

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
17. März 2011 (17.03.2011)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2011/029634 A2**

(51) Internationale Patentklassifikation:  
**B24B 13/00** (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2010/005691

(22) Internationales Anmeldedatum:  
13. September 2010 (13.09.2010)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2009 041 501.7  
14. September 2009 (14.09.2009) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.** [DE/DE]; Hansastrasse 27c, 80686 München (DE). **FRIEDRICH-SCHILLER-UNIVERSITÄT JENA** [DE/DE]; Fürstengraben 1, 07743 Jena (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **SCHEIDING, Sebastian** [DE/DE]; Anna-Siemsen-Str. 24, 07745 Jena (DE). **RISSE, Stefan** [DE/DE]; Leo-Sachse-Strasse 45, 07749 Jena (DE). **GEBHARDT, Andreas** [DE/DE]; Faulborn

54b, 99510 Apolda (DE). **DAMM, Christoph** [DE/DE]; Schäfferstr. 6, 07743 Jena (DE). **PESCHEL, Thomas** [DE/DE]; Closewitzer Str. 21G, 07743 Jena (DE). **STEINKOPF, Ralf** [DE/DE]; Schrödingerstr. 28, 07745 Jena (DE).

(74) Anwalt: **PFENNING, MEINIG & PARTNER GBR**; Joachimstaler Strasse 12, 10719 Berlin (DE).

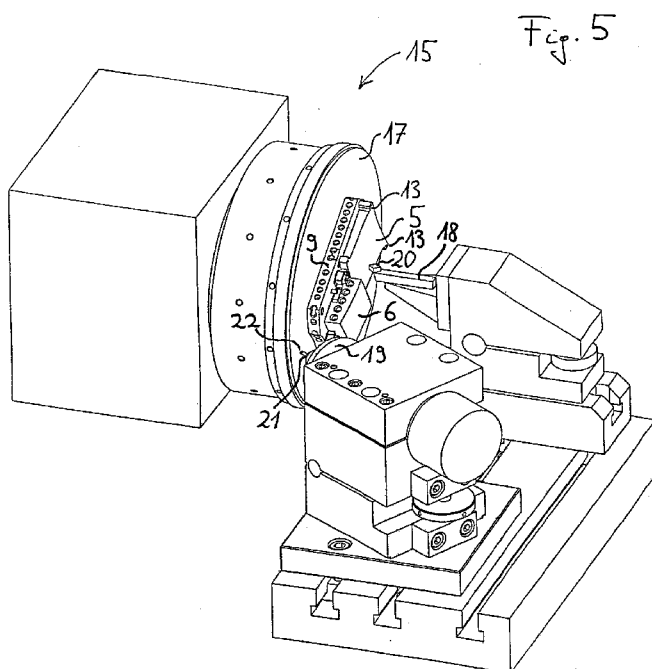
(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR PRODUCING AN OPTICAL ASSEMBLY HAVING AT LEAST TWO OPTICAL FUNCTIONAL SURFACES, AN OPTICAL DEVICE AND UNIT FOR CARRYING OUT THE METHOD

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUR FERTIGUNG EINER OPTISCHEN ANORDNUNG MIT MINDESTENS ZWEI OPTISCHEN FUNKTIONSFLÄCHEN, OPTISCHES GERÄT UND VORRICHTUNG ZUR DURCHFÜHRUNG DES VERFAHRENS



(57) Abstract: The invention relates to a method for producing an optical assembly, comprising at least two optical functional surfaces (5, 6) arranged in a fixed positional relationship to one another on a common supporting structure (9), wherein by means of a processing machine (15), in various process steps, at least two optical functional surfaces (5, 6) and at least one reference structure (13) having a defined and measurable relative position to the optical functional surfaces (5, 6) are produced. The supporting structure (9) remains rigidly connected to the processing machine (15) until said process steps have been completed, and wherein the optical functional surfaces (5, 6) are then measured relative to the at least one reference structure (13), and any deviation from a target shape and target position is determined, after which said process steps are repeated at least once with modified actuation of the processing machine (15). The invention further relates to an optical device comprising an optical assembly produced in this way and to a unit for carrying out such a method.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS,  
IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO,  
SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,  
GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu  
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz  
2 Buchstabe g)*

