



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) **CH 715 045 B1**

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-lichtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

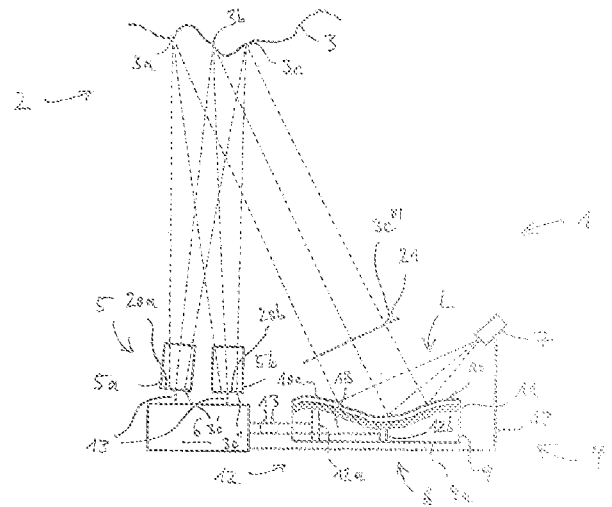
(51) Int. Cl.: **G01B 11/25** (2006.01)
G02B 7/185 (2021.01)
G02B 26/08 (2006.01)
G02B 27/18 (2006.01)

(12) **PATENTSCHRIFT**

(21) Anmeldenummer:	00690/19	(73) Inhaber:	Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Hansastrasse 27 c 80686 München (DE)
(22) Anmeldedatum:	25.05.2019	(72) Erfinder:	Anika Brahm c/o Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, 07745 Jena (DE) Claudia Reinlein c/o Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, 07745 Jena (DE) Ingo Gebhart c/o Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, 07745 Jena (DE)
(43) Anmeldung veröffentlicht:	29.11.2019	(74) Vertreter:	Dr. Lusuardi AG, Kreuzbühlstrasse 8 8008 Zürich (CH)
(30) Priorität:	28.05.2018 DE 10 2018 208 417.8		
(24) Patent erteilt:	31.10.2022		
(45) Patentschrift veröffentlicht:	31.10.2022		

(54) **Projektionsvorrichtung und Projektionsverfahren.**

(57) Die Erfindung betrifft eine Projektionsvorrichtung (4), umfassend: eine Beleuchtungseinheit (7) zum Emittieren von Licht (L); und eine Projektionseinheit (8) mit einer Spiegeloberfläche, wobei die Projektionseinheit (8) eingerichtet ist, das von der Beleuchtungseinheit (7) emittierte Licht (L) mittels der Spiegeloberfläche in einen Objektraum (2) zu projizieren und im Objektraum (2) zu unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern (16a, 16b) zu formen. Die Projektionsvorrichtung (4) zeichnet sich dadurch aus, dass die Spiegeloberfläche wenigstens bereichsweise verformbar ist und die Projektionseinheit (8) zum Formen der unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmuster (16a, 16b) im Objektraum (2) wenigstens einen Aktuator (12a, 12b) zum wenigstens bereichweisen Verformen der Spiegeloberfläche aufweist. Die Erfindung betrifft ferner ein Projektionsverfahren sowie eine Vorrichtung (1) und ein Verfahren zum Erfassen einer dreidimensionalen Kontur (3).



Beschreibung

[0001] Das vorliegende Dokument betrifft vornehmlich eine Projektionsvorrichtung und ein Projektionsverfahren. Das Dokument betrifft ferner eine Vorrichtung zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur, die die genannte Projektionsvorrichtung enthält, sowie ein Verfahren zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur, das die Verfahrensschritte des genannten Projektionsverfahrens umfasst.

[0002] Aus dem Stand der Technik sind verschiedene Vorrichtungen und Verfahren zum Erfassen dreidimensionaler Konturen bekannt. Siehe dazu z. B.: ZHANG, Song: Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques. In: Optics and Lasers in Engineering 48 (2010) Nr. 2, S. 149 - 158.

[0003] Typischerweise werden dabei eine oder zwei Kameras (z. B. in einer Stereovisions-Anordnung) zur Beobachtung eines Objekts verwendet, wobei das Objekt z. B. mittels sequentieller oder kontinuierlicher Musterprojektionsverfahren ausgeleuchtet werden kann. Beispiele derartiger Verfahren sind Binärcode-, Phase-Shift, Gitter-, Speckle- oder Hybrid-Verfahren). In Kenntnis der Geometrie des Systems kann dann anhand der mittels der Kameras aufgenommenen Bilder des Objekts mit den auf die Oberfläche des Objekts projizierten strukturierten Lichtmustern mittels Triangulation eine dreidimensionale Kontur des Objekts rekonstruiert bzw. berechnet werden.

[0004] Einen wichtigen Aspekt bilden dabei die Vorrichtungen und Verfahren zum Projizieren der strukturierten Lichtmuster auf die zu vermessende dreidimensionale Kontur. Diese Projektionsvorrichtungen und -verfahren bestimmen oft maßgeblich das Anwendungsszenario und die Rekonstruktionsergebnisse.

[0005] Aus DE102011010265A1 und DE19633686C2 sind beispielsweise Projektionsvorrichtungen bekannt, die nach den Prinzipien der Reflexion und Ablenkung von Licht mittels kippender Mikrospiegel eine definierte Intensitätsverteilung im Objektraum bzw. Messvolumen erzeugen. Ebenso ist es bekannt, zur Projektion strukturierter Lichtmuster absorbierende optische Komponenten wie Flüssigkristallbildschirme (LCD, LCOS), Dias oder Masken) zu verwenden.

[0006] Aus DE102012002161A1 sind Projektionsvorrichtungen bekannt, die z. B. von einem Laser emittiertes Licht mittels einer Streuscheibe und eines akustooptischen Modulators zu statistischen Mustern formen, insbesondere in Form von Speckle-Mustern.

[0007] DE102013013791A1 beschreibt die Projektion mittels Mikrolinsenarrays.

[0008] DE102015208285A1 beschreibt ein Projektionsverfahren, bei dem ein Musterrad aus Metall als strukturgebendes Element zum Einsatz kommt. Alternative kann auch Glas mit einer Chrombeschichtung verwendet werden.

[0009] US6028672A beschreibt die Projektion strukturierter Lichtmuster mittels diffraktiver Elemente.

[0010] Und DE102011014779A1 offenbart eine Vorrichtung zur Vermessung von Entfernungen und/oder räumlichen Koordinaten eines Gegenstandes mit einer Freiformoptik, die derart ausgebildet ist, dass von einer Beleuchtungseinheit emittiertes Licht mittels einer Freiformoberfläche der Freiformoptik zu einem räumlich strukturierten Lichtmuster in eine Objektebene gelenkt wird.

[0011] Diese bisher bekannten Projektionsvorrichtungen und Projektionsverfahren weisen jedoch gewöhnlich jeweils mindestens einen der folgenden Nachteile auf:

- Sie beinhalten mehrere optische Komponenten zur Strahlführung, Strahlformung und Projektion. Das erhöht den für die Justage nötigen Arbeitsaufwand, die Kosten und die Komplexität des Systems.
- Sie arbeiten nicht verlustfrei; z. B. können bei der Transmission des zur Erzeugung der strukturierter Lichtmuster verwendeten Lichtes durch optische Komponenten (beispielsweise in Form von Masken oder Dias) Leistungsverluste von bis zu 50 Prozent auftreten.
- Sie sind jeweils nur zur Projektion eines festen Lichtmustertyps geeignet, der durch die verwendeten optischen Komponenten festgelegt ist. Zur Variation des Projektionsmusters müssen dann beispielsweise Masken, Dias oder andere optische Komponenten mittels eines Antriebs translatorisch oder rotatorisch bewegt werden, wobei der Lichtmustertyp jedoch oft unverändert bleibt. Auch dies kann die Komplexität des Systems erheblich erhöhen.
- Sie sind jeweils nur für einen begrenzten Lichtwellenlängenbereich geeignet, z. B. nur für den sichtbaren Spektralbereich (VIS) oder für den nahinfraroten Spektralbereich (NIR). Oft ist ein Wechsel des Spektralbereichs vom UV zum IR oder umgekehrt bedingt durch die für die Strahlformung verwendeten optischen Komponenten und deren wellenlängenabhängiges Transmissionsverhalten nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich.

[0012] Es besteht also Bedarf an Projektionsvorrichtungen und Projektionsverfahren, die zur Projektion von Licht aus einem möglichst breiten Spektralbereich geeignet sind, die möglichst geringe optische Leistungsverluste aufweisen und die mit möglichst geringem Zeit- und Kostenaufwand herstellbar bzw. durchführbar sind. Zudem sollen sie geeignet sein, möglichst schnell eine möglichst große Vielzahl unterschiedlicher strukturierter Lichtmuster zu projizieren, so dass sie z. B. bei Verfahren zum berührungslosen Erfassen dreidimensionaler Konturen beweglicher oder schnell beweglicher Objekte zum Einsatz kommen können.

[0013] Eine Projektionsvorrichtung und ein Projektionsverfahren sowie eine Vorrichtung und ein Verfahren zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur, die dies leisten, sind in den unabhängigen Ansprüchen und in den nebengeordneten Ansprüchen wiedergegeben. Die abhängigen Ansprüche beschreiben spezielle Ausführungsformen.

