem Objekt

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Verfahren und Vorrichtung zur mehrdimensionalen Vermessung eines Objektes.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur mehrdimensionalen Vermessung eines Objektes gemäß Oberbegriff des Anspruches 1 und eine Vorrichtung zur mehrdimensionalen Vermessung eines Objektes gemäß Oberbegriff des Anspruches 7.

Insbesondere betrifft die Erfindung ein Verfahren und eine Vorrichtung zur zweidimensionalen Vermessung eines Objektes, wobei durch eine Verschiebung des Objektes in der dritten Koordinatenrichtung oder durch die Vermessung des Objektes mittels des Verfahrens und der Vorrichtung auch in der dritten Koordinatenrichtung und parallel dazu, das Objekt dreidimensional vermessen werden kann.

Bekannte Verfahren dieser Art beruhen auf der Triangulationsmethode, bei der z.B. das Objekt optisch vermessen werden kann, indem ein schmales Lichtbündel oder eine Linie auf das Objekt projiziert wird und die Position des Beleuchtungslichtfleckes oder der Beleuchtungslinie auf dem zu vermessenden Objekt mit Hilfe einer Empfängereinrichtung bestimmt wird. Zur Bestimmung der räumlichen Lage des Beleuchtungslichtfleckes auf dem Objekt wird dabei die Beleuchtungsrichtung, also die Richtung der Achse des Beleuchtungslichtbündels, und der Ausgangspunkt des Beleuchtungslichtbündels mitberücksichtigt. Obwohl das Verfahren und die Vorrichtung nachstehend als optische Verfahren und Vorrichtung unter Bezugnahme auf eine weitgehende kohärente Strahlung eines Lichtbündels beschrieben wird, stellt dies keine Einschränkung des Verfahrens und der Vorrichtung dar. Vielmehr ist das Prinzip des Verfahrens und der Vorrichtung auch auf andere Strahlungsarten, z.B. eine Elektronenstrahlung, übertragbar.

Im Stande der Technik sind mehrere Verfahren bekannt, die im folgenden nach der zunehmenden Anzahl von Empfängerelementen bzw. Auflösungszellen der Empfängereinrichtung und gleichzeitig nach zunehmender Schnelligkeit der Vermessung geordnet sind.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Speziell bei größeren Objekten mit Abmessungen von z.B. 2 m x 2m x 2 m, weisen die vorausgehend aufgeführten vier Verfahren Nachteile auf. Sofern man eine große Auflösung erzielen will, muß der das zu vermessende Objekt abtastende Beleuchtungsfleck klein sein. Bei einem kleinen Durchmesser d des Beleuchtungsfleckes benötigt man jedoch eine große Abbildungsapertur u, wobei hierfür die Beziehung gilt

$$d = \frac{\lambda}{\sin u} .$$

Dies schränkt jedoch den Höhenmeßbereich h, z.B. in z-Richtung, ein, denn die Schärfentiefe Δz der Abbildung ist

$$\Delta z = \frac{\lambda}{\sin^2 u} ,$$

wobei gelten muß $h \lesssim \Delta z$. Fordert man z.B. einen Durchmesser des Beleuchtungsfleckes von d = o,1 mm, so liegt der Höhenmeßbereich h bei ungefähr 20 mm. Diese Einschränkungen und Nachteile gelten sowohl im Beleuchtungsbereich wie auch im Abbildungsbereich, wobei im Abbildungsbereich die räumliche Lage des Beleuchtungsfleckes auf dem zu vermessenden Objekt bestimmt wird. Durch eine entsprechende Verarbeitung der Abbildung , z.B. durch eine Schwerpunktsbestimmung des Beleuchtungsfleckes auf der Empfängereinrichtung, läßt sich der Höhenmeßbereich erweitern. Allerdings sind hier durch den erforderlichen Aufwand Grenzen gesetzt. Aus diesem Grunde sind das bekannte zweite, dritte und vierte Verfahren auf Objekte mit geringen Höhenschwankungen beschränkt. Dies gilt vor allen Dingen dann, wenn man eine hohe Auflösung in Abtastrichtung erreichen will.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

von einem in der durch die Beleuchtungsrichtung und die Abtasteinrichtung aufgespannte Ebene angebrachten eindimensionalen Empfänger bestimmt. Die Höheninformation, z.B. in der z-Richtung, ergibt sich aus der Vor- bzw. Nacheilung der Abbildung des Beleuchtungsfleckes auf dem Empfänger. Bei diesem dritten Verfahren ist die Anzahl der benötigten Empfängerelemente bzw. Auflösungszellen der Empfängereinrichtung gleich der Anzahl der auf dem Objekt in Zeilenrichtung aufzulösenden Punkte, wobei dazu im allgemeinen die gewünschte Anzahl der zu unterscheidenden Höhenstufen addiert werden muß. Die Abtastung bzw. Vermessung in der verbleibenden Richtung, z.B. der y-Richtung, kann dabei durch mechanische Verschiebung des Objektes oder des Meßkopfes erfolgen.

Bei einem vierten bekannten Verfahren wird mit einem schnell rotierenden Spiegelrad, einem akustooptischen Ablenker oder einer ähnlichen Einrichtung, z.B. in x-Richtung, eine Konturlinie erzeugt, die im allgemeinen senkrecht zur Beleuchtungs- und Abtastrichtung mit einem zweidimensionalen Empfänger betrachtet wird. Als zweidimensionaler Empfänger kann z.B. eine Fernsehkamera dienen. Diese vierte Art des Verfahrens ist als Lichtschnittverfahren bekannt. Hierbei ist die Anzahl der benötigten Empfängerelemente gleich dem Produkt aus den zu unterscheidenden Ortselementen in Abtastrichtung und der Anzahl der zu unterscheidenden Höhenstufen. Bei diesem vierten Verfahren kann z.B. die Vermessung in der weiteren dritten Dimension, z.B. der y-Richtung, durch mechanisches Verschieben des Objektes realisiert werden.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

relativ schnelle Vermessung des Objektes bei großer räumlicher Auflösung mit einer relativ geringen Anzahl von Empfängerelementen erreichbar ist.

Diese Aufgabe wird bei einem gattungsgemäßen Verfahren erfindungsgemäß durch die Merkmale des kennzeichnenden Teils des Anspruches 1 und bei einer gattungsgemäßen Vorrichtung erfindungsgemäß durch die Merkmale des kennzeichnenden Teils des Anspruches 7 gelöst.

Der essentielle Erfindungsgedanke kann darin gesehen werden, daß bei einer zweidimensionalen Vermessung eines Objektes z.B. längs der x-Achse, vereinfacht ausgedrückt, die Verschiebung der auf dem zu vermessenden Objekt entstehenden Beleuchtungsflecke nicht oder zumindest nicht ausschließlich durch die Empfängerelemente erfaßt wird, sondern diese Verschiebung längs der x-Achse kompensiert wird, so daß die gesamte Anzahl der zur Verfügung stehenden Empfängerelemente zur Erfassung der Veränderung des Objektes längs dieser abgetasteten x-Richtung ausgenutzt werden kann. Dies bringt den wesentlichen Vorteil, daß bei gleicher Anzahl der im Stand der Technik und in der Erfindung zur Verfügung stehenden Empfängerelemente eine wesentlich bessere Auflösung der Veränderung des Objektes, z.B. der Höhenerfassung des Objektes in z-Richtung, mit gleicher lateraler Auflösung durchgeführt werden kann. Die Kompensation der Verschiebung in der Abtastrichtung, die als Spur der Durchstoßpunkte einer Folge von Beleuchtungslichtbündeln mit der Oberfläche des zu vermessenden Objektes definiert sein soll, wird dadurch erreicht, daß das zur Abbildung verwendete Abbildungslichtbündel zum entsprechenden Beleuchtungslichtbündel so gekoppelt abgelenkt wird, daß bei einer zweidimensionalen Vermessung, z.B. z(x), eine Verschiebung des Beleuchtungsfleckes in der

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Der weitere und ganz gravierende Nachteil besteht vor allen Dingen beim dritten und vierten Verfahren darin, daß bei einer Vermessung des Objektes mit hoher räumlicher Auflösung, die Anzahl der Empfängerelemente bzw. Auflösungszellen in der Empfängereinrichtung außerordentlich groß sein muß. Bei den bekannten ersten und zweiten Verfahren wäre zwar die Anzahl der benötigten Empfängerelemente bzw. Auflösungszellen geringer. Diese Verfahren eins und zwei sind jedoch wegen der zur Abtastung erforderlichen mechanischen Bewegung in mehreren Richtungen wesentlich langsamer.

Dieses Problem, eine hohe räumliche Auflösung über einen großen Meßbereich zu erreichen oder anders ausgedrückt, bei einer vorgegebenen Anzahl von Empfängerelementen und hoher Auflösung einen großen Meßbereich erfassen zu können, wird nachstehend kurz mit Meßdynamik umrissen. Der Stand der Technik gestattet es etwa eine im wesentlichen eindimensional angeordnete Empfängereinrichtung mit ca. 4000 Empfängerelementen auszulegen. Bei der Anwendung der vorausgehend beschriebenen Verfahren werden jedoch diese Elemente nicht optimal genutzt, da ein wesentlicher Teil dieser Empfängerelemente zur Bestimmung der Koordinaten des abzutastenden Objektes in der Abtast- bzw. Verschieberichtung der Beleuchtungslichtbündel benötigt wird. Hierdurch steht nur noch ein geringer Teil der Empfängerelemente für die Auflösung in der Höhenrichtung des Objektes, die im allgemeinen senkrecht zur Abtastrichtung des Objektes definiert werden kann, zur Verfügung.