---

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Fertigung einer optischen Anordnung mit mindestens zwei in fester Lagebeziehung zueinander auf einer gemeinsamen Tragstruktur (9) angeordneten optischen Funktionsflächen (5, 6), bei dem durch eine Bearbeitungsmaschine (15) in verschiedenen Prozessschritten mindestens zwei optische Funktionsflächen (5, 6) und zumindest eine Referenzstruktur (13) mit definierter und messbarer relativer Lage zu den optischen Funktionsflächen (5, 6) hergestellt werden, wobei die Tragstruktur (9) bis zur Vollendung der genannten Prozessschritte fest mit der Bearbeitungsmaschine (15) verbunden bleibt und wobei anschließend die optischen Funktionsflächen (5, 6) relativ zu der zumindest einen Referenzstruktur (13) vermessen werden und eine Abweichung von einer Sollform und Sollposition bestimmt wird, wonach die genannten Prozessschritte mindestens einmal mit einer geänderten Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine (15) wiederholt werden. Die Erfindung betrifft ferner ein optisches Gerät mit einer derart hergestellten optischen Anordnung sowie eine Vorrichtung zur Durchführung eines derartigen Verfahrens.

Verfahren zur Fertigung einer optischen Anordnung mit  
mindestens zwei optischen Funktionsflächen, optisches  
Gerät und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Fertigung  
einer optischen Anordnung mit mindestens zwei in fes-  
ter Lagebeziehung zueinander auf einer gemeinsamen  
Tragstruktur angeordneten optischen Funktionsflächen  
sowie ein optisches Gerät, das eine solche optische  
10 Anordnung umfasst, und eine Vorrichtung, mit der sich  
das Verfahren durchführen lässt.

Optische Anordnungen, bei denen zwei optische Funkti-  
onsflächen definierter Form auf einer gemeinsamen  
15 Tragstruktur angeordnet sind, sind z.B. aus Spiegel-  
teleskopen mit gefalteten Strahlengängen bekannt, bei  
denen die optischen Funktionsflächen durch Spiegel  
gebildet werden. Die Anordnung auf einer gemeinsamen  
Tragstruktur bringt dabei den Vorteil mit sich, dass

sich eine spätere Justage der Funktionsflächen relativ zueinander erübrigt und dass eine Dejustage ausgeschlossen werden kann. Insbesondere wenn diese Spiegel asphärisch geformt sind, entstehen jedoch bei der Fertigung Schwierigkeiten dadurch, dass die Funktionsflächen nicht nur jeweils eine genau definierte Form erhalten, sondern auch mit ebenfalls hoher Genauigkeit relativ zueinander platziert und orientiert werden müssen.

Aus dem Stand der Technik bekannte Verfahren zur Herstellung einzelner optischer Funktionsflächen sehen vor, dass die Funktionsflächen z.B. in einem Fertigungsschritt mit einer Drehmaschine aus einem Metallrohling gebildet und anschließend vermessen werden, wobei der Fertigungsschritt dann mit geänderten Maschinenparametern wiederholt wird, wodurch eine beim Vermessen festgestellte Abweichung von einer Idealform minimiert werden sollen. Durch Iteration kann die Abweichung von der Idealform dann bis auf Werte im Submikrometerbereich reduziert werden. Dabei wird allerdings eine Lage (mit den Begriffen Lage und Position seien in der vorliegenden Schrift immer Ort und/oder Orientierung bezeichnet) der optischen Funktionsfläche nicht kontrolliert, weil die Abweichung durch ein sogenanntes Fitting bestimmt wird, indem eine durch die Idealform definierte Fläche so über die tatsächlich hergestellte Funktionsfläche gelegt wird, dass eine bestmögliche Übereinstimmung erreicht wird, und die Abweichung dann als verbleibender Unterschied definiert wird. Daher ist das bekannte Verfahren für die Herstellung von optischen Anordnungen skizzierter Art mit mehr als einer Funktionsfläche nicht praktikabel.