[0014] Vorgeschlagen wird also eine Projektionsvorrichtung, umfassend:

eine Beleuchtungseinheit zum Emittieren von Licht; und

eine Projektionseinheit mit einer Spiegeloberfläche, wobei die Projektionseinheit eingerichtet ist, das von der Beleuchtungseinheit emittierte Licht mittels der Spiegeloberfläche in einen Objektraum zu projizieren und im Objektraum zu unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern zu formen.

[0015] Die Projektionsvorrichtung zeichnet sich dadurch aus, dass die Spiegeloberfläche wenigstens bereichsweise verformbar ist und dass die Projektionseinheit zum Formen der unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmuster im Objektraum wenigstens einen Aktuator zum wenigstens bereichsweisen Verformen der Spiegeloberfläche aufweist.

[0016] Die hier vorgeschlagene Projektionsvorrichtung weist einen besonders geringen Grad an Komplexität auf, da neben der verformbaren Spiegeloberfläche nicht notwendigerweise weitere optische Komponenten zur Strahlformung oder zur Strahlführung benötigt werden. Die Projektionsvorrichtung ist somit kompakt, einfach justierbar, stabil und vergleichsweise schnell und zu geringen Kosten herstellbar.

[0017] Da das Projizieren der räumlich strukturieren Lichtmuster nur durch Reflexion an der Spiegeloberfläche vorgenommen wird oder vorgenommen werden kann, ist die Projektionsvorrichtung ferner zum Projizieren von Licht eines breiten Wellenlängenbereichs geeignet. Z. B. muss bei geeigneter Wahl des Materials der Spiegeloberfläche keine Anpassung der Projektionseinheit vorgenommen werden, wenn die Wellenlänge des Lichts, das zum Formen der räumlich strukturierten Lichtmuster verwendet wird, von UV zu IR geändert wird. Zudem ist das Formen der räumlich strukturierten Lichtmuster mittels Reflexion gegenüber Verfahren, bei denen zum Formen von Lichtmustern transmittierende optische Elemente verwendet werden, besonders verlustarm und damit besonders Effizient. So können z. B. ohne Qualitätsverlust Lichtquellen mit geringerer Leistung verwendet werden. Dies kann die Betriebskosten verringern und die Lebensdauer insbesondere der Lichtquelle verlängern.

[0018] Da das Formen der unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmuster im Objektraum nur über das Verformen der Spiegeloberfläche vorgenommen wird oder vorgenommen werden kann, kann eine große Vielzahl verschiedener strukturierter Lichtmuster sehr schnell und mit geringem Energieaufwand projiziert werden, ohne dass aufwendige Veränderungen an der Projektionsvorrichtung vorgenommen werden müssen. Beispielsweise können bei Verwendung entsprechender Aktuatoren Sequenzen unterschiedlicher strukturierter Lichtmuster mit Projektionsfrequenzen im kHz-Bereich projiziert werden. Abhängig von der Geometrie des Projektionsprozesses kann es z. B. ausreichend sein, die Spiegeloberfläche nur um wenige Mikrometer oder sogar nur um wenige Nanometer zu verformen, um im Objektraum hinreichend verschiedene räumlich strukturierte Lichtmuster zu formen. Insbesondere ist das Formen der unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmuster durch Verformen der Spiegeloberfläche in der Regel auch besonders gut reproduzierbar.

[0019] Der Aktuator ist also derart ausgebildet, dass er wahlweise wenigstens in eine erste Stellung und in eine zweite Stellung gebracht werden kann. Der wenigstens eine Aktuator und die Spiegeloberfläche sind dann derart angeordnet und ausgebildet, dass die Spiegeloberfläche dann, wenn der wenigstens eine Aktuator in der ersten Stellung ist, eine erste Oberflächenform annimmt, und dass die Spiegeloberfläche dann, wenn der wenigstens eine Aktuator in der zweiten Stellung ist, eine von der ersten Oberflächenform verschiedene zweite Oberflächenform annimmt. Wenn die Spiegeloberfläche die erste Oberflächenform annimmt, ist sie eingerichtet, von der Beleuchtungseinheit emittiertes Licht im Objektraum zu einem ersten räumlich strukturierten Lichtmuster zu formen. Und wenn die Spiegeloberfläche die zweite Oberflächenform annimmt, ist sie eingerichtet, von der Beleuchtungseinheit emittiertes Licht im Objektraum zu einem zweiten räumlich strukturierten Lichtmuster zu formen, das von dem ersten räumlich strukturierten Lichtmuster verschieden ist.

[0020] Typischerweise ist der wenigstens eine Aktuator jedoch jeweils eingerichtet, in eine Vielzahl von mehr als nur zwei unterschiedlichen Stellungen gebracht zu werden. Z. B. kann der Aktuator kontinuierlich verstellbar sein. Die unterschiedlichen Stellungen des Aktuators können beispielsweise durch unterschiedliche räumliche Ausdehnungen des Aktuators gegeben sein oder mit diesen korrespondieren. Üblicherweise ist der wenigstens eine Aktuator derart angeordnet und ausgebildet, dass er jeweils in einer Richtung senkrecht oder im Wesentlichen senkrecht zur Spiegeloberfläche verstellbar ist, oder jeweils in einer Richtung senkrecht oder im Wesentlichen senkrecht zu demjenigen Bereich der Spiegeloberfläche, an dem er angreift oder zu dem er am nächsten angeordnet ist.

[0021] So ist es denkbar, dass der wenigstens eine Aktuator wenigstens ein Piezoelement, wenigstens einen Linearmotor oder wenigstens eine von einem Linearmotor antreibbare mechanische Stelleinheit umfasst. Insbesondere kann die Projektionseinheit auch eine Vielzahl von Aktuatoren umfassen. Die Aktuatoren können dann unabhängig voneinander verstellbar oder ansteuerbar sein. Z. B. können die Aktuatoren rotationssymmetrisch bezüglich einer Rotationsachse angeordnet sein. Die Rotationsachse kann derart angeordnet oder ausgerichtet sein, dass sie die Spiegeloberfläche schneidet. Wenn die Projektionseinheit mehr als einen Aktuator umfasst, können diese Aktuatoren z. B. derart angeordnet sein, dass die kürzesten Abstände zwischen benachbarten Aktuatoren jeweils weniger als 10 mm, weniger als 5 mm, weniger als 1 mm, weniger als 0,5 mm oder weniger als 0,1 mm betragen. Z. B. können die Aktuatoren als mikroelektronische oder mikroelektromechanische Bauelemente ausgebildet sein und mithilfe optischer Verfahren, insbesondere mithilfe optischer Lithographieverfahren hergestellt werden.

[0022] Die verformbare Spiegeloberfläche zum Formen der verschiedenen räumlich strukturierten Lichtmuster kann als Freiformspiegeloberfläche ausgebildet sein. Die Freiformspiegeloberfläche kann durch eine beliebige stetige, stetig - differenzierbare oder wenigstens abschnittsweise stetig differenzierbare Oberfläche gegeben sein. Basierend auf der Ausgestaltung der Beleuchtungseinheit und der relativen Anordnung der Beleuchtungseinheit und der Freiformspiegeloberfläche zueinander, insbesondere basierend auf der Strahlführung des von der Beleuchtungseinheit emittierten und an der Freiformspiegeloberfläche reflektierten Lichtes kann dreidimensionale Kontur der Freiformspiegeloberfläche, die zur Formung eines gewünschten räumlich strukturierten Lichtmusters im Objektraum erforderlich ist, berechnet werden. Entsprechende Verfahren zur Berechnung der dreidimensionalen Kontur der Freiformspiegeloberfläche werden beispielsweise in: BÖSEL, Christoph; GROSS, Herbert: Ray mapping approach for the efficient design of continuous freeform surfaces. In: Optics Express 24 (2016) Nr. 13, S. 14271-14282 beschrieben.

[0023] Zum Formen hochfrequenter Strukturen der räumlich strukturierten Lichtmuster kann die Spiegeloberfläche z. B. eine Mikrostrukturierung aufweisen. Dies kann beinhalten, dass die Spiegeloberfläche senkrecht zur Spiegeloberfläche Höhenvariationen oder lokale Höhenvariationen aufweist, die bis zu 10 µm, bis zu 20 µm, bis zu 50 µm, bis zu 100 µm, bis zu 200 µm oder bis zu 500 µm betragen können. Alternativ oder zusätzlich können die Höhenvariationen oder die lokalen Höhenvariationen der Mikrostrukturierung senkrecht zur Spiegeloberfläche eine Amplitude von wenigstens 0.5 µm oder von wenigstens 1 µm oder von wenigstens 5 µm oder von wenigstens 10 µm oder von wenigstens 20 µm oder von wenigstens 50 µm oder von wenigstens 100 µm haben. Parallel zur Spiegeloberfläche können diese Höhenvariationen der Spiegeloberfläche Abmessungen von bis zu bis zu 100 µm, bis zu 200 µm, bis zu 500 µm, bis zu 1 mm, bis zu 5 mm oder bis zu 10 mm haben.

[0024] Die Projektionseinheit kann zur Ausbildung der Spiegeloberfläche eine Substratschicht aufweisen, insbesondere eine metallische Substratschicht. Mit anderen Worten kann die Spiegeloberfläche durch eine Substratschicht gebildet sein, insbesondere durch eine metallische Substratschicht, bzw. durch die Oberfläche dieser Substratschicht. Eine Dicke dieser Substratschicht kann z. B. höchstens 1 mm, höchstens 0,5 mm oder höchstens 0,2 mm betragen.