Ausgehend von diesen Nachteilen liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur mehrdimensionalen Vermessung von insbesondere großen Objekten auf der Basis der Triangulationsmethode so auszulegen, daß eine zeitlich

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

ist konstant und kann sowohl Null als auch von Null verschieden sein. Alle auf dem tatsächlich zu vermessenden Objekt liegenden Beleuchtungsflecke werden dagegen in einem Winkel zur optischen Achse in der Empfängereinrichtung abgebildet, der variieren kann. Aus der Winkeldifferenz des jeweiligen Winkels mit dem Referenzwinkel kann dann in der Auswerteinrichtung die Abweichung des zu vermessenden Objektes in der entsprechenden Beleuchtungsrichtung des Beleuchtungslichtbündels gegenüber dem Referenzobjekt ermittelt werden. Aus dieser Abweichung und der Beleuchtungsrichtung bzw. dem Ablenkungswinkel des Beleuchtungslichtbündels und/oder des Abbildungslichtbündels, kann dann die räumliche Lage des entsprechenden Beleuchtungsfleckes auf dem zu vermessenden Objekt im xyz-Koordinaten-System berechnet werden. Unter Beleuchtungsrichtung wird hierbei die Richtung der Achse des jeweiligen Beleuchtungslichtbündels verstanden. Insbesondere bei zweidimensionaler Vermessung, z.B. z(x), kommt die Erfindung mit einer Empfangslinie bzw. mit in einer Linie angeordneten Empfängerelementen aus. Diese Empfangslinie kann jedoch auch für eine dreidimensionale Vermessung eines Objektes, also z(x,y), gelten, sofern die verwendeten Ablenkungseinrichtungen nicht nur in einer, sondern in zwei Koordinatenrichtungen, z.B. x,y, kompensieren, was bedeutet, daß diese Ablenkungseinrichtungen zweidimensional gekoppelt ablenken.

Die Empfangslinie ist so angeordnet, daß sie die optische Achse der Abbildungseinrichtung schneidet, wobei des weiteren erfüllt ist, daß die Empfangslinie in einer Ebene liegt, die durch die Achsen der Abbildungslichtbündel im Empfangsbereich gebildet wird. Genauer gesagt wird diese Ebene nach der zweiten Ablenkungseinrichtung von den Achsen der Abbildungslichtbündel der Beleuchtungsflecken von unterschiedlichen Objekten bei gleichen oder verschiedenen Beleuchtungslichtbündeln aufgespannt. Vorteilhafterweise ist diese Empfangslinie abbildungstechnisch gesehen, eine geradlinige Strecke, die

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Abtastrichtung x kompensiert werden kann. Die x-Koordinate selbst kann dabei im einfachsten Fall durch die Beleuchtungsrichtung des Beleuchtungslichtbündels ermittelt werden.

Um diese Kompensation unter einem nach Kosten-Nutzen-Aspekten vernünftigen Aufwand zu erreichen, geht die Erfindung den grundsätzlich neuen Weg, ein "Referenzobjekt" zu definieren, dessen Geometrie von der Geometrie des Beleuchtungs- und Abbildungsbereiches abhängt, wobei gegebenenfalls auch der Empfängerbereich mitbeeinflussend sein kann. Dieser grundsätzlichen Idee kommt eigenständiger Erfindungscharakter zu. Mit anderen Worten wird die Kompensation der Verschiebung der Beleuchtungslichtbündel in einer Richtung nicht bezüglich des üblichen xyz-Koordinatensystem durchgeführt, sondern bezüglich eines Referenzobjektes. Die dreidimensionale Kontur dieses Referenzobjektes kann dabei relativ einfach in der Auswerteinrichtung gespeichert werden. Der Vorteil, der sich durch diese Kompensation bezüglich des Referenzobjektes ergibt, liegt insbesondere in der relativ einfachen Geometrie des Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlenganges, und speziell in der auf diese Weise erreichten verblüffend einfachen gekoppelten Ablenkung des Abbildungslichtbündels.

Mit anderen Worten ist das Verfahren und die Vorrichtung gemäß der Erfindung so ausgelegt, daß auf dem fiktiven Referenzobjekt liegende Beleuchtungsflecke, die durch das eingesetzte Beleuchtungslichtbündel erzeugt werden, in die Empfangseinrichtung mittels des Abbildungslichtbündels so projiziert werden, daß alle auf dem fiktiven Referenzobjekt liegende Beleuchtungsflecke in einem bestimmten Referenzwinkel zur optischen Achse der Abbildungseinrichtung nach der Ablenkung des Abbildungslichtbündels projiziert werden. Dieser Referenzwinkel

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

bzw. Oberflächenpunkte auf dem zu vermessenden Objekt, die gleichzeitig auch auf dem Referenzobjekt liegen, auf den gleichen Punkt der Bildebene in der Empfängereinrichtung abgebildet werden. Für Beleuchtungsflecke, die nicht auf dem Referenzobjekt liegen, verschiebt sich die Abbildung in der Empfängereinrichtung auf einer Geraden. Entlang dieser Geraden wird eine Empfängerlinie bzw. eine Empfängerzeile oder eine vorgebbare Anzahl von Empfängerelementen angeordnet. Aus der Abweichung der Abbildung eines beliebigen Beleuchtungsfleckes auf dem zu vermessenden Objekt gegenüber dem Referenzpunkt für das Referenzobjekt in der Empfängerlinie, kann dann die Abweichung des zu vermessenden Objektes gegenüber dem Referenzobjekt berechnet werden. Die Bestimmung der räumlichen Lage eines auf dem Objekt vermessenen Punktes erfolgt dabei unter Einbeziehung der jeweiligen Winkelstellung mindestens der ersten Ablenkungseinrichtung. Abhängig von der Ausführungsart der gesamten Ablenkungseinrichtung muß der Ablenkungswinkel der zweiten Ablenkungseinrichtung, die zur Ablenkung des Abbildungslichtbündels dient, mit einbezogen werden oder kann unberücksichtigt bleiben. Zum Beispiel ist bei einer winkelstarren Kopplung der ersten und zweiten Ablenkungseinrichtung, die Einbeziehung des Ablenkungswinkel der zweiten Ablenkungseinrichtung zur Bestimmung der Koordinaten des auf dem Objekt vermessenen Punktes nicht erforderlich. Die Form des Referenzobjektes wird durch die Geometrie der Beleuchtungs- und Abbildungseinrichtungen bestimmt. Vorteilhafterweise kann hierbei auch der Weg gegangen werden, dem Referenzobjekt zumindestens über Teilbereiche einen dem zu vermessenden Objekt ähnlichen Konturverlauf zu geben. Maßgebend ist hierbei jedoch, daß die Auslegung der optischen Einrichtungen zur Strahlungsführung, insbesondere im Hinblick auf die gekoppelte Ablenkung, relativ einfach und kostengünstig realisierbar ist.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

in einer Neigung zur optischen Achse angeordnet ist und diese in einem Punkt schneidet, so daß die "Scheimpflugbedingung" zur Erlangung einer scharfen Abbildung aller entlang des jeweiligen Beleuchtungslichtbündels auftretenden Beleuchtungsflecke auf die Empfangslinie durch die Abbildungseinrichtung erfüllt ist. Mit anderen Worten wird eine scharfe Abbildung des das Objekt abtastenden Beleuchtungsfleckes unabhängig von der Form des Objektes erreicht. Die Erfüllung der Scheimpflugbedingung ist wirkungsmäßig mit einer Maßnahme zur Schärfentiefenerweiterung vergleichbar. Maßgebend war hierbei, diese Möglichkeit der scharfen Abbildung überhaupt erst zu erkennen und die Geometrie der Abbildungseinrichtung dementsprechend auszulegen.
Eine vorteilhafte Lösung und Weiterbildung der Erfindung besteht darin, daß das Beleuchtungslichtbündel, das im allgemeinsten Sinn als Intensitätsverteilung einer Strahlung angesehen werden kann, und das Abbildungslichtbündel über zwei synchron ablenkende Ablenkungseinrichtungen geführt werden. Das Beleuchtungslichtbündel dient dabei dazu, auf dem zu vermessenden Objekt einen Beleuchtungsfleck oder eine definierte Intensitätsverteilung zu erzeugen, wo hingegen das Abbildungslichtbündel die Folge der Beleuchtungsflecke auf dem zu vermessenden Objekt in eine Empfängereinrichtung, die als photoempfindlicher Empfänger ausgelegt sein kann, abbildet. Die synchrone Ablenkung bzw. die gekoppelte Ablenkung erfolgt derart, daß die durch die Abtastung entstehende seitliche Verschiebung des abtastenden Beleuchtungslichtbündels relativ zur Empfängereinrichtung kompensiert wird. Von einem bestimmten Punkt in der Bildebene des Abbildungslichtbündels aus betrachtet, schneiden sich dann die optischen Achsen der Beleuchtungseinrichtung und der Abbildungseinrichtung für beliebige Ablenkwinkel in einer ebenen Raumkurve, wobei dies für spezielle Gestaltungen der Vorrichtung gilt. Um einen allgemein gültigen Terminus hierfür zu erreichen, wird die vorstehend benannte Raumkurve nachfolgend als "Referenzobjekt" bezeichnet. Das Referenzobjekt, das auch als Null-Linie betrachtet werden kann, nimmt z.B. bei telezentrischen Lichtbündeln im Zweidimensionalen die Form einer Geraden an. Wesentlich für dieses Referenzobjekt ist, daß alle Beleuchtungsflecke

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

einer Koordinate, z.B. in x-Richtung, erfolgen, wobei zur vollständigen Vermessung des Objektes, also z.B. des Höhenprofils z(x,y), eine mechanische Verschiebung des Objektes in der verbleibenden Koordinatenrichtung, z.B. in y-Richtung, erfolgen kann. Die Erfindung ist jedoch nicht auf die zweidimensionale Vermessung von Objekten beschränkt, wobei hier die Kompensation in einer Richtung stattfindet, sondern es kann auch eine direkte dreidimensionale Vermessung durchgeführt werden. Im letzteren Fall ist es erforderlich, geeignete zweidimensionale Ablenkungseinrichtungen, die z.B. vorzugsweise als um zwei Achsen drehbare Spiegel ausgelegt sein können, verwendet werden. Als Alternative hierzu sind auch zwei eindimensionale Ablenkungseinrichtungen, die hintereinander angeordnet sind, verwendbar.