Der Erfindung liegt also die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren vorzuschlagen, mit dem optische Anordnungen mit mindestens zwei in fester Lagebeziehung zueinander auf einer gemeinsamen Tragstruktur angeordneten optischen Funktionsflächen definierter Form mit möglichst hoher Genauigkeit - und zwar sowohl bezüglich der Form als auch der relativen Lage der Funktionsflächen - und möglichst geringem insbesondere zeitlichem Aufwand hergestellt werden können. Der Erfindung liegt ferner die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung zu entwickeln, mit der sich ein derartiges Fertigungsverfahren durchführen lässt, und ein mit entsprechend geringem Aufwand herstellbares optisches Gerät mit einer optischen Anordnung skizzierter Art vorzuschlagen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Hauptanspruchs sowie durch ein optisches Gerät mit den Merkmalen des Anspruchs 22 und durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 25. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterentwicklungen der Erfindung ergeben sich mit den Merkmalen der Unteransprüche.

Bei dem vorgeschlagenen Verfahren zur Fertigung einer optischen Anordnung mit mindestens zwei in fester Lagebeziehung zueinander auf einer gemeinsamen Tragstruktur angeordneten optischen Funktionsflächen definierter Form wird zunächst in einem ersten Prozessschritt aus einem durch die Tragstruktur gebildeten oder auf der Tragstruktur angeordneten Rohling durch eine Bearbeitungsmaschine eine erste optische Funktionsfläche mit einer durch eine Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine definierten Form hergestellt, in einem zweiten Prozessschritt aus dem genannten Rohling oder einem auf der Tragstruktur angeordneten weiteren

Rohling durch die Bearbeitungsmaschine zumindest eine zweite optische Funktionsfläche mit durch die Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine definierter Form und definierter relativer Lage zur ersten Funktionsfläche hergestellt und in einem dritten Prozessschritt auf und/oder an der Tragstruktur und/oder dem Rohling und/oder dem weiteren Rohling durch die Bearbeitungsmaschine zumindest eine Referenzstruktur mit definierter und messbarer relativer Lage zu den optischen Funktionsflächen hergestellt, wobei die drei genannten Prozessschritte in beliebiger zeitlicher Folge oder gleichzeitig ausgeführt werden und wobei die Tragstruktur bis zur Vollendung aller dieser drei Prozessschritte fest mit der Bearbeitungsmaschine verbunden bleibt. Dass die drei Prozessschritte in beliebiger Reihenfolge oder gleichzeitig ausgeführt werden, soll auch die Möglichkeit einschließen, dass sie sich teilweise zeitlich überlappen oder auf mehrere Unterschritte verteilt sind, die wiederum in beliebiger Reihenfolge und unter Umständen zum Teil gleichzeitig durchgeführt werden können. Anschließend wird die Form und Lage der mindestens zwei optischen Funktionsflächen auf der Tragstruktur in einem Messaufbau relativ zu der zumindest einen Referenzstruktur vermessen und eine Abweichung der optischen Funktionsflächen von einer Sollform und Sollposition, die relativ zu der mindestens einen Referenzstruktur exakt definiert ist, bestimmt. Danach werden die genannten drei Prozessschritte mindestens einmal mit einer derart geänderten Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine wiederholt, dass die genannte Abweichung verringert wird.

Durch die Herstellung der mindestens einen Referenzstruktur und dadurch, dass diese ebenfalls vermessen und die Abweichung relativ dazu bestimmt wird, kann

bei der beschriebenen Iteration eine Verringerung von Formfehlern der Funktionsflächen erreicht werden, ohne dass dabei eine Kontrolle über deren Lage verloren geht. Da die Lage beider optischer Funktionsflächen - und ggf. weiterer auf der gleichen Tragstruktur hergestellter optischer Funktionsflächen - jeweils relativ zu der mindestens einen Referenzstruktur bestimmt wird, bleibt dabei auch eine Lagebeziehung zwischen den Funktionsflächen unter Kontrolle. Gleichzeitig mit den Formfehlern kann daher in beschriebener Weise auch eine Ungenauigkeit der relativen Lage der Funktionsflächen zueinander korrigiert werden, so dass die optische Anordnung auch mit einer sehr geringen Zahl von Iterationen der drei Prozessschritte mit ausgesprochen geringer Form- und Lageabweichung gefertigt werden kann. Die nach einem ersten Durchlauf der drei Prozessschritte üblicherweise noch zu große Abweichung lässt sich mit den beschriebenen Maßnahmen deutlich reduzieren, weil diese Abweichung typischerweise zumindest größtenteils auf Fehler zurückzuführen ist, die systematisch sind in dem Sinne, dass sie bei einer Wiederholung der Prozessschritte mit unveränderter Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine reproduziert würden.