[0025] Die Projektionseinheit kann an einer von der Spiegeloberfläche abgewandten Rückseite der Substratschicht wenigstens ein Verbindungselement oder wenigstens eine Verbindungsschicht aufweisen. Das wenigstens eine Verbindungselement oder die wenigstens eine Verbindungsschicht kann zum Übertragen einer Verformkraft von dem wenigstens einen Aktuator auf die Substratschicht zwischen dem wenigstens einen Aktuator und der Substratschicht angeordnet sein. Die wenigstens eine Verbindungsschicht kann z. B. wenigstens eine Klebstoffschicht oder wenigstens eine Metallschicht umfassen. Wenn die Verbindungsschicht als Metallschicht ausgebildet ist, kann sie insbesondere als Metallfolie oder als Lötsschicht ausgebildet sein. Die Verbindungselemente können ebenfalls aus Klebstoff oder aus Metall gebildet sein oder Klebstoff oder Metall umfassen.

[0026] Die Beleuchtungseinheit kann beispielsweise wenigstens eine LED und/oder wenigstens einen Laser umfassen. Es versteht sich jedoch, dass die Beleuchtungseinheit auch andere Lichtquellen umfassen kann. Laserlicht erlaubt wegen seiner hohen räumlichen Kohärenz z. B. eine besonders präzise Formung der zu projizierenden räumlich strukturierten Lichtmuster. Es ist jedoch auch denkbar, dass die Beleuchtungseinheit weitere optische Elemente zur Strahlformung oder Strahlkollimation umfasst, beispielsweise einen oder mehrere Spiegel, eine oder mehrere Linsen, einen oder mehrere optische Schalter oder dergleichen.

[0027] Vorgeschlagen wird ferner eine Vorrichtung zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur, umfassend:

eine Projektionsvorrichtung der zuvor beschriebenen Art;

wenigstens eine Kamera, vorzugsweise eine erste Kamera und eine zweite Kamera, zum Aufnehmen von Bildern eines im Objektraum angeordneten Objekts mit den mittels der Spiegeloberfläche auf das Objekt projizierten unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern; und

eine Auswerteeinheit zum Bestimmen einer dreidimensionalen Kontur eines im Objektraum angeordneten Objekts basierend auf Bilddaten von mittels der wenigstens einen Kamera aufgenommenen Bildern des Objekts, vorzugsweise von mittels der ersten Kamera und der zweiten Kamera aufgenommenen Bildern des Objekts, mit den mittels der Spiegeloberfläche auf das Objekt projizierten unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern.

[0028] Die Vorrichtung kann ferner eine Steuereinheit umfassen, die eingerichtet ist, den wenigstens einen Aktuator derart anzusteuern, dass der wenigstens eine Aktuator die Spiegeloberfläche zum Formen der unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmuster im Objektraum verformt. Typischerweise ist die Steuereinheit ferner zum Ansteuern der wenigstens einen Kamera, vorzugsweise zum Ansteuern der ersten Kamera und der zweiten Kamera, und ggf. auch zum Ansteuern der Beleuchtungseinheit eingerichtet. Die Steuereinheit kann dann eingerichtet sein, den wenigstens einen Aktuator und die wenigstens eine Kamera, vorzugsweise die erste Kamera und die zweite Kamera, derart anzusteuern, dass die wenigstens eine Kamera, vorzugsweise die erste Kamera und die zweite Kamera, für jedes räumlich strukturierte Lichtmuster der Vielzahl von unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern, das mittels der Spiegeloberfläche auf ein im Ob-

jektraum angeordnetes Objekt projiziert wird, jeweils wenigstens ein Bild des Objekts mit dem auf das Objekt projizierten räumlich strukturierten Lichtmuster aufzunehmen.

[0029] Insbesondere kann die Auswerteeinheit zum Erfassen oder zum Berechnen der dreidimensionalen Kontur des im Objektraum angeordneten Objekts eingerichtet sein, für eine Vielzahl von Objektpunkten des Objekts basierend auf den Bilddaten der mittels der wenigstens einen Kamera aufgenommenen Bilder, vorzugsweise basierend auf den Bilddaten der mittels der ersten Kamera und der zweiten Kamera aufgenommenen Bilder,

- jeweils Paare von einander und dem jeweiligen Objektpunkt entsprechenden Punkten in einer Bildebene der Kamera bzw. der ersten Kamera und in einer weiteren Ebene zu identifizieren, wobei die weitere Ebene
 - a) eine Bildebene der zweiten Kamera ist oder
 - b) eine der Spiegeloberfläche zugeordnete virtuelle Projektionsebene ist,
- und
- eine Tiefeninformation durch Triangulieren in Abhängigkeit von Positionen der einander und dem jeweiligen Objektpunkt entsprechenden Punkte in der Bildebene und in der weiteren Ebene zu ermitteln.

[0030] Das Identifizieren der Paare von einander und dem jeweiligen Objektpunkt entsprechenden Punkten in der Bildebene und in der weiteren Ebene kann auf bekannte Weise vorgenommen werden. Z. B. kann jedem Punkt in der Bildebene und in der weiteren Ebene basierend auf der mittels der wenigstens einen Kamera aufgenommenen Folge von Bildern eine Folge von Helligkeitswerten oder ggf. eine Folge von Farbwerten zugeordnet werden, wobei die Werte der dem jeweiligen Punkt zugeordneten Folge von Helligkeitswerten bzw. von Farbwerten den in der Folge von Bildern an diesem Punkt detektierten Helligkeitswerten bzw. Farbwerten entspricht.

[0031] Ein gegebener Punkt in der Bildebene der Kamera bzw. der ersten Kamera kann dann z. B. mit einem diesem Punkt entsprechenden Punkt in der weiteren Ebene dadurch identifiziert werden, dass zunächst die dem gegebenen Punkt in der Bildebene der Kamera bzw. der ersten Kamera entsprechende Epipolarlinie in der weiteren Ebene bestimmt wird. Im nächsten Schritt kann dann für jeden auf dieser Epipolarlinie gelegenen Punkt in der weiteren Ebene die dem jeweiligen Punkt auf der Epipolarlinie zugeordnete Folge von Helligkeitswerten bzw. von Farbwerten mit derjenigen Folge von Helligkeitswerten bzw. von Farbwerten korreliert werden, die dem gegebenen Punkt in der Bildebene der Kamera bzw. der ersten Kamera zugeordnet ist. Als der Punkt der weiteren Ebene, der dem gegebenen Punkt in der Bildebene der Kamera bzw. der ersten Kamera entspricht, wird dann z. B. derjenige Punkt auf der entsprechenden Epipolarlinie in der weiteren Ebene identifiziert, für den diese Korrelation einen maximalen Wert hat. Mögliche Implementierungen dieses Verfahrens werden beispielsweise in WO2015022384A1 oder in DE102012013079A1 beschrieben.

[0032] Auf diese Weise kann die Auswerteeinheit für jeden der Vielzahl von Objektpunkten, die auf der dreidimensionalen Kontur des Objekts liegen, drei Raumkoordinaten bestimmen, die die Position dieses Objektpunkts im Raum definieren. Aus diesen dreidimensionalen Raumkoordinaten der Vielzahl von Objektpunkten kann die Auswerteeinheit dann die dreidimensionale Kontur des Objekts wenigstens näherungsweise rekonstruieren. Dazu kann die Auswerteeinheit z. B. zusätzlich bekannte Interpolations- oder Glättungsalgorithmen einsetzen.

[0033] Vorgeschlagen wird außerdem ein Projektionsverfahren, das wenigstens die folgenden Schritte umfasst:

Formen eines ersten räumlich strukturierten Lichtmusters in einem Objektraum durch Reflexion von Licht an einer Spiegeloberfläche mit einer ersten Oberflächenform;

wenigstens bereichsweises Verformen der Spiegeloberfläche, so dass die Spiegeloberfläche eine von der ersten Oberflächenform verschiedene zweite Oberflächenform annimmt; und

Formen eines von dem ersten räumlich strukturierten Lichtmuster verschiedenen zweiten räumlich strukturierten Lichtmusters im Objektraum durch Reflexion von Licht an der Spiegeloberfläche mit der zweiten Oberflächenform.

[0034] Das Verformen der Spiegeloberfläche kann mittels wenigstens eines Aktuators vorgenommen werden, vorzugsweise durch Verändern einer Piezospaltung eines Piezoelements oder durch Verstellen eines Linearmotors. Der Linearmotor kann zum wenigstens bereichsweisen Verformen der Spiegeloberfläche z. B. über eine mechanische Stelleinheit mit der Spiegeloberfläche gekoppelt sein. Zum Verformen der Spiegeloberfläche kann diese an verschiedenen Positionen der Spiegeloberfläche verformt werden, insbesondere gleichzeitig. Z. B. kann die Spiegeloberfläche an verschiedenen relativ zueinander rotationssymmetrisch angeordneten Positionen der Spiegeloberfläche verformt werden.

[0035] Ferner wird ein Verfahren zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur vorgeschlagen, das wenigstens die folgenden Schritte umfasst:

Projizieren von unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern auf ein in einem Objektraum angeordnetes Objekt, und zwar gemäß dem zuvor beschriebenen Projektionsverfahren;

Aufnehmen von Bildern des Objekts mit den auf das Objekt projizierten unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern mittels wenigstens einer Kamera, vorzugsweise mittels einer ersten Kamera und einer zweiten Kamera; und

Bestimmen einer dreidimensionalen Kontur des Objekts basierend auf Bilddaten der mittels der wenigstens einen Kamera aufgenommenen Bilder, vorzugsweise basierend auf Bilddaten der mittels der ersten Kamera und der zweiten Kamera aufgenommenen Bilder.