Da das erfindungsgemäße Verfahren als seriell arbeitendes Verfahren ausgelegt ist, worunter also die sukzessive und nacheinander erfolgende Abtastung bzw. Vermessung des Objekts mit endlich vielen Beleuchtungsflecken verstanden wird, so daß sich die Form des Objektes an endlich vielen Stellen ergibt, kommt das Verfahren mit einer Linie von Empfängerelementen aus. Hierdurch wird die Meßdynamik zur Bestimmung des Koordinatenunterschiedes gegenüber dem Referenzobjekt, z.B. in Höhenrichtung z, bereits verbessert. Verfahren und Vorrichtung können deshalb auch zur Vermessung von Objekten eingesetzt werden, die z.B. auch in der dritten Dimension, der z-Richtung, eine starke Strukturierung aufweisen. Die räumliche Auflösung wird daher bei der Erfindung trotz eines großen Meßbereiches in allen drei Dimensionen im Vergleich zum Stand der Technik verbessert.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Die Erfindung hat den wesentlichen Vorteil, daß für die Vermessung des zweidimensionalen Höhenprofils, also z.B. z(x), nur eine eindimensionale Empfängereinrichtung in Form einer Linie von Empfängerelementen, die bezüglich des auf das Objekt projizierten Beleuchtungsfleckes positionsempfindlich ausgelegt sind, benötigt werden. Aufgrund der erfindungsgemäß vorhandenen Kompensation in einer Verschiebungsrichtung, ist die Anzahl der erforderlichen Empfängerelemente gleich der Anzahl der aufzulösenden Höhenstufen in bezug auf das Referenzobjekt. Zur Kompensation der Verschiebung der Beleuchtungslichtbündel in einer Richtung eignet sich vorteilhafterweise eine winkelstarre Kopplung zwischen der ersten und der zweiten Ablenkungseinrichtung. Diese winkelstarre Kopplung kann gerade bei optischen Systemen in einfachster Weise dadurch realisiert werden, daß die erste und zweite Ablenkungseinrichtung in einer gemeinsamen Ablenkungseinrichtung integriert sind. Dies ist besonders deshalb zweckmäßig, da die Steuerungs- und Antriebsmechanismen sowie die entsprechenden Sensoren zur Ermittlung der Ablenkung der Lichtbündel im Prinzip nur einmal zur Verfügung stehen müssen. Für diese Art einer gemeinsamen Ablenkungseinrichtung eignen sich besonders Drehspiegel, mit denen die Ablenkung der Lichtbündel sowohl auf einer Seite als auch bei doppelseitigen Spiegeln auf gegenüberliegenden Seiten durchgeführt werden kann. Ebenso sind polygonale Spiegelräder dafür geeignet, wobei die Ablenkung des Beleuchtungslichtbündels und des Abbildungslichtbündels an verschiedenen Spiegelradflächen erfolgt. Je nach Einsatzbereich können auch andere Ablenkungseinrichtungen, wie akustooptische oder elektrooptische Ablenker, elektronisch gesteuerte Kipp- oder Drehspiegel, starr verbundene Spiegel oder ein einziger großer Spiegel eingesetzt werden. Die Kompensation des Abtast- bzw. Verschiebungsweges des Beleuchtungslichtbündels kann bezüglich

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Um die Meßdynamik im Abbildungsbereich oder Empfangsbereich noch zu verbessern, wird die Erfindung durch Maßnahmen zur Schärfentiefenerweiterung in vorteilhafter Weise weitergebildet. Zweckmäßigerweise wird hierzu die Empfangslinie bzw. die Linie der Empfängerelemente unter einem Winkel zur optischen Achse der nach der Ablenkung des Abbildungslichtbündels vorgesehenen Abbildungseinrichtung angeordnet, wobei die Empfangslinie die optische Achse in einem Punkt schneidet, in den der Schnittpunkt des jeweiligen Beleuchtungsbündels mit der optischen Achse der Abbildungseinrichtung vor der Ablenkung der Abbildungslichtbündel in den Empfangsbereich abgebildet wird. Der Neigungswinkel φ' gegenüber der optischen Achse der Abbildungseinrichtung nach der Ablenkung wird dabei so bestimmt, daß er eine Funktion des Winkels φ ist, unter den sich das jeweilige Beleuchtungslichtbündel und die optische Achse der Abbildungseinrichtung im Objektbereich vor der Ablenkung schneiden. Unter Berücksichtigung des Abbildungsmaßstabes ß der Abbildungseinrichtung wird der Neigungswinkel φ' der Empfängerlinie so bestimmt, daß $ß \cdot \tan \varphi' = \tan \varphi$ ist.

Die Schärfentiefenerweiterung auf der Empfängerlinie kann vorzugsweise auch dadurch erreicht werden, daß die Linie der Empfängerlemente gemäß der Scheimpflugbedingung gegen die optische Achse der Abbildungseinrichtung nach der Ablenkung des Abbildungslichtbündels geneigt ist. Zweckmäßigerweise kann auch ergänzend oder alternativ dazu ein Axicon oder eine Linse mit Ringpupille in den Strahlengang des Abbildungslichtbündels zwischengeschaltet werden. Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit bei der Abbildung besteht darin, daß

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

mittels eines Verfahrens der Bildverarbeitung zusätzlich der Schwerpunkt des Beleuchtungsfleckes bzw. der Intensitätsverteilung auf dem Objekt bzw. in der Empfangslinie ermittelt wird. Generell gesehen kann die Schärfentiefenerweiterung im Abbildungsbereich dadurch verbessert und erreicht werden, daß das Abbildungslichtbündel verfahrensmäßig so beeinflußt wird, daß ein ausgeprägtes Intensitätsmaximum seiner Lichtverteilung längs der Lichtbündelachse, insbesondere längs eines großen Bereichs der Lichtbündelachse im Objektbereich, erreicht wird. Die Ablenkung des Beleuchtungslichtbündels und des Abbildungslichtbündels kann vorteilhafterweise phasenstarr gekoppelt um jeweils den gleichen Winkel erfolgen. Speziell bei telezentrischen oder zentrischen Beleuchtungs- und Abbildungslichtbündeln vereinfacht dies das Ablenkungssystem.

Allgemeiner betrachtet wird eine winkelstarre Kopplung der Ablenkung des Beleuchtungslichtbündels und des zugeordneten Abbildungslichtbündels so durchgeführt, daß der Winkel α zwischen den Achsen zweier beliebiger Beleuchtungslichtbündel und der Winkel α' zwischen den jeweiligen zugeordneten optischen Achsen der Abbildungseinrichtung im Objektbereich vor der Ablenkung der Abbildungslichtbündel, gleich ist.

Da die verfahrens- oder vorrichtungsmäßig erreichbare Meßdynamik durch die Schärfentiefenerweiterung im Beleuchtungsbereich mitbeeinflußt wird, werden auch in diesem Bereich vorteilhafterweise Maßnahmen ergriffen, die dies ermöglichen. Die Projizierung des Beleuchtungsfleckes auf das zu vermessende Objekt erfolgt dementsprechend durch eine die Schärfentiefe erweiternde Methode. Eine Maßnahme dieser Art ist aus dem Deutschen Patent DE-PS 23 01 800 bekannt. Vorzugsweise wird in den Strahlengang des

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Beleuchtungslichtbündels ein Axicon oder eine Linse mit Ringpupille zwischengeschaltet. Diese Maßnahmen und Vorrichtungen erlauben es, daß sich das dadurch entstehende Interferenzmuster längs der optischen Achse über eine Distanz von mehreren Metern nur unwesentlich ändert, so daß ein "lichtstiftartiges" Beleuchtungslichtbündel vorhanden ist. Hierbei kann der Durchmesser des in der optischen Achse liegenden Intensitätsmaximumsetwa 100 µm oder weniger betragen. Das Intensitätsmaximum wird insbesondere längs eines großen Bereichs der Lichtbündelachse im Objektbereich vorgesehen. Als Lichtquelle zur Erzeugung eines derartigen Strahlenganges eignet sich besonders ein Laser. Ebenso können andere Strahlungsquellen zur Erzeugung kohärenter Wellen benutzt werden.

Eine andere Maßnahme zur Schärfentiefenerweiterung besteht darin, den scharfen Objektpunkt bzw. ein fokussiertes Lichtbündel schnell entlang der optischen Achse der Beleuchtungseinrichtung zu bewegen, so daß im Zeitmittel ebenfalls ein "lichtstiftartiges" Lichtbündel entsteht. Je nach Anwendungsfall kann auch auf dem Objekt eine Lichtverteilung erzeugt werden, die sich bei Defokussierung selbst reproduziert. Hierzu werden vorzugsweise Gitter oder Fresnel-Zonenplatten verwendet.

Vorteilhafterweise arbeitet die Erfindung mit telezentrischen Beleuchtungs- und Abbildungslichtbündeln, d.h. daß z.B. alle Beleuchtungslichtbündel im Objektraum parallel zueinander verlaufen. Gleiches gilt für alle zugehörigen optischen Achsen der Abbildungseinrichtung. Die zugehörigen optischen Achsen der Abbildungseinrichtung resultieren aus der Ablenkung des Abbildungsstrahlenganges bzw. der entsprechenden Lichtbündel und beispielsweise aus der Faltung an vorhandenen Spiegeln. Hierdurch schneiden sich alle Beleuchtungslichtbündel und ihre zugehörigen optischen Achsen der Abbildungseinrichtung unter dem gleichen festen Winkel. Dies ergibt einen wesentlichen Vorteil hinsichtlich der vereinfachten Ablenkung, aber insbesondere auch eine hohe ortsunabhängige Genauigkeit bei der Vermessung des dreidimensionalen Objektes.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Aufgrund der Konpensation ist es möglich, die Linie der Empfängerelemente geradlinig anzuordnen, so daß von einer eindimensionalen Empfängerzeile gesprochen werden kann. Der Terminus "eindimensional" berücksichtigt dabei nicht die dreidimensionale Abmessung des einzelnen Empfängerelementes, sondern faßt diese als punktartig aneinander geordnete Empfängerelemente auf. Prinzipiell gesehen könnte die Linie der Empfängerelemente auch einen zweidimensionalen, z.B. Bogensegment-Verlauf annehmen. Die geradlinige Anordnung bringt jedoch eine erhebliche konstruktive Vereinfachung, wobei dies durch vorgesehene Maßnahmen zur Schärfentiefenerweiterung nicht zu Lasten der Meßdynamik geht.