Ein optisches Gerät vorgeschlagener Art, das eine durch das beschriebene Verfahren hergestellte oder herstellbare optische Anordnung umfasst, lässt sich daher mit vorteilhaft geringem Aufwand mit sehr hoher Präzision anfertigen und bringt den weiteren Vorteil mit sich, dass zumindest die beiden auf der gemeinsamen Tragstruktur angeordneten optischen Funktionsflächen nicht mehr relativ zueinander justiert werden müssen und sich auch nicht dejustieren können. Bei diesem optischen Gerät kann es sich z.B. um ein Teleskop handeln, insbesondere um ein Spiegelteleskop mit

gefaltetem Strahlengang. Auch andere optische Anordnungen mit mehrfach gefaltetem Strahlengang können selbstverständlich in der beschriebenen Weise hergestellt werden.

5

10

15

20

Typischerweise wird es sich dementsprechend bei zumindest einer der optischen Funktionsflächen um einen Spiegel handeln, vorzugsweise um einen Spiegel mit metallischer Spiegeloberfläche, weil sich metallische Flächen gut in der vorgeschlagenen Weise bearbeiten lassen. Die optischen Funktionsflächen können jeweils insbesondere zumindest teilweise plan, konkav, konvex oder frei geformt werden, wobei die Vorteile der Erfindung besonders zur Geltung kommen, wenn zumindest eine der Funktionsflächen mit einer asphärischen Form hergestellt wird, weil dann zusätzlich zur möglichst exakten Form auch die genaue Lage der Funktionsfläche relativ zu der mindestens einen weiteren Funktionsfläche von besonderer Bedeutung für die optische Güte der Anordnung ist.

25

30

35

Eine zur Durchführung des vorgeschlagenen Verfahrens geeignete und daher vorteilhafte Vorrichtung umfasst eine Bearbeitungsmaschine zum Herstellen der mindestens zwei Funktionsflächen und der mindestens einen Referenzstruktur sowie eine davon getrennt angeordnete oder in der Bearbeitungsmaschine integrierte Messvorrichtung zum Vermessen der Funktionsflächen und der mindestens einen Referenzstruktur, wobei die Messvorrichtung programmtechnisch eingerichtet ist, die Abweichung der optischen Funktionsflächen gegenüber einer relativ zu der mindestens einen Referenzstruktur definierten Sollform und Sollposition zu bestimmen. Zusätzlich kann die Messvorrichtung programmtechnisch eingerichtet sein, korrigierte Einstellungswerte für die Bearbeitungsmaschine zu be-

rechnen, durch die die Abweichung bei einer weiteren Durchführung der Prozessschritte zumindest weitgehend kompensiert werden kann. Dabei kann es vorteilhaft sein, wenn die ermittelte Abweichung dazu in ein  
5 durch Freiheitsgrade der Bearbeitungsmaschine definiertes Koordinatensystem transformiert wird. Mit Vermessen sei in der vorliegenden Schrift eine möglichst dichte oder flächendeckende Ermittlung von Raumkoordinaten einer Oberfläche bezeichnet oder im  
10 Fall identifizierbarer einzelner Punkte oder Linien eine Ermittlung von Raumkoordinaten dieser Punkte bzw. von möglichst dicht liegenden Punkten auf der jeweiligen Linie.

15 Eine besonders hohe Genauigkeit kann man erreichen, wenn das Bestimmen der Abweichung und das anschließende Wiederholen der drei genannten Prozessschritte mit geänderter Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine bei dem Verfahren zum Herstellen der optischen Anord-  
20 nung deterministisch mehrfach erfolgt, bis die verbleibende Abweichung eine vorgegebene Toleranz unterschreitet.

25 Zur Bestimmung der genannten Abweichung können die Referenzstruktur und die optischen Funktionsflächen z.B. taktil oder interferometrisch oder mittels einer abbildenden Optik vermessen werden. Unter Umständen kann das Vermessen Schäden auf den Funktionsflächen verursachen, z.B. Kratzspuren im Fall einer taktilen  
30 Vermessung. Daher kann es vorgesehen sein, dass nach dem letzten Vermessen, wenn eine hinreichende Genauigkeit festgestellt wird, zumindest die ersten beiden Prozessschritte noch einmal so durchgeführt werden, dass die Funktionsflächen tiefer zu liegen kommen,  
35 die Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine ansonsten aber unverändert bleibt.