[0036] Bei dem Verfahren zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur können das Verformen der Spiegeloberfläche zum Formen der unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmuster und das Aufnehmen der Bilder des Objekts mittels der wenigstens einen Kamera, vorzugsweise mittels der ersten Kamera und der zweiten Kamera, derart synchron vorgenommen werden, dass die wenigstens eine Kamera, vorzugsweise die erste Kamera und die zweite Kamera, für jedes der Vielzahl von unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern, das auf das Objekt projiziert wird, jeweils wenigstens ein Bild des Objekts mit dem auf das Objekt projizierten räumlich strukturierten Lichtmuster aufnimmt bzw. aufnimmt.

[0037] Ferner können bei dem Verfahren zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur für eine Vielzahl von Objektpunkten des Objekts basierend auf den Bilddaten der mittels der wenigstens einen Kamera aufgenommenen Bilder, vorzugsweise basierend auf den Bilddaten der mittels der ersten Kamera und der zweiten Kamera aufgenommenen Bilder,

- jeweils Paare von einander und dem jeweiligen Objektpunkt entsprechenden Punkten in einer Bildebene der Kamera bzw. der ersten Kamera und in einer weiteren Ebene identifiziert werden, wobei die weitere Ebene
 - a) eine Bildebene der zweiten Kamera ist oder
 - b) eine der Spiegeloberfläche zugeordnete virtuelle Projektionsebene ist,
- und
- eine Tiefeninformation durch Triangulieren in Abhängigkeit von Positionen der einander und dem jeweiligen Objektpunkt entsprechenden Punkte in der Bildebene und in der weiteren Bildebene ermittelt werden.

[0038] Das Identifizieren einander entsprechender Punkte in der Bildebene der Kamera bzw. der ersten Kamera und in der weiteren Ebene kann z. B. in der oben beschriebenen Weise erläutert werden (siehe z. B. WO2015022384A1).

[0039] Ausführungsbeispiele der hier vorgeschlagenen Vorrichtungen und Verfahren sind in den Figuren dargestellt und werden anhand der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigt:

- Fig. 1 schematisch eine Vorrichtung zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur, wobei die Vorrichtung zum berührungslosen Erfassen der dreidimensionalen Kontur eine Projektionsvorrichtung mit einer verformbaren Spiegeloberfläche aufweist;
- Fig. 2a schematisch die Projektionsvorrichtung aus Fig. 1, wobei die verformbare Spiegeloberfläche zum Projizieren eines ersten strukturierten Lichtmusters derart verformt wird, dass sie eine erste Oberflächenform annimmt;
- Fig. 2b schematisch die Projektionsvorrichtung aus Fig. 2a, wobei die verformbare Spiegeloberfläche zum Projizieren eines zweiten strukturierten Lichtmusters derart verformt wird, dass sie eine zweite Oberflächenform annimmt;
- Fig. 3 schematisch eine Projektionseinheit der Projektionsvorrichtung aus Fig. 1 in perspektivischer Darstellung; sowie
- Fig. 4 schematisch ein Oberflächenprofil der verformbaren Spiegeloberfläche aus Fig. 3.

[0040] Fig. 1 zeigt schematisch eine Vorrichtung 1 zum berührungslosen Erfassen oder Vermessen einer in einem Objektraum 2 angeordneten dreidimensionalen Kontur 3. Die Vorrichtung 1 umfasst eine Projektionsvorrichtung 4, eine Detektionseinheit 5 mit einer ersten Kamera 5a und einer zweiten Kamera 5b sowie eine Steuer- und Auswerteeinheit 6. Bei alternativen Ausführungsformen der Vorrichtung 1 kann die Detektionseinheit 5 jedoch gegebenenfalls nur eine einzige Kamera aufweisen, z. B. nur die erste Kamera 5a.

[0041] Die Projektionsvorrichtung 4 weist eine Beleuchtungseinheit 7 und eine Projektionseinheit 8 auf. Hier umfasst die Beleuchtungseinheit 7 z. B. eine Lichtquelle in Gestalt eines Lasers, der sichtbares grünes Licht einer Wellenlänge von etwa 530 nm emittiert. Die Beleuchtungseinheit 7 kann jedoch auch eine andere Lichtquelle als einen Laser aufweisen, z. B. eine oder mehrere LED's, eine Quecksilberdampfampe oder dergleichen. Ebenso kann die Beleuchtungseinheit 7 bei alternativen Ausführungsformen eine Lichtquelle aufweisen, die Licht mit einer Wellenlänge außerhalb des sichtbaren Spektralbereichs emittiert, z. B. im UV, im NIR oder im IR. Bei alternativen Ausführungsformen kann die Beleuchtungseinheit 7 zusätzlich ein oder mehrere optische Elemente zur Strahlformung oder zur Strahlkollimation aufweisen, z. B. in Form von Spiegeln und/oder Linsen. Diese optischen Elemente sind dann typischerweise zwischen der Lichtquelle der Beleuchtungseinheit 7 und der Spiegeloberfläche der Projektionseinheit 8 angeordnet.

[0042] Die Projektionseinheit 8 umfasst hier ein Gehäuse 9, eine verformbare oder wenigstens bereichsweise verformbare metallische Substratschicht 10, die eine Freiformspiegeloberfläche 10a bildet und die das Gehäuse 9 bereichsweise abschließt, eine Verbindungsschicht 11, die an einer von der Freiformspiegeloberfläche 10a abgewandten Rückseite der Substratschicht 10 angeordnet ist, sowie eine Aktuatoreinheit 12 mit einem ersten Aktuator 12a und einem zweiten Aktuator 12b. Bei alternativen Ausführungsformen kann anstelle der Freiformspiegeloberfläche 10a auch eine „herkömmliche“ Spiegeloberfläche vorgesehen sein, beispielsweise eine ebene, parabolische oder hyperbolische Spiegeloberfläche. Bei alternativen Ausführungsformen kann die Aktuatoreinheit 12 auch nur einen einzigen Aktuator oder mehr als zwei Aktuatoren aufweisen. Die Aktuatoreinheit 12 dient dazu, die Freiformspiegeloberfläche 10a zu verformen oder wenigstens bereichsweise zu verformen. Durch das Verformen oder das wenigstens bereichsweise Verformen der Substratschicht 10 bzw. der Freiformspiegeloberfläche 10a kann von der Beleuchtungseinheit 7 emittiertes und an der Freiformspiegeloberfläche 10a reflektiertes Licht L im Objektraum 2 zu unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern geformt werden, die dann auf die zu vermessende dreidimensionale Kontur 3 projiziert werden können.

[0043] Die metallische Substratschicht 10 ist im vorliegenden Beispiel z. B. aus Aluminium gebildet und hat eine maximale Dicke von weniger als 0,15 mm. Bei alternativen Ausführungsformen kann die Substratschicht 10 auch aus anderen Metallen oder Metalllegierungen gebildet sein und/oder eine andere maximale Dicke aufweisen, z. B. eine größere maximale Dicke. Bevorzugt werden zur Ausbildung der Freiformspiegeloberfläche 10a jedoch solche Materialien verwendet, die über einen möglichst breiten Spektralbereich eine möglichst große und möglichst konstante Reflektivität aufweisen. Die Freiformspiegeloberfläche 10a kann zudem eine Mikrostrukturierung 19 aufweisen, die weiter unten näher beschrieben wird (siehe Figuren 3 und 4). Eine Fläche der Freiformspiegeloberfläche 10a beträgt hier ca. 20 cm². Die Fläche der Freiformspiegeloberfläche 10a kann jedoch ebenso gut größer oder kleiner sein als 20 cm². Bevorzugt hat die Freiformspiegeloberfläche 10a eine runde, ovale, elliptische oder rechteckige Form. Es versteht sich jedoch, dass die Freiformspiegeloberfläche 10a auch andere Formen annehmen kann.

[0044] Die Freiformspiegeloberfläche 10a kann eine beliebige dreidimensionale Kontur haben. Gewöhnlich ist sie vollständig oder wenigstens abschnittsweise stetig oder stetig differenzierbar. Die dreidimensionale Kontur der Freiformspiegeloberfläche 10a kann abhängig davon gewählt oder hergestellt werden, welche Art von Lichtmuster sie im Objektraum 2 formen soll. Beispielsweise kann die dreidimensionale Kontur der Freiformspiegeloberfläche 10a zum Formen von periodischen oder aperiodischen Streifenmustern ausgebildet sein. Prinzipiell sind mit Freiformspiegeloberflächen der hier beschriebenen Art abhängig von der Ausgestaltung oder Formung ihrer Oberflächenkontur jedoch beliebige Typen räumlich strukturierter Lichtmuster formbar. Durch Verformen der dreidimensionalen Kontur der Freiformspiegeloberfläche 10a mittels der Aktuatoreinheit 12 sind die so geformten räumlich strukturierten Lichtmuster dann auf vielfältige Weise weiter veränderbar.