Zweckmäßigerweise werden die erste und zweite Ablenkungseinrichtung für die entsprechenden Lichtbündel als ein Ablenkspiegel ausgelegt, wobei die gemeinsame Drehachse geeigneterweise in der Längsmittelachse, z.B. bei Kippspiegel, zu liegen kommt. Bei einem polygonalen Spiegelrad liegt die gemeinsame Drehachse in der Rotationsachse des Spiegelrades.

Das zur Kompensation der Verschiebung der Lichtbündel in einer Richtung eingeführte Referenzobjekt kann ein beliebiger sphärischer Körper sein, wobei die Form einer Geraden, einer Ebene, einer Kreis- oder Zylindermantelfläche oder eines Kugelflächensegmentes,die im Hinblick auf die Auslegung der optischen Vorrichtung geeignetsten Formen sind.

Betrachtet man die zweidimensionale Vermessung eines Objektes mittels der Erfindung, so sind die Vorteile erkennbar, daß zur Ermittlung des Höhenprofils, z.B. z-Richtung, nur eine eindimensionale Empfängerzeile benötigt wird. Die Anzahl der

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Empfängerelemente muß nicht größer sein, als die im entsprechenden Fall gewünschte Anzahl von auflösbaren Höhenstufen und hängt nicht von der Anzahl der Meßpunkte in der Abtastrichtung bzw. in der Verschiebungsrichtung des Beleuchtungslichtbündels auf dem Objekt ab. Neben der daraus resultierenden technischen Vereinfachung ist auch bei vergleichbarem Zeitaufwand mit Verfahren des Standes der Technik, die mögliche Anzahl der Meßpunkte bei der Erfindung größer als im Stand der Technik. Durch die Anwendung der erwähnten Methoden zur Schärfentiefenerweiterung im Beleuchtungs- und/oder im Abbildungsbereich, ist die Vermessung von Höhenprofilen mit hoher räumlicher Auflösung unabhängig von der Höhe des Objektes möglich. Die erzielbare Genauigkeit ist nur durch die Qualität der abbildenden optischen Elemente und die Anzahl der Empfängerelemente im Detektor begrenzt. Die dreidimensionale Vermessung von Objekten mit serieller Abtastung erfolgt daher bei der Erfindung wesentlich schneller bei geringerem Aufwand und mit höherer Meßdynamik als bei vergleichbaren Verfahren.

Die Erfindung wird nachstehend anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele noch näher erläutert. Es zeigen:

Figur 1 den schematischen Aufbau und den Strahlengang bei einer Vorrichtung, die telezentrische Beleuchtungslichtbündel und Abbildungslichtbündel erzeugt, wobei das Referenzobjekt eine Gerade ist;

Figur 2 den schematischen Aufbau eines zweiten Ausführungsbeispieles einer Vorrichtung in leicht perspektivischer Betrachtung, wobei als Referenzobjekt eine kreisförmige Linie vorgesehen ist und zentrische Beleuchtungs- und Abbildungslichtbündel verwendet werden;

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Figur 3 a das Beispiel nach Fig. 2 mit einem schematischen Schnitt durch die Vorrichtung und das zu vermessende Objekt in Abtastrichtung;

Figur 3 b eine teilweise projektionsartige Betrachtung des Beispieles nach der Fig. 2 in der xz-Ebene und

Figur 4 eine Prinzipskizze zur Erläuterung der Winkelrelation bei winkelstarrer Ablenkung und der Neigungsanordnung der Empfängerlinie gegenüber der optischen Achse.

Im Beispiel nach der Fig. 1 wird zur Erzeugung des Beleuchtungslichtbündels ein Laserstrahl verwendet, der durch eine Linse 1, eine im Strahlengang nachgeordnete Blende 2 und eine weitere Linse 3 aufgeweitet wird. Im weiteren Strahlengang befindet sich nach einem festen Umlenkspiegel 4 ein zur Schärfentiefenerweiterung benutztes Axicon 5. Das Beleuchtungslichtbündel wird nach dem Axicon 5 durch eine Linse 6 geführt, die im Abstand ihrer Brennweite f_6 vor der ablenkenden Fläche eines Spiegelrades 7, die die erste Ablenkungseinrichtung bildet, angeordnet ist. Der weitere Strahlengang des Beleuchtungslichtbündels erfolgt über einen weiteren festen Umlenkspiegel 8 und eine Linse 9. Die Linse 9 weist eine Brennweite f_9 auf. Die Anordnung ist dabei so getroffen, daß der Abstand der Fläche des Spiegelrades 7 über den festen Umlenkspiegel 8 zur Linse 9 gleichdem Abstand der Linse 9 von dem als Gerade dargestellten Referenzobjekt 10 ist. Das heißt, der optische Weg eines Beleuchtungslichtbündels zwischen der Fläche des Spiegelrades 7 und der Linse 9 sowie zwischen der Linse 9 und dem Referenzobjekt 10 ist

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

jeweils gleich der Brennweite f_9. Zur Abbildung bzw. Beobachtung der Intensitätsverteilung bzw. der Beleuchtungsflecke auf dem zu vermessenden Objekt, wird das Abbildungslichtbündel über die Linse 9, einen feststehenden Umlenkspiegel 11, eine weitere Fläche des Spiegelrades 7, die die zweite Ablenkungseinrichtung bildet, und eine Linse 12 geführt. Die Linse 12 bildet in diesem Beispiel die Abbildungseinrichtung nach der Ablenkung. Im Empfangsbereich nach der Linse 12 ist eine Empfängereinrichtung 13 angeordnet, in der der Beleuchtungsfleck abgebildet wird. Die optische Weglänge zwischen der Linse 9 und dem Referenzobjekt 10 sowie zwischen der Linse 9, dem Umlenkspiegel 11 und der kompensierenden Fläche des Spiegelrades 7 im Abbildungsstrahlengang entsprechen jeweils der Brennweite f_9. Die optischen Weglängen von der Fläche des Spiegelrades 7 zur Linse 12 und von dieser zum Schnittpunkt der optischen Achse des Abbildungsstrahlenganges mit der als Detektor ausgelegten Empfängereinrichtung 13 sind jeweils gleich der Brennweite f_{12} der Linse 12. Die Pupille des Beleuchtungs- bzw. des Abbildungslichtbündels liegt in der ablenkenden bzw. kompensierenden Fläche des Spiegelrades 7. Durch Drehen des Spiegelrades 7 wird eine Konturlinie des Objektes punktweise abgetastet. Der in Fig. 1 ausgezogene Strahlengang ergibt sich für die eingezeichnete Stellung des Spiegelrades 7. Der mit unterbrochener Linie eingezeichnete Strahlengang ergibt sich demgegenüber nach einer Drehung des Spiegelrades um 10°. Die von der Empfängereinrichtung 13 gelieferte Höheninformation wird digital einer Winkelstellung des Spiegelrades 7 und damit einem Abtastort bzw. der Lage eines Beleuchtungsfleckes auf dem zu vermessenden Objekt zugeordnet. Der Antrieb des Spiegelrades 7 kann z.B. mit einem Schritt-

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

motor oder kontinuierlich mit Frequenzstabilisierung erfolgen. Im letzteren Fall werden mit außerhalb des Objekt- bzw. Meßraumes liegenden Apparaturen Synchronisationsimpulse erzeugt. Zur Vermessung der dreidimensionalen Form, also z (x,y), wird das Objekt zusätzlich senkrecht zur Abtastrichtung, die im Beispiel nach Fig. 1 die x-Achse ist, verschoben, wobei dies zweckmäßigerweise auf einem Transportwagen erfolgen kann.

Durch die spezielle Anordnungslage der dem Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlengang gemeinsamen Linse 9 und ihrer jeweiligen Pupille wird erreicht, daß sowohl alle Beleuchtungslichtbündel wie auch alle optischen Achsen der Abbildungseinrichtung im Objektraum parallel, also telezentrisch sind und sich unter dem gleichen festen Winkel schneiden. Hierdurch wird eine ortsunabhängige Genauigkeit der Formvermessung erreicht. Unter Objektraum wird hierbei der Raum unterhalb der Linse 9 einschließlich des zu vermessenden Objektes verstanden.

Das im Beispiel verwendete Axicon 5 ist eine Kegellinse. Der Scheitelwinkel δ des zur Schärfentiefenerweiterung benutzten Axicons 5 im Strahlengang des Beleuchtungslichtbündels ist so zu wählen, daß der auf dem Objekt erzeugte Beleuchtungsfleck bzw. dessen Ringstruktur den gewünschten Durchmesser d des zentralen Maximums und die gewünschte Gesamtausdehnung längs der Achse des Beleuchtungslichtbündels besitzt. Hierbei gilt

$$d = \frac{1,2\ \lambda}{\pi\ (n-1)\ \delta}$$

wobei λ die Wellenlänge des verwendeten Lichtes und n die Brechzahl des Axiconmaterials ist. Zur Erzielung eines großen Schärfentiefenbereichs in Beleuchtungsrichtung wird

der Abstand von Axicon 5 zur Linse 6 so gewählt, daß das Axicon durch die Linsen 6 und 9 in den Objektraum oberhalb der größten zu erwartenden Objekthöhe abgebildet wird.

Zur Erzielung einer scharfen Abbildung der das Objekt abtastenden Beleuchtungsflecke über das Abbildungslichtbündel auf die Empfängereinrichtung 13, wird die Empfängereinrichtung 13 gemäß der Scheimpflug-Bedingung gegen die optische Achse der Abbildungseinrichtung geneigt.

Ein weiteres Ausführungsbeispiel ist in den Figuren 2,3a und 3b gezeigt. Das von einem nicht dargestellten Laser ausgehende Beleuchtungslichtbündel 21 wird durch einen Kollimator 22 aufgeweitet. Dieses aufgeweitete Lichtbündel geht dann durch ein Axicon 23, das entlang der optischen Achse eine enge Lichtverteilung 25 mit hellem Kern erzeugt. Es wird hierdurch ein stark ausgeprägtes Intensitätsmaximum der Lichtverteilung erreicht. Das im Beispiel nach Fig. 2 vorgesehene zu vermessende Objekt 27 wird mit Hilfe eines Drehspiegels 24 sozusagen punktmäßig abgetastet. Die Drehachse 26 des Drehspiegels 24 liegt dabei in der Spiegelebene. Das abtastende Beleuchtungslichtstrahlenbündel erzeugt sequentiell eine Konturlinie 28 auf dem Objekt 27. In der gezeigten Spiegelstellung liegt der Beleuchtungsfleck gerade in der Position 29. Nach der Reflektion dieses Beleuchtungsfleckes am Drehspiegel 24, wird der Beleuchtungsfleck durch eine Linse 30 auf eine detektierende Linie von Empfängerelementen 31 in der Position 32 abgebildet. Die Abbildung des Punktes 33, der zufällig als Nullpunkt des xyz-Koordinatensystems angenommen ist, erfolgt im Ausführungsbeispiel nach der Fig. 2 in der Position 34 der Empfängereinrichtung 31.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Die Differenz zwischen der Position 32 und 34 in der Empfängereinrichtung 31 zeigt dabei die Höhe h der Kontur des zu vermessenden Objektes an der Position 29 an.

Im Beispiel nach Fig. 2 und der dort gezeigten Geometrie der Beleuchtungseinrichtung ist das Referenzobjekt 39 ein Kreisbogen um den Punkt 35, wobei der Radius gleich der Entfernung zwischen den Punkten 35 und 33 ist. Von der Vorrichtung werden daher Höhendifferenzen zum Referenzobjekt bzw. im Beispiel zum Kreisbogen angezeigt.

Die Abbildung des Beleuchtungsfleckes in der Position 29 geschieht mit erweiterter Schärfentiefe vorzugsweise dadurch, daß eine passende Neigung der Empfängereinrichtung zur optischen Achse gewählt wird, wobei die gewählte Neigung der Scheimpflugbedingung entspricht. Diese Scheimpflugbedingung sei durch den entfalteten Strahlengang 36, 37,38 unter bezug auf die Figuren 2 und 3 b erläutert. Das virtuelle Linsenbild 36 ist das Spiegelbild der Linse 30. Das Spiegelbild der Empfängereinrichtung 31 bzw. der Empfängerzeile ist in Position 37 dargestellt. Orientiert man die z-Ebene, die Hauptebene der Linse 36 und die Empfängereinrichtung 37 so, daß sich ihre Verlängerungen in der Position 38 schneiden, so erhält man eine scharfe Abbildung auf der Linie der Empfängerelemente unabhängig von der z-Koordinate des Beleuchtungsfleckes.

Die erweiterte Schärfentiefe kann alternativ durch eine die Schärfentiefe erweiternde Abbildung erfolgen, wozu z.B. eine Ringpupille vor der Linse 30 angeordnet werden kann.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Zur Abtastung des zu vermessenden Objektes in x-Richtung wird das Objekt vorzugsweise auf einem Transportwagen mechanisch bewegt.

Die beiden Ausführungsbeispiele gemäß der Fig. 1 bzw. gemäß den Figuren 2,3a und 3b unterscheiden sich bezüglich der Art, wie die Kompensation des Abtast- oder Verschiebeweges realisiert wird und in der Form des "Referenzobjektes". Im ersten Ausführungsbeispiel nach Fig. 1 läßt sich durch Weglassen der Linse 6 und der Linse 9 sowie durch entsprechende Änderung der Brennweite f_{12} der Linse 12 ebenfalls ein annähernd kreisförmiges "Referenzobjekt" erreichen. Desgleichen lassen sich beim zweiten Ausführungsbeispiel nach den Figuren 2,3a und 3b durch Hinzufügen zweier Linsen im Beleuchtungsstrahlengang und einer weiteren Linse im Abbildungsstrahlengang analog zur Anordnung in Fig.1 telezentrische Beleuchtungs- und Abbildungslichtbündel erzielen.
In Fig. 4 ist in einer Prinzipskizze die Neigung der Empfängereinrichtung 13 mit einem Winkel φ' zur optischen Achse 49 einer Abbildungseinrichtung 43,44 dargestellt. Die Abbildungseinrichtung besteht im Beispiel nach Fig.4 aus einer Ablenkungseinrichtung 43 mit einem Abbildungselement 44. Des weiteren enthält diese Skizze beispielhaft die Relationen für eine winkelstarre Kopplung einer ersten Ablenkungseinrichtung 42 mit der zweiten Ablenkungseinrichtung 43 über eine Kopplungseinrichtung 41. Das Referenzobjekt 50 ist im Beispiel der Fig. 4 ein Kreisbogen. Ein erstes Beleuchtungslichtbündel 45 ist ab der Ablenkungseinrichtung 42 eingezeichnet und ist nach einer Winkelablenkung um den Winkel α mit unterbrochener Linie als Beleuchtungslichtbündel 46 dargestellt.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Im Abbildungsbereich ist die Abbildungseinrichtung 43,44 mit der optischen Achse 47 gezeigt. Nach Ablenkung der optischen Achse durch die Ablenkungseinrichtung 43 bei winkelstarrer Kopplung zur Ablenkung des Beleuchtungslichtbündels durch die Ablenkungseinrichtung 42, verläuft die optische Achse in der strichpunktierten Linie 48, so daß die optische Achse der Abbildungseinrichtung 43,44 im Objektbereich eine Winkeldrehung um α' erfahren hat. Bei einer winkelstarren Kopplung durch die Kopplungseinrichtung 41 bedeutet dies, daß der Winkel α' gleich dem Winkel α wird, wobei die optische Achse 49 nach der Ablenkungseinrichtung 43 festliegt.

Im Hinblick auf die Schärfentiefenerweiterung im Abbildungsbereich wird die Empfängereinrichtung 13 in einem Schnittpunkt S' mit der optischen Achse 49 angeordnet, wobei dieser Schnittpunkt S' die Abbildung des Schnittpunktes S bzw. des Durchstoßpunktes eines Beleuchtungslichtbündels 45 mit der Oberfläche des Referenzobjektes 50 ist. Der Neigungswinkel φ' der Empfängereinrichtung 13 gegenüber der optischen Achse 49 errechnet sich unter Berücksichtigung des Abbildungsmaßstabes ß der Abbildungseinrichtung 43,44 nach der Ablenkung derart, daß $ß \cdot \tan \varphi'$ gleich dem Tangens des Winkel φ ist, der zwischen einem Beleuchtungslichtbündel 45 und der optischen Achse 47 der Abbildungseinrichtung 43,44 im Objektbereich gebildet wird.

Die Erfindung schafft daher ein optisches Verfahren und eine entsprechende Vorrichtung zur Ermittlung der dreidimensionalen Form von Objekten mit hoher räumlicher Auflösung und

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

gleichzeitig großem Meßvolumen. Bei derartigen Verfahren und Vorrichtungen ist eine Beleuchtung des Objektes mit sehr kleinen Beleuchtungsflecken, einer schmalen Lichtlinie oder einer feinstrukturierten Intensitätsverteilung nötig. Die Dimensionen der verwendeten Lichtbündel sollen im ganzen Meßvolumen relativ klein sein, wobei außerdem die Position des Beleuchtungsfleckes auf dem Objekt mittels einer Abbildung in eine positionsempfindliche Empfängereinrichtung mit großer Genauigkeit bestimmt werden soll. Das verwendete Abbildungslichtbündel resultiert im Prinzip aus dem Streulicht des jeweiligen Beleuchtungsfleckes auf dem Objekt.

Das Verfahren und die Vorrichtung gemäß der Erfindung werden daher vorteilhafterweise so ausgelegt, daß die durch die Abtastung des Objektes entstehende seitliche Verschiebung der abtastenden Intensitätsverteilung auf dem Objekt gegenüber dem positionsempfindlichen Empfänger kompensiert wird, daß weiterhin die Erzeugung der abtastenden Intensitätsverteilung mit gegenüber der konventionellen Abbildung erweiterter Schärfentiefe erfolgt, und daß die Abbildung der am Objekt gestreuten Intensitätsverteilung auf den positionsempfindlichen Empfänger mit gegenüber der konventionellen Abbildung erweiterter Schärfentiefe erfolgt. In einer anderen Ausführung wird das Verfahren und die Vorrichtung vorteilhafterweise so konzipiert,daß die abstastende Intensitätsverteilung rasch über das Objekt bewegt wird, daß die Beobachtung der entstehenden Konturlinie auf einem zweidimensional-positionsempfindlichen Empfänger erfolgt, daß die Erzeugung der abtastenden Intensitätsverteilung mit gegenüber der konven-

tionellen Abbildung erweiterter Schärfentiefe erfolgt und daß die Abbildung der am Objekt gestreuten Intensitätsverteilung auf den positionsempfindlichen Empfänger mit gegenüber der konventionellen Abbildung erweiterter Schärfentiefe erfolgt.
Alternativ können das Verfahren und die Vorrichtung geeigneterweise so ausgelegt, daß die durch die Abtastung des Objektes entstehende seitliche Verschiebung der abtastenden Intensitätsverteilung auf dem Objekt gegenüber dem positionsempfindlichen Empfänger kompensiert wird und daß die Abbildung der am Objekt gestreuten Intensitätsverteilung auf eine gemäß der Scheimpflugbedingung so angeordneten positionsempfindlichen Empfänger erfolgt, daß scharfe Abbildung im ganzen Meßbereich erreicht wird.