[0045] Die Verbindungsschicht 11 ist zwischen den Aktuatoren 12a, 12b der Aktuatoreinheit 12 angeordnet. Sie dient dazu, Verformungskräfte von den Aktuatoren 12a, 12b der Aktuatoreinheit 12 auf die verformbare Substratschicht 10, und insbesondere auf die verformbare Freiformspiegeloberfläche 10a zu übertragen. Die Verbindungsschicht 11 kann z. B. wenigstens eine Klebstoffschicht und/oder wenigstens eine Metallschicht umfassen. Diese Metallschicht kann z. B. als Lötsschicht ausgebildet sein oder durch eine Metallfolie gegeben sein. Eine maximale Dicke der Verbindungsschicht 11 kann beispielsweise weniger als 1 mm, weniger als 0,5 mm oder weniger als 0,2 mm betragen. Die Dicke der Verbindungsschicht 11 kann jedoch ebenso gut größere Werte annehmen. Im Allgemeinen ist es jedoch vorteilhaft, wenn die Verbindungsschicht 11 möglichst dünn ist. So ist die Verformung der Substratschicht 10 bzw. der Freiformspiegeloberfläche 10a durch Betätigung der Aktuatoren 12a, 12b sehr genau einstellbar und reproduzierbar. Anstelle der hier gezeigten Verbindungsschicht 11 können auch nur einzelne Verbindungselemente vorgesehen sein (nicht gezeigt), die jeweils zwischen einem der Aktuatoren 12a, 12b und der Substratschicht 10 angeordnet und zum Vermitteln einer Verformkraft zwischen den Aktuatoren 12a, 12b und der Substratschicht eingerichtet sind. Diese Verbindungselemente können dann z. B. ebenfalls durch Klebstoff oder Metall gebildet sein.

[0046] Die Aktuatoren 12a und 12b der Aktuatoreinheit 12 sind im Gehäuse 9 angeordnet und stützen sich z. B. an einer Unterseite 9a des Gehäuses 9 ab. Das Gehäuse 9 kann z. B. aus Plastik, aus Metall oder auch aus einem anderen Material gebildet sein. Die Aktuatoren 12a und 12b können in einer Richtung senkrecht oder im Wesentlichen senkrecht zur Freiformspiegeloberfläche 10a eine verstellbare Ausdehnung haben. Beispielsweise können die Aktuatoren 12a, 12b jeweils ein oder mehrere Piezoelemente umfassen, deren Ausdehnung senkrecht oder im Wesentlichen senkrecht zur Freiformspiegeloberfläche 10a über eine Piezospaltung mit Nanometergenauigkeit verstellbar ist. Bei alternativen Ausführungsformen können die Aktuatoren 12a, 12b der Aktuatoreinheit 12 jeweils auch einen Linearmotor oder eine mecha-

nische Stelleinheit aufweisen, die über einen Linearmotor verstellbar ist. Abhängig von der Geometrie der Freiformspiegeloberfläche 10a, insbesondere abhängig von deren lateraler Ausdehnung, kann die Länge oder die Ausdehnung der Aktuatoren 12a, 12b in der Richtung senkrecht oder im Wesentlichen senkrecht zur Freiformspiegeloberfläche 10a ggf. um bis zu einige hundert Mikrometer oder um bis zu einige Millimeter verstellbar sein. Zur Stabilisierung der Projektionseinheit 8 kann ein zwischen der Verbindungsschicht 11 und der Unterseite 9a des Gehäuses 9 ausgebildeter Zwischenraum 18, in dem die Aktuatoren 12a, 12b angeordnet sind, z. B. zusätzlich mit einem elastischen oder wenigstens teilweise elastischen Füllmaterial gefüllt sein. Ebenso kann anstelle dieses Zwischenraums 18 eine weitere Schicht vorgesehen sein. Die Aktuatoren 12a, - 12b können dann z. B. in diese weitere Schicht eingebettet sein.

[0047] In einer Richtung parallel oder im Wesentlichen parallel zur Freiformspiegeloberfläche 10a sind die verschiedenen Aktuatoren 12a, 12b der Aktuatoreinheit 12 räumlich voneinander beabstandet, so dass eine von den Aktuatoren 12a, 12b auf die Substratschicht 10 bzw. auf die Freiformspiegeloberfläche 10a übertragbare Verformkraft an verschiedenen Positionen der Freiformspiegeloberfläche 10a angreift oder angreifen kann. So ist die Verformung der Freiformspiegeloberfläche 10a besonders genau einstellbar und reproduzierbar. Im hier gezeigten Ausführungsbeispiel der Aktuatoreinheit 12 beträgt ein maximaler Abstand zwischen benachbarten Aktuatoren 12a, 12b beispielsweise weniger als 1 cm. Bei alternativen Ausführungsformen kann der maximale Abstand zwischen benachbarten Aktuatoren aber auch kleiner sein als 1 mm, kleiner als 0,5 mm oder kleiner als 0,1 mm.

[0048] Die Kameras 5a, 5b der Detektionseinheit 5 können z. B. jeweils einen oder mehrere CCD Sensoren oder CMOS Sensoren aufweisen. Alternativ oder zusätzlich kann die Detektionseinheit 5 jedoch auch einen oder mehrere Bildsensoren anderer Bauart umfassen.

[0049] Die Steuer- und Auswerteeinheit 6 umfasst typischerweise einen programmierbaren Prozessor, z. B. in Form eines oder mehrerer Mikroprozessoren und/oder eines oder mehrerer FPGAs oder dergleichen. Die Steuer- und Auswerteeinheit 6 ist eingerichtet, wenigstens die Aktuatoreinheit 12 und die Detektionseinheit 5 anzusteuern, insbesondere also die Aktuatoren 12a, 12b und die Kameras 5a, 5b. Bei dem hier gezeigten Ausführungsbeispiel ist die Steuer- und Auswerteeinheit 6 zusätzlich eingerichtet, die Beleuchtungseinheit 7 anzusteuern. Die Steuer- und Auswerteeinheit 6 ist mit der Beleuchtungseinheit 7, mit den Aktuatoren 12a, 12b und mit den Kameras 5a, 5b jeweils über drahtgebundene oder drahtlose Kommunikationsverbindungen 13 verbunden.

[0050] Die Steuer- und Auswerteeinheit 6 ist eingerichtet, die Länge und/oder die Längenänderung der Aktuatoren 12a, 12b senkrecht oder im Wesentlichen senkrecht zur Freiformspiegeloberfläche 10a einzustellen und so die Oberflächenform oder dreidimensionale Kontur der Freiformspiegeloberfläche 10a möglichst genau und reproduzierbar zu formen oder zu verformen. Die Steuer- und Auswerteeinheit 6 ist vorzugsweise eingerichtet, die Zeitpunkte zu kontrollieren, zu denen die Aktuatoren 12a, 12b jeweils betätigt werden und/oder zu denen die Bildsensoren der Kameras 5a, 5b belichtet werden.

[0051] Die Steuer- und Auswerteeinheit 6 ist vorzugsweise zudem eingerichtet, die Aktuatoren 12a, 12b unabhängig voneinander anzusteuern, d. h. die Längen und/oder Längenänderungen der Aktuatoren 12a, 12b und/oder den Zeitpunkt dieser Längenänderung unabhängig voneinander zu kontrollieren. Abhängig von der Geometrie der Substratschicht 10 bzw. der Freiformspiegeloberfläche 10a und von der maximalen Längenänderung der Aktuatoren 12a, 12b können dem jedoch ggf. Grenzen gesetzt sein, z. B. um einer zu starken Verformung oder einer Beschädigung der Substratschicht 10 und der Freiformspiegeloberfläche 10a vorzubeugen.

[0052] In den Figuren 2a und 2b ist nur schematisch gezeigt, wie ein von der Projektionseinheit 8 im Objektraum 2 geformtes räumlich strukturiertes Lichtmuster durch Verformen der Freiformspiegeloberfläche 10a veränderbar ist. Dabei werden hier und im Folgenden wiederkehrende Merkmale jeweils mit denselben Bezugszeichen bezeichnet.

[0053] In Fig. 2a wird von der Beleuchtungseinheit 7 emittiertes Licht L an der Freiformspiegeloberfläche 10a reflektiert und in den Objektraum 2 projiziert, z. B. auf die im Objektraum 2 angeordnete dreidimensionale Kontur 3 aus Fig. 1. In Fig. 2a steuert die Steuer- und Auswerteeinheit 6 die Aktuatoren 12a, 12b derart an, dass diese senkrecht oder im Wesentlichen senkrecht zur Freiformspiegeloberfläche 10a erste Längen 14a, 14b haben. Die Freiformspiegeloberfläche nimmt damit in Fig. 2a eine erste Oberflächenform 15a an. Die erste Oberflächenform 15a der Freiformspiegeloberfläche 10a formt das von der Beleuchtungseinheit 7 emittierte Licht L im Objektraum 2 zu einem ersten Streifenmuster 16a, das hier nur beispielhaft durch ein periodisches Streifenmuster mit einer ersten Periodenlänge gegeben ist. Es versteht sich, dass die Freiformspiegeloberfläche 10a auch zum Formen anderer Lichtmuster ausgebildet sein kann.

[0054] In Fig. 2b wird von der Beleuchtungseinheit 7 emittiertes Licht L wiederum an der Freiformspiegeloberfläche 10a reflektiert und in den Objektraum 2 projiziert, z. B. auf die im Objektraum 2 angeordnete dreidimensionale Kontur 3 aus Fig. 1. In Fig. 2b steuert die Steuer- und Auswerteeinheit 6 die Aktuatoren 12a, 12b nun derart an, dass diese senkrecht oder im Wesentlichen senkrecht zur Freiformspiegeloberfläche 10a zweite Längen 17a, 17b haben, die von den in Fig. 2a gezeigten ersten Längen 14a, 14b verschieden sind. Die Freiformspiegeloberfläche nimmt damit in Fig. 2b eine zweite Oberflächenform 15b an, die von der in Fig. 2a gezeigten ersten Oberflächenform 15a verschieden ist. Die zweite Oberflächenform 15b der Freiformspiegeloberfläche 10a formt das von der Beleuchtungseinheit 7 emittierte Licht L im Objektraum 2 zu einem zweiten Streifenmuster 16b, das von dem in Fig. 2a gezeigten ersten Streifenmuster 16a verschieden ist. Z. B. kann das zweite Streifenmuster 16b eine zweite Periodenlänge haben, die von der ersten Periodenlänge des ersten Streifenmusters 16a verschieden ist. Alternativ oder zusätzlich kann das zweite Streifenmuster 16b z. B. auch aperiodisch sein oder dergleichen.