Das grundlegende Prinzip der Erfindung ist darin zu sehen, daß die durch die Abtastung des Objektes entstehende seitliche Verschiebung der abtastenden Intensitätsverteilung auf dem Objekt gegenüber dem positionsempfindlichen Empfänger kompensiert wird.
Vorteilhafterweise wird dies so gelöst, daß die Kompensation der Abtastbewegung durch Führen des Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlenganges über zwei synchron ablenkende Lichtablenker bzw. Ablenkungseinrichtungen erfolgt.
Geeigneterweise erfolgt dies so, daß die Kompensation der Abtastbewegung durch Führung des Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlengangs über einen gemeinsamen Lichtablenker erfolgt.
Hierzu wird vorteilhafterweise ein einziger drehbarer Spiegel als Lichtablenker verwendet.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

In anderer Ausführungsform können geeigneterweise zwei starr verbundene Spiegel als Lichtablenker verwendet werden.
In einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung werden als Lichtablenker zwei verschiedene Flächen eines Spiegelrades verwendet.
Geeigneterweise können als Lichtablenker auch die Vorder- und Rückseite eines beidseitigen Spiegels verwendet werden.
Verfahren und Vorrichtung werden dadurch weitergebildet, daß zur Schärfentiefenerweiterung im Beleuchtungsstrahlengang ein Axicon verwendet wird.
Ebenso kann vorteilhafterweise die Schärfentiefenerweiterung im Beleuchtungsstrahlengang mittels einer Ringpupille erreicht werden.
Als weitere vorteilhafte Weiterbildung kann die Schärfentiefenerweiterung im Beleuchtungsstrahlengang auch durch schnelles Verschieben des abtastenden Lichtpunktes bzw. des Fokus des Lichtbündels entlang der optischen Achse des Beleuchtungsstrahlenganges erreicht werden.
Das Verfahren und die Vorrichtung können auch so weitergebildet werden, daß die Schärfentiefenerweiterung im Beleuchtungsstrahlengang durch Verwendung einer Intensitätsverteilung auf dem Objekt erzeugt wird, die sich bei Defokussierung selbst reproduziert.
Hierzu wird geeigneterweise ein Fresnel-Zonenmuster verwendet. Als weitere vorteilhafte Alternative bietet sich hierfür die Verwendung eines Gitters an.
Die Schärfentiefenerweiterung im Abbildungsstrahlengang wird vorteilhafterweise mit gleichen Methoden wie im Beleuchtungsstrahlengang bewirkt, d.h. daß ein Axicon, eine Ringpupille oder das schnelle Verschieben der Schärfenebene entlang der optischen Achse verwendet wird.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird die Empfängereinrichtung gegenüber der optischen Achse des Abbildungsstrahlenganges gemäß der Scheimpflugbedingung so geneigt angeordnet, daß eine scharfe Abbildung der abtastenden Intensitätsverteilung im ganzen Meßbereich erreicht wird.

Zur genaueren räumlichen Lagebestimmung eines Beleuchtungsfleckes auf dem zu vermessenden Objekt ist es vorteilhaft, den Schwerpunkt des Bildes der abtastenden Intensitätsverteilung zu ermitteln.

Vorteilhafterweise wird als positionsempfindliche Empfängereinrichtung eine eindimensionale Anordnung photoempfindlicher Elemente verwendet.

Vorteilhafterweise wird die optische Achse des Abbildungsstrahlenganges in die durch die Beleuchtungslichtbündel aufgespannte Ebene gelegt.

Bei einer anderen vorteilhaften Ausgestaltung wird die optische Achse des Abbildungsstrahlenganges senkrecht zur Abtast- bzw. Verschieberichtung angeordnet.

Eine weitere besonders vorteilhafte Wirkung ergibt sich dadurch, daß durch Anordnung eines fokussierenden Elementes im Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlengang zwischen der Ablenkungseinrichtung und dem Objekt- bzw. Meßraum, im Objektraum telezentrische Beleuchtungs- und Abbildungslichtbündel erzielt werden.

Durch Anordnung eines fokussierenden Elementes im Strahlengang der Beleuchtungslichtbündel zwischen der Ablenkungseinrichtung und dem Objektraum können vorteilhafterweise telezentrische Beleuchtungslichtbündel erreicht werden.

Alternativ zur ausschließlichen Kompensation der Abtastrichtung kann geeigneterweise auch unter Umgeheung der Kompensation zusätzlich eine direkte Beobachtung des am

Objekt gestreuten Lichtes erfolgen und dadurch das Verfahren als Lichtschnittverfahren mit erweiterter Schärfentiefe benutzt werden.

Ingesamt gesehen wird daher die Möglichkeit geschaffen, dreidimensionale Objekte mit großer räumlicher Auflösung bei gleichzeitig großem Meßbereich in allen drei Dimensionen schnell zu vermessen, ohne durch die begrenzte Schärfentiefe und die Zahl der Auflösungselemente bekannter, erhältlicher Empfängereinrichtungen stark eingeschränkt zu sein.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

30

Patentansprüche

1. Verfahren zur mehrdimensionalen Vermessung eines Objektes,
bei dem das Objekt mit einem Beleuchtungslichtbündel beleuchtet wird,
bei dem durch Ablenken des Beleuchtungslichtbündels in vorgebbare Beleuchtungsrichtungen eine Folge von Beleuchtungsflecken auf dem Objekt erzeugt wird,
bei dem die Beleuchtungsflecke nacheinander durch Abbildungslichtbündel in von den Beleuchtungsrichtungen verschiedenen Abbildungsrichtungen in einen Empfangsbereich abgebildet werden und
bei dem die Position der Abbildungen der Beleuchtungsflecke im Empfangsbereich bestimmt und daraus sowie aus der Beleuchtungsrichtung die räumliche Lage der Beleuchtungsflecke auf dem zu vermessenden Objekt ermittelt wird,
dadurch g e k e n n z e i c h n e t ,
daß das Beleuchtungslichtbündel und das für die Abbildung eines Beleuchtungsfleckes verwendete Abbildungslichtbündel abgelenkt werden,
daß die Ablenkung des Beleuchtungslichtbündels und des Abbildungslichtbündels so gekoppelt erfolgt, daß alle Beleuchtungsflecke auf einem vorgebbaren Referenzobjekt unter einem bestimmten Referenzwinkel zur optischen Achse der Abbildungseinrichtung in eine Empfangslinie im Empfangsbe-

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

reich abgebildet werden, und daß jeder Beleuchtungsfleck auf dem Objekt unter einem beliebigen Winkel zur optischen Achse der Abbildungseinrichtung in die Empfangslinie abgebildet wird, der mit dem Referenzwinkel in einer Empfangsebene liegt,
wobei die Empfangslinie von der optischen Achse der Abbildungseinrichtung im Empfangsbereich geschnitten wird und die Empfangsebene von den Achsen der Abbildungslichtbündel im Empfangsbereich nach der Ablenkung aufgespannt wird,
daß in der Empfangsebene aus dem Winkelabstand zwischen dem jeweiligen Winkel der Achse des jeweiligen Abbildungslichtbündels und dem Referenzwinkel die Abweichung der Koordinaten des zu vermessenden Objektes vom Referenzobjekt in Richtung der Achse des jeweiligen Beleuchtungslichtbündels bestimmt wird, und
daß aus den Koordinaten des Referenzobjektes und der Abweichung der Koordinaten des Objektes vom Referenzobjekt die räumliche Lage der Beleuchtungsflecke auf dem zu vermessenden Objekt als Form des Objektes bestimmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Empfangslinie so vorgesehen wird, daß die optische Achse der Abbildungseinrichtung im Empfangsbereich in einem Punkt S' geschnitten wird, in den ein Schnittpunkt S der Achse des jeweiligen Beleuchtungslichtbündels mit der optischen Achse der Abbildungseinrichtung vor der Ablenkung der Abbildungslichtbündel, abgebildet wird, und
daß die Empfangslinie so gegen die optische Achse der Abbildungseinrichtung nach der Ablenkung geneigt ist, daß der Tangens des Neigungswinkels φ' ($\tan \varphi'$) multipliziert mit dem Abbildungsmaßstab ß der Abbildungseinrichtung gleich dem Tangens des Winkels φ ist, unter dem sich das jeweilige Beleuchtungslichtbündel und die optische Achse der Abbildungseinrichtung im Objektbereich vor der Ablenkung schneiden, d.h. daß $ß \cdot \tan \varphi' = \tan \varphi$ ist.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Beleuchtungslichtbündel und die zugeordneten Abbildungslichtbündel winkelstarr gekoppelt so abgelenkt werden, daß der Winkel zwischen den Achsen zweier beliebiger Beleuchtungslichtbündel und der Winkel zwischen den jeweiligen zugeordneten optischen Achsen der Abbildungseinrichtung im Objektbereich vor der Ablenkung der Abbildungslichtbündel, gleich ist.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet,
daß zur Erzeugung einer Folge von Beleuchtungsflecken auf dem zu vermessenden Objekt und zur Abbildung dieser Folge von Beleuchtungsflecken in den Empfangsbereich telezentrische Beleuchtungslichtbündel und Abbildungslichtbündel verwendet werden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet,
daß ein Beleuchtungslichtbündel mit einem ausgeprägten Intensitätsmaximum seiner Lichtverteilung längs seiner Lichtbündelachse verwendet wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet,
daß ein Abbildungslichtbündel mit einem ausgeprägten Intensitätsmaximum seiner Lichtverteilung längs seiner Lichtbündelachse verwendet wird.

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

7. Vorrichtung zur mehrdimensionalen Vermessung eines Objektes, insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
mit einer Beleuchtungseinrichtung zur Erzeugung eines Beleuchtungslichtbündels,
mit einer ersten Ablenkungseinrichtung mindestens für das Beleuchtungslichtbündel zum Ablenken des Beleuchtungslichtbündels in vorgebbare Beleuchtungsrichtungen und zum Erzeugen einer Folge von Beleuchtungsflecken auf dem zu vermessenden Objekt, mit einer Abbildungseinrichtung zur Abbildung der einzelnen Beleuchtungsflecke mit einem Abbildungslichtbündel auf eine Empfängereinrichtung und
mit einer mindestens mit der ersten Ablenkungseinrichtung und der Empfängereinrichtung verbundenen Auswerteeinrichtung, dadurch gekennzeichnet,
daß eine zweite Ablenkungseinrichtung (7;26;43) für das Abbildungslichtbündel vorgesehen ist, die mit der ersten Ablenkungseinrichtung (7;26;42) gekoppelt ist,
daß die Empfängereinrichtung (13) der zweiten Ablenkungseinrichtung (7;26;43) im Strahlengang des Abbildungslichtbündels nachgeschaltet ist und Empfängerelemente längs einer Linie aufweist, wobei die Linie einen Schnittpunkt (S') mit der optischen Achse (49) der Abbildungseinrichtung (43,44) hat und in einer Ebene liegt, die nach der zweiten Ablenkungseinrichtung (7;26,43) von den Achsen der Abbildungslichtbündel von Beleuchtungsflecken aufgespannt ist,
daß die Kopplung der ersten und zweiten Ablenkungseinrichtung (7;26,42,43) so ausgelegt ist, daß die Abbildung von Beleuchtungsflecken eines Referenzobjektes (10;39;50) auf die Linie der Empfängerelemente (31) unter einem bestimmten Referenzwinkel zur optischen Achse (49) der Abbildungseinrichtung (43,44) erfolgt und

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

daß die Abbildung eines Beleuchtungsfleckes (29) auf dem zu vermessenden Objekt (27) auf die Linie der Empfängerelemente (31) unter einem Winkel zur optischen Achse der Abbildungseinrichtung erfolgt, wobei aus dem jeweiligen Winkelabstand zum Referenzwinkel und der Richtung der Achse des jeweiligen Beleuchtungslichtbündels in der Auswerteinrichtung der Koordinatenabstand des Beleuchtungsfleckes auf dem zu vermessenden Objekt in Richtung der Achse des jeweiligen Beleuchtungslichtbündels gegenüber dem Referenzobjekt bestimmbar ist.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Linie der Empfängerelemente (13;31) die optische Achse (49) der Abbildungseinrichtung im Empfangsbereich in einem Punkt (S') schneidet, der durch Abbildung eines Schnittpunktes (S) der Achse des jeweiligen Beleuchtungslichtbündels (45) mit der jeweiligen optischen Achse (47) der im Strahlengang vor der zweiten Ablenkungseinrichtung (43) vorgesehenen Abbildungseinrichtung (43,44) entsteht, und
daß die Linie der Empfängerelemente (13;31) gegen die optische Achse (49) der der zweiten Ablenkungseinrichtung (43) nachgeschalteten Abbildungseinrichtung so geneigt ist, daß der Tagens des Neigungswinkels φ' ($\tan \varphi'$) multipliziert mit dem Abbildungsmaßstab ß der Abbildungseinrichtung (43,44) gleich dem Tangens des Winkels φ ist, unter dem das jeweilige Beleuchtungslichtbündel (45) die jeweilige optische Ache(47)der Abbildungseinrichtung im Objektbereich schneidet, d.h. daß $ß \cdot \tan \varphi' = \tan \varphi$ ist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Linie der Empfängerelemente (13;31) geradlinig angeordnet ist.

10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Kopplung der ersten und der zweiten Ablenkungseinrichtung (7;26;42,43) miteinander winkelstarr ausgebildet ist.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die erste und zweite Ablenkungseinrichtung als ein Ablenkspiegel (7;26) mit gemeinsamer Drehachse ausgebildet sind.

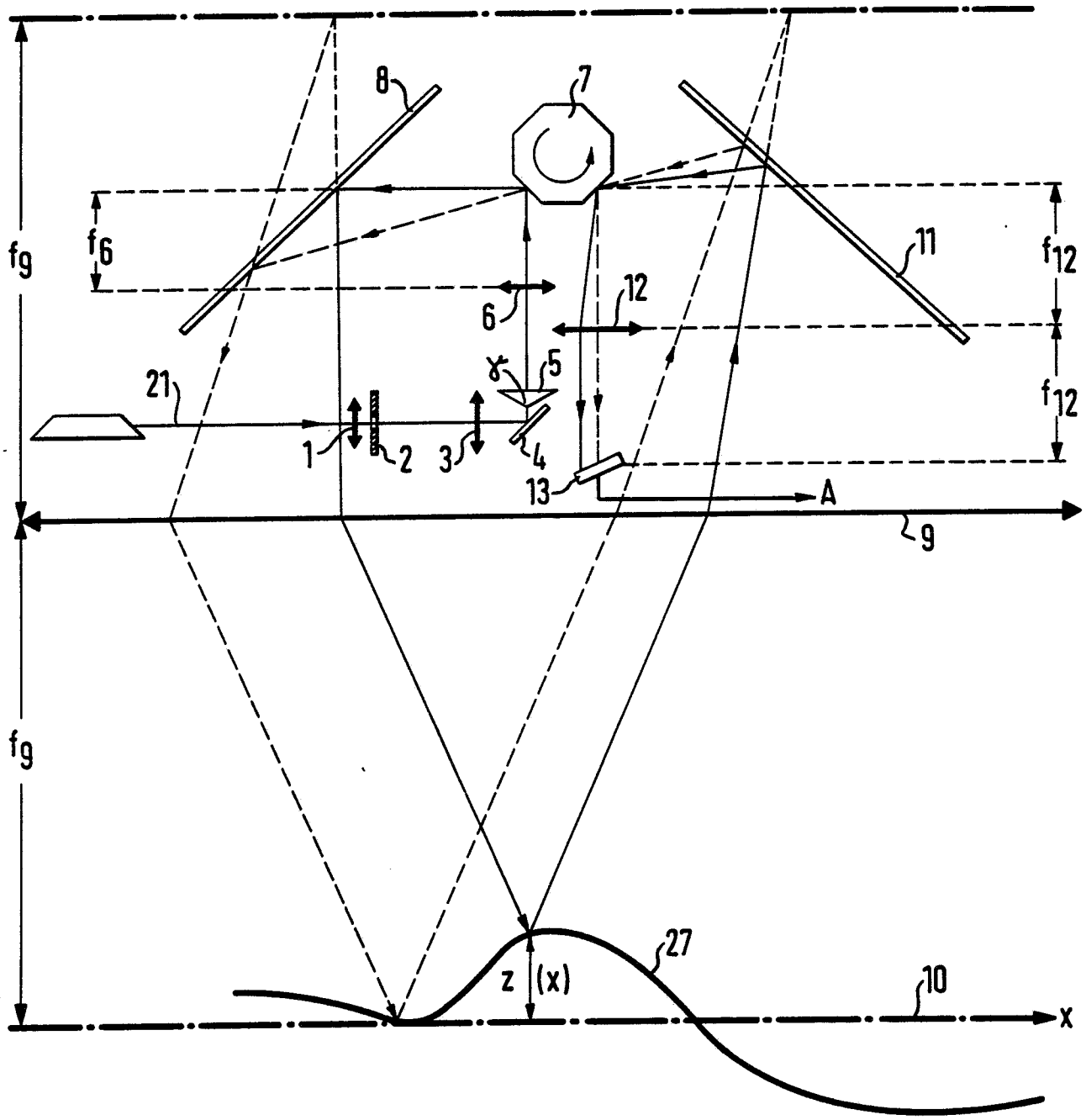
12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß in den Strahlengang des Beleuchtungslichtbündels eine Einrichtung (5) zur Schärfentiefenerweiterung, insbesondere ein Axicon (5) , eine Ringpupille oder eine Verschiebeeinrichtung zum schnellen Verschieben des Fokus des Beleuchtungslichtbündels längs der optischen Achse, zwischengeschaltet ist,

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß in den Strahlengang des Abbildungslichtbündels eine Einrichtung zur Schärfentiefenerweiterung, insbesondere ein Axicon, eine Ringpupille oder eine Verschiebeeinrichtung zum schnellen Verschieben des Fokus des Abbildungslichtbündels längs der optischen Achse, zwischengeschaltet ist.

14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzeugung telezentrischer Beleuchtungslichtbündel und telezentrischer Abbildungslichtbündel im Objektbereich, eine optische Einrichtung (1,2,3,4,5,6,7,8,9; 9,11,7,12) im Strahlengang zwischen den Ablenkungseinrichtungen (7) und dem zu vermessenden Objekt vorgesehen ist.

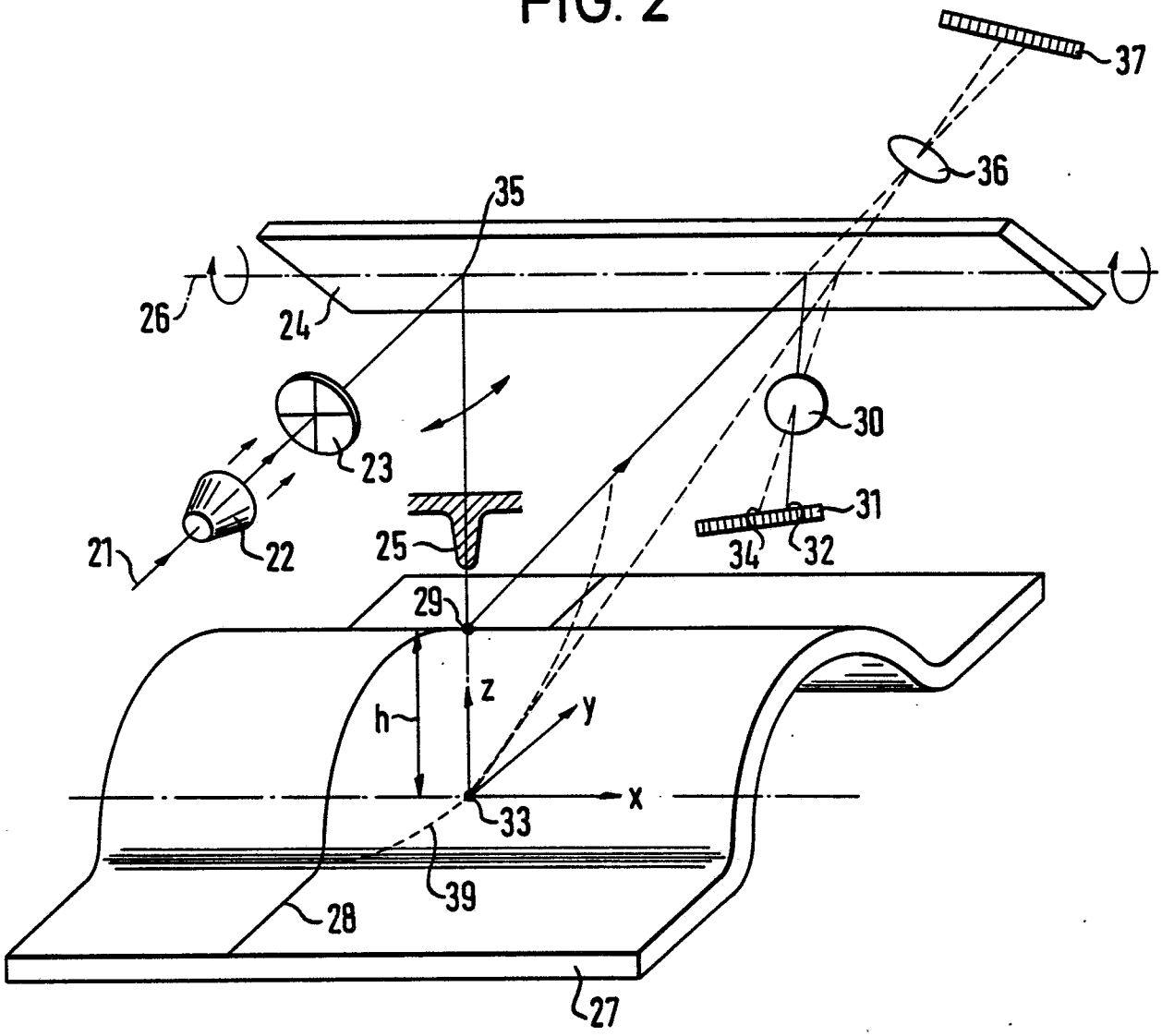
BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