[0055] Es versteht sich, dass durch Verformen der Aktuatoren 12a, 12b der Aktuatoreinheit 12 auf diese Weise im Objektraum 2 eine große Vielzahl von unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern geformt werden und z. B. auf die dreidimensionale Kontur 3 projiziert werden kann. Die Steuer- und Auswerteeinheit 6 und die Aktuatoren 12a, 12b können z. B. derart ausgebildet sein, dass eine Frequenz, mit der die Längen der Aktuatoren 12a, 12b und damit eine räumliche Struktur der im Objektraum 2 geformten räumlich strukturierten Lichtmuster veränderbar sind, wenigstens 100 Hz, wenigstens 1 kHz oder wenigstens 10 kHz betragen kann.

[0056] Fig. 3 zeigt schematisch eine abgewandelte Ausführungsform der Projektionseinheit 8 in perspektivischer Darstellung. Die Projektionseinheit 8 gemäß Fig. 3 umfasst wiederum die Substratschicht 10 mit der Freiformspiegeloberfläche 10a, die Verbindungsschicht 11 sowie die Aktuatoreinheit 12 in Form einer weiteren Schicht, in welche die Aktuatoren beispielsweise eingebettet sein können. Alternativ kann die Aktuatoreinheit 12 gemäß Fig. 3 auch in Form einer oder mehrerer piezoelektrischer Schichten gegeben sein. In Fig. 3 ist zusätzlich eine Mikrostrukturierung 19 der Freiformspiegeloberfläche 10a hervorgehoben. Die Mikrostrukturierung 19 kann z. B. lokale Erhöhungen und Vertiefungen der Freiformspiegeloberfläche 19 umfassen. Diese lokalen Erhöhungen und Vertiefungen können senkrecht oder im Wesentlichen senkrecht zur Spiegeloberfläche beispielsweise Höhenvariationen von bis zu 10 µm bis zu 20 µm, bis zu 50 µm, bis zu 100 µm, bis zu 200 µm oder bis zu 500 µm umfassen. Alternativ oder zusätzlich können die Höhenvariationen oder die lokalen Höhenvariationen der Mikrostrukturierung 19 senkrecht zur Spiegeloberfläche eine Amplitude von wenigstens 0,5 µm oder von wenigstens 1 µm oder von wenigstens 5 µm oder von wenigstens 10 µm oder von wenigstens 20 µm oder von wenigstens 50 µm oder von wenigstens 100 µm haben. Parallel zur Spiegeloberfläche können diese Höhenvariationen der Spiegeloberfläche Abmessungen von bis zu bis zu 100 µm, bis zu 200 µm, bis zu 500 µm bis zu 1 mm, bis zu 5 mm oder bis zu 10 mm haben. Die Mikrostrukturierung dient dazu, räumlich hochfrequente Strukturen der in den Objektraum 2 zu projizierenden räumlich strukturierten Lichtmuster zu formen bzw. zu erzeugen.

[0057] Fig. 4 zeigt beispielhaft einen Schnitt durch die Freiformspiegeloberfläche 10a der Projektionseinheit 8 gemäß Fig. 3 mit einem lokalen Höhenprofil der Mikrostrukturierung 19 der Freiformspiegeloberfläche 10a, wobei die Schnittebene senkrecht zur Zeichenebene der Fig. 3 verlaufen soll. In Fig. 4 ist zu erkennen, dass die Höhe der Freiformspiegeloberfläche 10a in lateraler Richtung, d. h. parallel oder im Wesentlichen parallel zur Freiformspiegeloberfläche 10a (in Fig. 4 ist dies die x-Richtung), über eine Länge von 0,5 mm Höhenvariationen von ca. 10 Mikrometern aufweist und lokal über Längen von ca. 50 Mikrometern zusätzlich Höhenvariationen von weniger als 1 Mikrometer aufweist.

[0058] Mit der Vorrichtung 1 gemäß Fig. 1 kann ein Verfahren zum berührungslosen Erfassen der dreidimensionalen Kontur 3 durchgeführt werden. Dieses Verfahren umfasst wenigstens die folgenden Schritte:

Das von der Beleuchtungseinheit 7 emittierte Licht L wird an der Freiformspiegeloberfläche 10a reflektiert und nacheinander zu unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern geformt. Diese Vielzahl von unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern wird auf die dreidimensionale Kontur 3 im Objektraum 2 projiziert. Beispiele für derartige räumlich strukturierte Lichtmuster sind die in den Figuren 2a und 2b gezeigten Lichtmuster 16a und 16b. Z. B. können zum Durchführen des Verfahrens mehrere Hundert oder mehrere Tausend unterschiedliche räumlich strukturierte Lichtmuster nacheinander auf die dreidimensionale Kontur 3 projiziert werden. Das Formen der unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmuster umfasst das oben beschriebenen Verformen der Freiformspiegeloberfläche 10a mittels Längenänderung der Aktuatoren 12a, 12b, die durch die Steuer- und Auswerteeinheit 6 angesteuert werden.

[0059] Die Steuer- und Auswerteeinheit 6 steuert die Aktuatoren 12a, 12b und die Kameras 5a, 5b dabei derart synchron an, dass die Kameras 5a, 5b für jedes der Vielzahl von unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern, das auf die dreidimensionale Kontur 3 projiziert wird, jeweils wenigstens ein Bild der Kontur 3 mit dem jeweiligen auf die Kontur 3 projizierten räumlich strukturierten Lichtmuster aufnehmen. Die Steuer- und Auswerteeinheit 6 ist eingerichtet, basierend auf Bilddaten dieser mittels der Kameras 5a, 5b aufgenommenen Bilder die räumliche Struktur der Kontur 3 zu berechnen.

[0060] Dazu identifiziert die Steuer- und Auswerteeinheit 6 für eine Vielzahl von Objektpunkten 3a, 3b, 3c auf der Kontur 3 jeweils ein Paar von Punkten in einer Bildebene 20a der ersten Kamera 5a und in einer Bildebene 20b der zweiten Kamera 5b, die einander und dem jeweiligen Objektpunkt 3a, 3b, 3c entsprechen. In Fig. 1 bilden beispielsweise der Punkt 3c' in der Bildebene 20a der ersten Kamera 5a und der Punkt 3c'' in der Bildebene 20b der zweiten Kamera 5b ein solches Paar von Punkten, die einander und dem Objektpunkt 3c auf der Kontur 3 entsprechen. Mögliche Verfahren zum Identifizieren der einander entsprechenden Punkte 3c', 3c'' in den Bildebenen 20a, 20b der Kameras 5a, 5b werden beispielsweise in WO2015022384A1 oder in DE102012013079A1 beschrieben, wie eingangs erläutert. Natürlich können zum Identifizieren der einander entsprechenden Punkte 3c', 3c'' in den Bildebenen 20a, 20b der Kameras 5a, 5b davon abweichend auch andere z. B. aus dem Stand der Technik bekannte Verfahren angewendet werden.

[0061] Basierend auf der bekannten räumlichen Anordnung der Bildebenen 20a, 20b der Kameras 5a, 5b kann dann für das Paar von Punkten 3c', 3c'' durch Triangulieren eine Tiefeninformation und damit eine räumliche Koordinate des Punktes 3c auf der Kontur 3 berechnet werden. In entsprechender Weise kann vorgegangen werden, um die räumlichen Koordinaten der Objektpunkte 3a, 3b und einer Vielzahl weiterer Objektpunkte auf der Kontur 3 zu berechnen.

[0062] Bei einer abgewandelten Ausführungsform wird z. B. nur die erste Kamera 5a verwendet. In diesem Fall kann die Steuer- und Auswerteeinheit 6 dann eine virtuelle Projektionsebene 21 bestimmen, von der aus das Licht L zum Formen der räumlich strukturierten Lichtmuster in den Objektraum 2 und auf die Kontur 3 projiziert wird. In diesem Fall identifiziert die Steuer- und Auswerteeinheit 6 dann für jeden der Objektpunkte 3a, 3b, 3c auf der Kontur 3 jeweils ein Paar von Punkten in der Bildebene 20a der ersten Kamera 5a und in der virtuellen Projektionsebene 21, die einander und dem jeweiligen Objektpunkt 3a, 3b, 3c entsprechen. In Fig. 1 bilden beispielsweise der Punkt 3c' in der Bildebene 20a der ersten Kamera 5a und der Punkt 3c'' in der virtuellen Projektionsebene 21 ein solches Paar von Punkten, die einander und dem Objektpunkt 3c auf der Kontur 3 entsprechen.