FIG. 1



BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

FIG. 2



BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

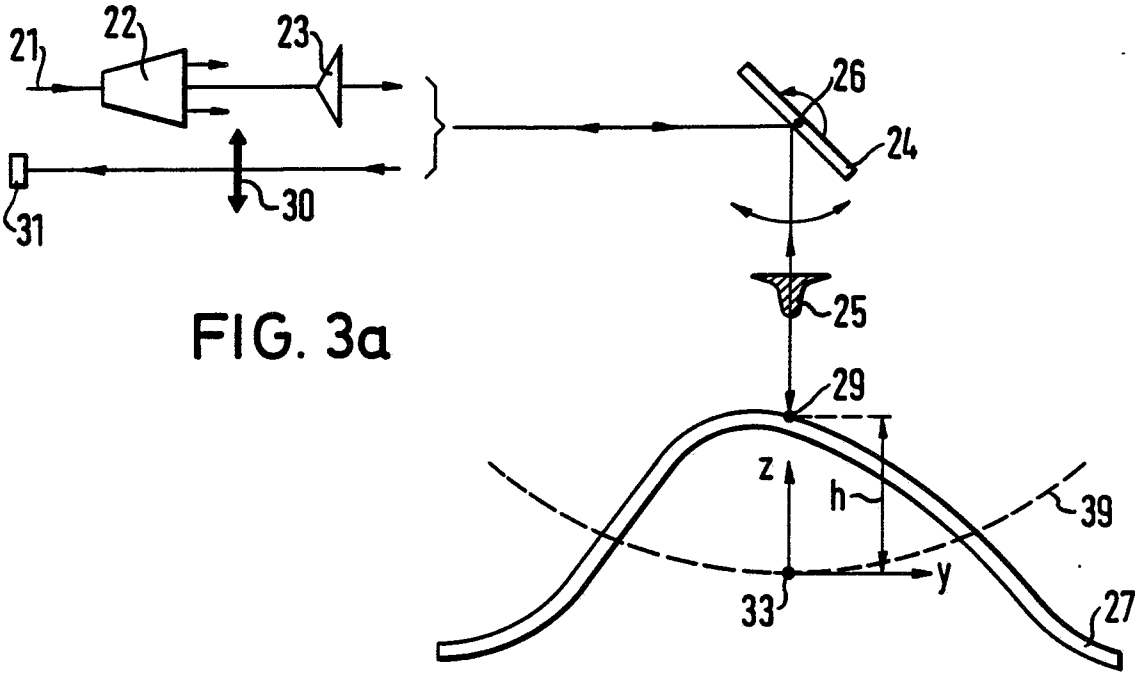


FIG. 3a

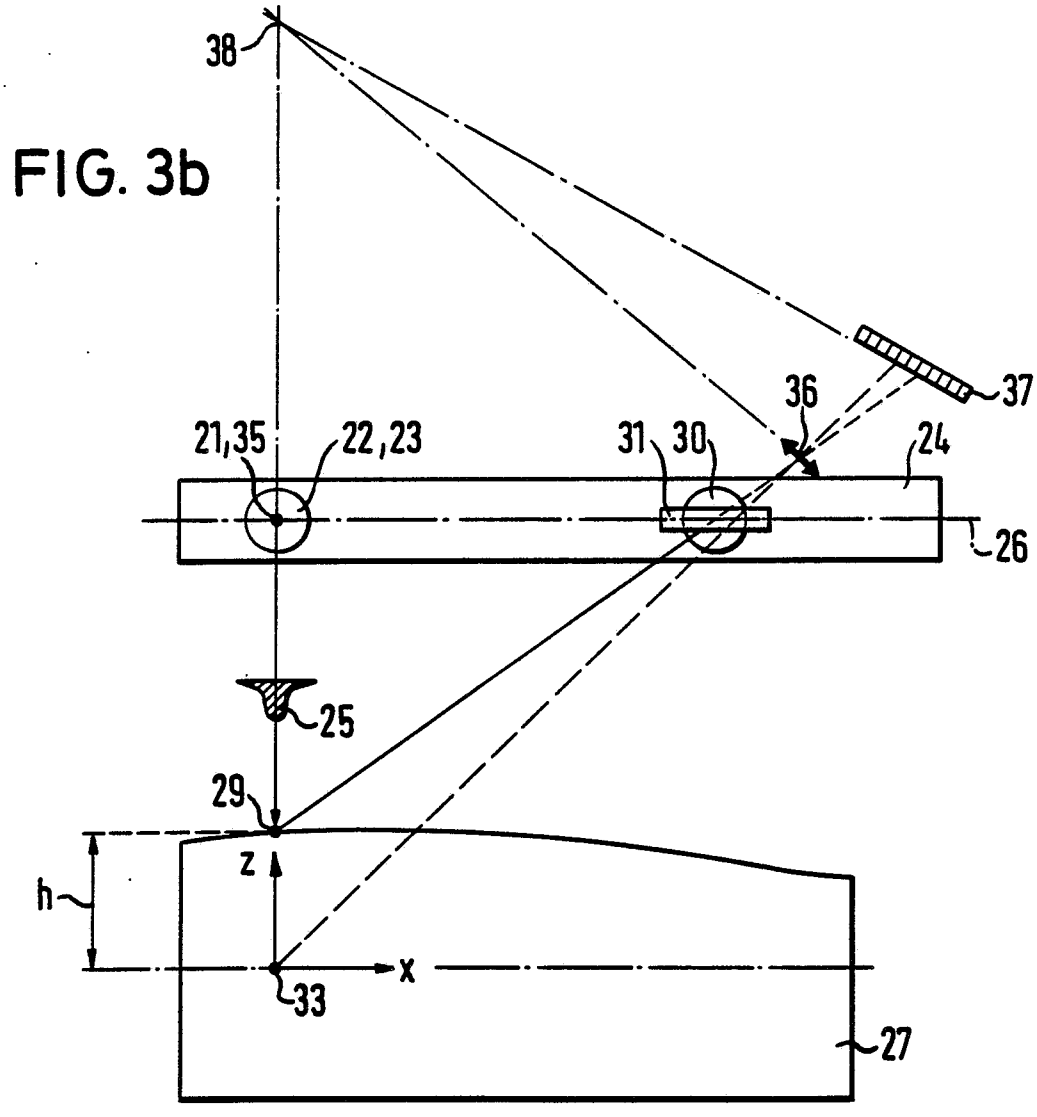
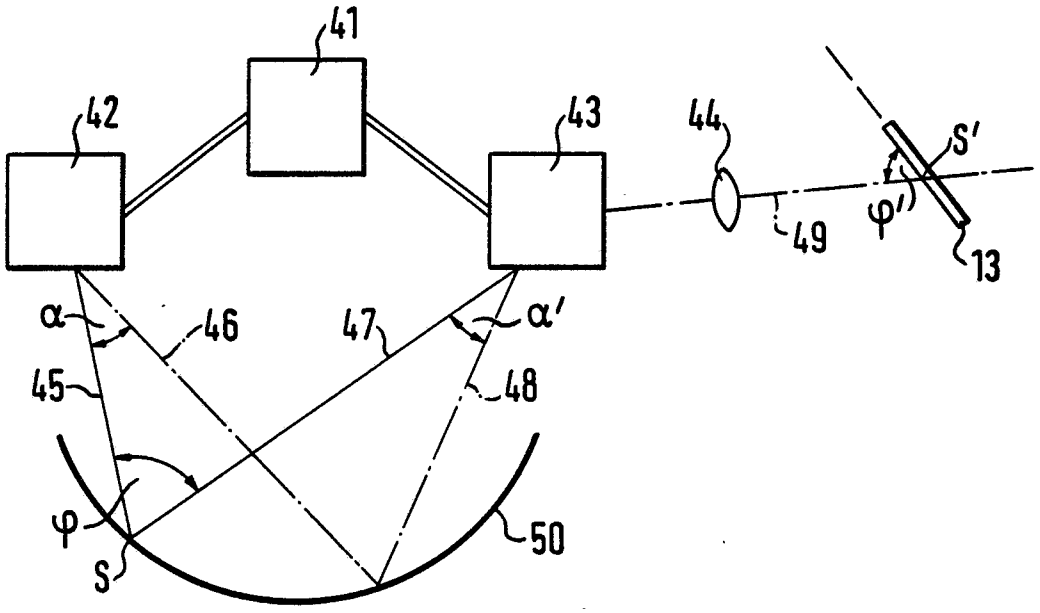


FIG. 3b

BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL

FIG. 4



BUREAU OMPI WIPO INTERNATIONAL