Patentansprüche

1. Projektionsvorrichtung (4), umfassend:
eine Beleuchtungseinheit (7) zum Emittieren von Licht (L); und
eine Projektionseinheit (8) mit einer Spiegeloberfläche, wobei die Projektionseinheit (8) eingerichtet ist, das von der Beleuchtungseinheit (7) emittierte Licht (L) mittels der Spiegeloberfläche in einen Objektraum (2) zu projizieren und im Objektraum (2) zu unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern (16a, 16b) zu formen;
dadurch gekennzeichnet,
dass die Spiegeloberfläche wenigstens bereichsweise verformbar ist und die Projektionseinheit (8) zum Formen der unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmuster (16a, 16b) im Objektraum (2) wenigstens einen Aktuator (12a, 12b) zum wenigstens bereichsweisen Verformen der Spiegeloberfläche aufweist.
2. Projektionsvorrichtung (4) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Spiegeloberfläche zum Formen der räumlich strukturierten Lichtmuster (16a, 16b) als Freiformspiegeloberfläche (10a) ausgebildet ist.
3. Projektionsvorrichtung (4) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Spiegeloberfläche zum Formen hochfrequenter Strukturen der räumlich strukturierten Lichtmuster (16a, 16b) eine Mikrostrukturierung (19) aufweist.
4. Projektionsvorrichtung (4) nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Mikrostrukturierung (19) senkrecht zur Spiegeloberfläche lokale Höhenvariationen aufweist, die eine Amplitude von bis zu 10 µm oder von bis zu 20 µm oder von bis zu 50 µm oder von bis zu 100 µm oder von bis zu 200 µm oder von bis zu 500 µm haben.
5. Projektionsvorrichtung (4) nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Mikrostrukturierung (19) senkrecht zur Spiegeloberfläche lokale Höhenvariationen aufweist, die eine Amplitude von wenigstens 0,5 µm oder von wenigstens 1 µm oder von wenigstens 5 µm oder von wenigstens 10 µm oder von wenigstens 20 µm oder von wenigstens 50 µm oder von wenigstens 100 µm haben.
6. Projektionsvorrichtung (4) nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Höhenvariationen der Mikrostrukturierung (19) parallel zur Spiegeloberfläche jeweils über bis zu 100 µm oder über bis zu 200 µm oder über bis zu 500 µm oder über bis zu 1 mm oder über bis zu 5 mm oder über bis zu 10 mm erstrecken.
7. Projektionsvorrichtung (4) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Projektionseinheit (8) zur Ausbildung der Spiegeloberfläche eine Substratschicht (10), insbesondere eine metallene Substratschicht (10) mit einer Dicke von höchstens 1 mm, vorzugsweise mit einer Dicke von höchstens 0,5 mm, besonders vorzugsweise mit einer Dicke von höchstens 0,2 mm aufweist.
8. Projektionsvorrichtung (4) nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Projektionseinheit (8) an einer von der Spiegeloberfläche abgewandten Rückseite der Substratschicht (10) wenigstens ein Verbindungselement oder wenigstens eine Verbindungsschicht (11) aufweist, wobei das wenigstens ein Verbindungselement oder die wenigstens eine Verbindungsschicht (11) zum Übertragen einer Verformkraft von dem wenigstens einen Aktuator (12a, 12b) auf die Substratschicht (10) zwischen dem wenigstens einen Aktuator (12a, 12b) und der Substratschicht (10) angeordnet ist.
9. Projektionsvorrichtung (4) nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die wenigstens eine Verbindungsschicht (11) wenigstens eine Klebstoffschicht oder wenigstens eine Metallschicht, insbesondere in Form einer Metallfolie oder einer Lötsschicht, umfasst.
10. Projektionsvorrichtung (4) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der wenigstens eine Aktuator (12a, 12b) wenigstens ein Piezoelement, wenigstens einen Linearmotor oder wenigstens eine von einem Linearmotor antreibbare mechanische Stelleinheit umfasst.
11. Projektionsvorrichtung (4) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der wenigstens eine Aktuator (12a, 12b) eine Vielzahl von Aktuatoren (12a, 12b) umfasst, die unabhängig voneinander verstellbar oder ansteuerbar sind.
12. Projektionsvorrichtung (4) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der wenigstens eine Aktuator (12a, 12b) eine Vielzahl von Aktuatoren (12a, 12b) umfasst, die rotationssymmetrisch angeordnet sind.

13. Projektionsvorrichtung (4) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Beleuchtungseinheit (7) wenigstens eine LED und/oder wenigstens einen Laser umfasst.
14. Vorrichtung zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur (3), umfassend:
 - eine Projektionsvorrichtung (4) nach einem der vorhergehenden Ansprüche;
 - wenigstens eine Kamera (5a, 5b), vorzugsweise eine erste Kamera (5a) und eine zweite Kamera (5b), zum Aufnehmen von Bildern eines im Objektraum (2) angeordneten Objekts mit den mittels der Spiegeloberfläche auf das Objekt projizierten unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern (16a, 16b); und
 - eine Auswerteeinheit (6) zum Bestimmen einer dreidimensionalen Kontur (3) eines im Objektraum (2) angeordneten Objekts basierend auf Bilddaten von mittels der wenigstens einen Kamera (5a, 5b) aufgenommenen Bildern des Objekts, vorzugsweise von mittels der ersten Kamera (5a) und der zweiten Kamera (5b) aufgenommenen Bildern des Objekts, mit den mittels der Spiegeloberfläche auf das Objekt projizierten unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern (16a, 16b).
15. Vorrichtung nach Anspruch 14, ferner umfassend:
 - eine Steuereinheit (6) zum Ansteuern des wenigstens einen Aktuators (12a, 12b) und zum Ansteuern der wenigstens einen Kamera (5a, 5b), vorzugsweise zum Ansteuern der ersten Kamera (5a) und der zweiten Kamera (5b); wobei die Steuereinheit (6) eingerichtet ist, den wenigstens einen Aktuator (12a, 12b) und die wenigstens eine Kamera (5a, 5b), vorzugsweise die erste Kamera (5a) und die zweite Kamera (5b), derart anzusteuern, dass die wenigstens eine Kamera (5a, 5b), vorzugsweise die erste Kamera (5a) und die zweite Kamera (5b), für jedes räumlich strukturierte Lichtmuster (16a, 16b) der Vielzahl von unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern (16a, 16b), das mittels der Spiegeloberfläche auf ein im Objektraum (2) angeordnetes Objekt projiziert wird, jeweils wenigstens ein Bild des Objekts mit dem auf das Objekt projizierten räumlich strukturierten Lichtmuster (16a, 16b) aufzunehmen.
16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 und 15, wobei die Auswerteeinheit zum Erfassen der dreidimensionalen Kontur (3) des im Objektraum (2) angeordnet Objekts eingerichtet ist, für eine Vielzahl von Objektpunkten (3a, 3b, 3c) des Objekts basierend auf den Bilddaten der mittels der wenigstens einen Kamera aufgenommenen Bilder, vorzugsweise basierend auf den Bilddaten der mittels der ersten Kamera (5a) und der zweiten Kamera (5b) aufgenommenen Bilder,
 - jeweils Paare (3c', 3c"; 3c', 3c''') von einander und dem jeweiligen Objektpunkt (3c) entsprechenden Punkten in einer Bildebene (20a) der Kamera bzw. der ersten Kamera (5a) und in einer weiteren Ebene (20b, 21) zu identifizieren, wobei die weitere Ebene (20b, 21)
 - a) eine Bildebene (20b) der zweiten Kamera (5b) ist oder
 - b) eine der Spiegeloberfläche zugeordnete virtuelle Projektionsebene (21) ist,
 und
 - eine Tiefeninformation durch Triangulieren in Abhängigkeit von Positionen der einander und dem jeweiligen Objektpunkt (3c) entsprechenden Punkte (3c', 3c"; 3c', 3c''') in der Bildebene (20a) und in der weiteren Ebene (20b, 21) zu ermitteln.
17. Projektionsverfahren, umfassend die Schritte:
 - Formen eines ersten räumlich strukturierten Lichtmusters (16a) in einem Objektraum (2) durch Reflexion von Licht (L) an einer Spiegeloberfläche mit einer ersten Oberflächenform (15a);
 - wenigstens bereichsweises Verformen der Spiegeloberfläche mittels wenigstens eines Aktuators (12a, 12b), so dass die Spiegeloberfläche eine von der ersten Oberflächenform verschiedene zweite Oberflächenform (15b) annimmt; und
 - Formen eines von dem ersten räumlich strukturierten Lichtmuster (16a) verschiedenen zweiten räumlich strukturierten Lichtmusters (16b) im Objektraum (2) durch Reflexion von Licht (L) an der Spiegeloberfläche mit der zweiten Oberflächenform (15b).
18. Projektionsverfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass das Verformen der Spiegeloberfläche mittels des wenigstens einen Aktuators (12a, 12b) durch Verändern einer Piezospannung eines Piezoelements oder durch Verstellen eines Linearmotors vorgenommen wird.
19. Projektionsverfahren nach einem der Ansprüche 17 und 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Spiegeloberfläche gleichzeitig an verschiedenen Positionen der Spiegeloberfläche verformt wird.
20. Projektionsverfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Spiegeloberfläche an verschiedenen relativ zueinander rotationssymmetrisch angeordneten Positionen der Spiegeloberfläche verformt wird.
21. Verfahren zum berührungslosen Erfassen einer dreidimensionalen Kontur (3), umfassend die Schritte:
 - Projizieren von unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern (16a, 16b) auf ein in einem Objektraum (2) angeordnetes Objekt gemäß dem Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 20;
 - Aufnehmen von Bildern des Objekts mit den auf das Objekt projizierten unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern (16a, 16b) mittels wenigstens einer Kamera (5a, 5b), vorzugsweise mittels einer ersten Kamera (5a) und einer zweiten Kamera (5b); und
 - Bestimmen einer dreidimensionalen Kontur (3) des Objekts basierend auf Bilddaten der mittels der wenigstens einen Kamera (5a, 5b) aufgenommenen Bilder, vorzugsweise basierend auf Bilddaten der mittels der ersten Kamera (5a) und der zweiten Kamera (5b) aufgenommenen Bilder.

22. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass das Verformen der Spiegeloberfläche zum Formen der unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmuster (16a, 16b) und das Aufnehmen der Bilder des Objekts mittels der wenigstens Kamera (5a, 5b), vorzugsweise mittels der ersten Kamera (5a) und der zweiten Kamera (5b), derart synchron vorgenommen werden, dass die wenigstens eine Kamera (5a, 5b), vorzugsweise die erste Kamera (5a) und die zweite Kamera (5b), für jedes der Vielzahl von unterschiedlichen räumlich strukturierten Lichtmustern (16a, 16b), das auf das Objekt projiziert wird, jeweils wenigstens ein Bild des Objekts mit dem auf das Objekt projizierten räumlich strukturierten Lichtmuster (16a, 16b) aufnimmt bzw. aufnehmen.
23. Verfahren nach einem der Ansprüche 21 und 22, dadurch gekennzeichnet, dass für eine Vielzahl von Objektpunkten (3a, 3b, 3c) des Objekts basierend auf den Bilddaten der mittels der wenigstens einen Kamera (5a, 5b, 5c) aufgenommenen Bilder, vorzugsweise basierend auf den Bilddaten der mittels der ersten Kamera (5a) und der zweiten Kamera (5b) aufgenommenen Bilder,
- jeweils Paare (3c, 3c"; 3c', 3c''') von einander und dem jeweiligen Objektpunkt (3c) entsprechenden Punkten in Bildebene (20a) der Kamera bzw. der ersten Kamera (5a) und in einer weiteren Ebene (20b, 21) identifiziert werden, wobei die weitere Ebene (20b, 21)
 - a) eine Bildebene (20b) der zweiten Kamera (5b) ist oder
 - b) eine der Spiegeloberfläche zugeordnete virtuelle Projektionsebene (21) ist,
- und
- eine Tiefeninformation durch Triangulieren in Abhängigkeit von Positionen der einander und dem jeweiligen Objektpunkt entsprechenden Punkte (3c', 3c"; 3c', 3c''') in der Bildebene (20a) und in der weiteren Ebene (20b, 21) ermittelt wird.

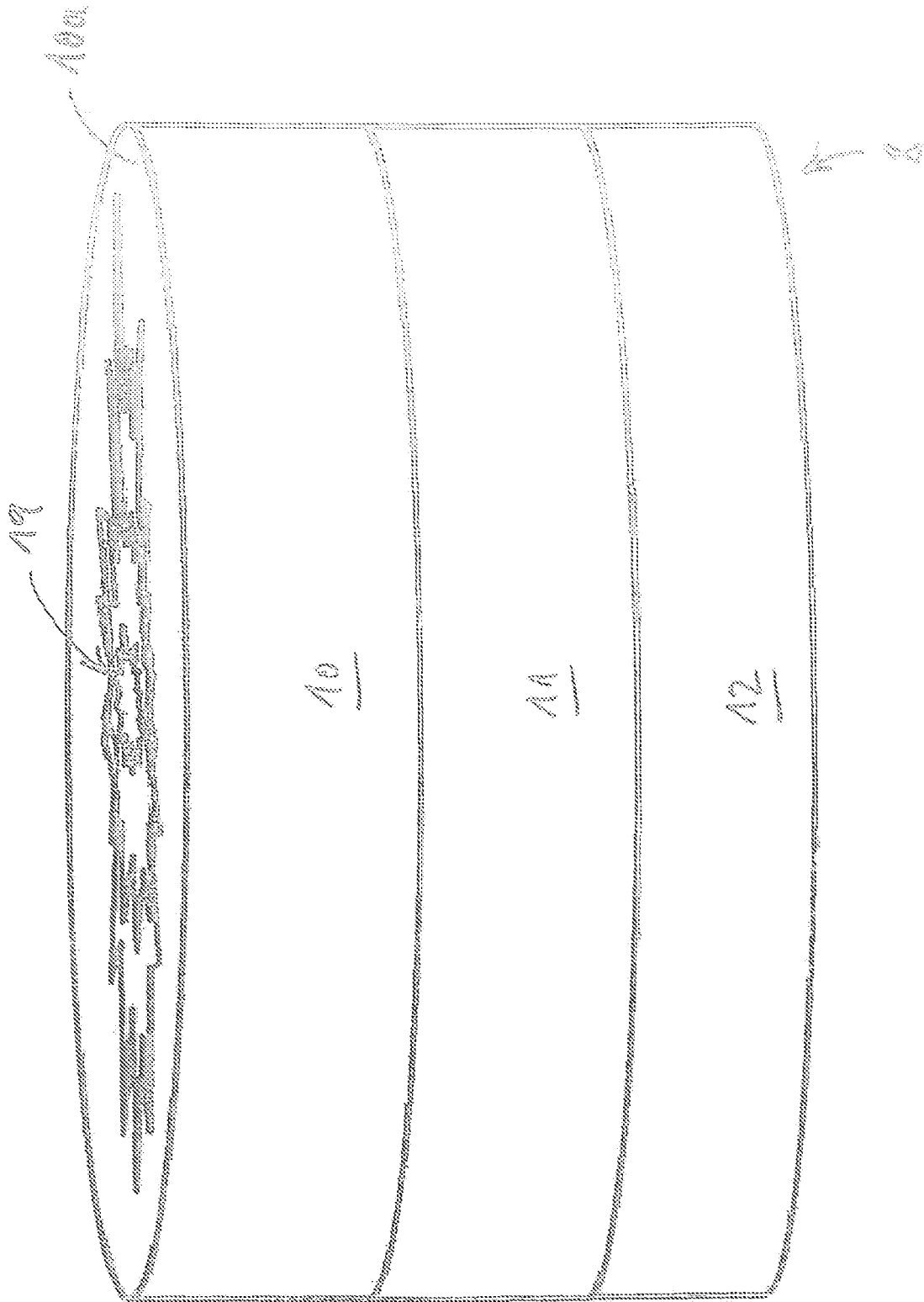


Fig. 3

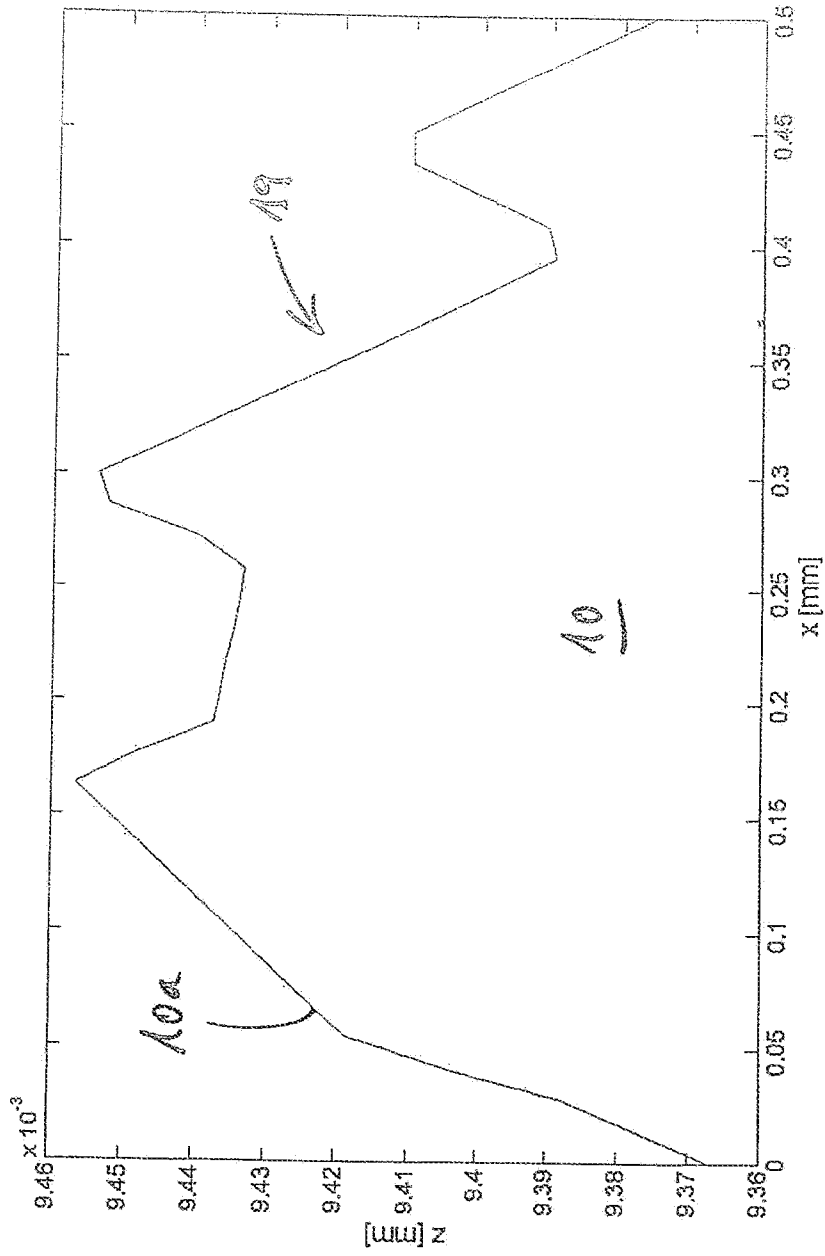


Fig. 4