Bei typischen Ausführungen der Erfindung wird zumindest eine der optischen Funktionsflächen, die unter Umständen auch ohne sichtbare Grenze ineinander übergehen können, monolithisch mit der Tragstruktur ausgebildet. Es ist jedoch auch möglich, dass der Rohling, aus dem die erste Funktionsfläche gebildet wird oder, sofern die zweite Funktionsfläche nicht aus demselben Rohling gebildet wird, der weitere Rohling als separates Teil auf der Tragstruktur befestigt wird. In diesem Fall kann es vorgesehen sein, dass der Rohling und/oder der weitere Rohling erst nach Abschluss mindestens eines der genannten Prozessschritte oder zumindest nach dessen Beginn auf der mit der Bearbeitungsmaschine verbundenen Tragstruktur angeordnet wird. Das gilt insbesondere für Fälle, in denen der weitere Rohling, aus dem die zweite optische Funktionsfläche hergestellt wird, bei der beispielsweise mit einem Drehwerkzeug durchgeführten Herstellung der ersten optischen Funktionsfläche im Weg wäre, also in einem Arbeitsraum der Bearbeitungsmaschine im ersten Prozessschritt läge.

Im Verlauf der genannten Prozessschritte können zusätzlich zu den optischen Funktionsflächen und der mindestens einen Referenzstruktur auch eine oder mehrere weitere Strukturen durch die Bearbeitungsmaschine auf und/oder an der Tragstruktur und/oder dem Rohling und/oder dem weiteren Rohling hergestellt werden, deren Abweichung von einer Sollform und Solllage relativ zur mindestens einen Referenzstruktur ebenfalls beim Vermessen bestimmt wird. Dadurch kann auch die mindestens eine weitere Struktur mit optischer Genauigkeit gefertigt werden.

Bei der weiteren Struktur oder den weiteren Strukturen kann es sich z.B. um eine Anlage- und/oder Aufbaugesstruktur zur Anlage bzw. Aufnahme des Rohlings oder des weiteren Rohlings an der Tragstruktur handeln.

5      Dadurch kann sichergestellt werden, dass die optischen Funktionsflächen auch dann in einer genau definierten Lagebeziehung zueinander zu liegen kommen, wenn zumindest eine der Funktionsflächen auf einem Rohling hergestellt wird, der auf die Tragstruktur  
10      aufgesetzt und lösbar mit dieser verbunden wird.

Alternativ oder zusätzlich kann die weitere Struktur oder eine der weiteren Struktur auch eine Anlagegeometrie sein, an der anliegend die Tragstruktur in ein  
15      optisches Gerät einsetzbar ist und durch die eine Lage der Tragstruktur im optischen Gerät bezüglich zumindest eines Freiheitsgrads, vorzugsweise bezüglich aller translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade, festgelegt ist. Damit kann man erreichen, dass  
20      sich auch eine aufwendige Justierung der die zwei optischen Funktionsflächen umfassenden Anordnung relativ zu anderen optischen Komponenten des optischen Geräts erübrigt. Bei in dieser Hinsicht besonders vorteilhaften Ausführungen optischer Geräte hier vorgeschlagener Art ist also eine Position und Orientierung der optischen Anordnung in dem optischen Gerät  
25      durch zumindest eine Anlagegeometrie festgelegt, die als weitere Struktur der optischen Anordnung mit optischer Genauigkeit hergestellt ist und mit der die optische Anordnung an einem Träger des optischen Geräts anliegt.  
30     

Bei bevorzugten Ausführungen der Erfindung wird an und/oder in der Tragstruktur zumindest eine kinematische Entkopplung hergestellt, die dabei monolithisch  
35      mit der Tragstruktur ausgeführt sein kann. Derartige

kinematische Entkopplungen, die z.B. mit mindestens einem Festkörpergelenk und/oder zumindest einem Steg und/oder zumindest einer Membran und/oder als Stabwerk ausgeführt werden können, können insbesondere zwischen einem Hauptkörper der Tragstruktur und Anlageflächen vorgesehen sein, mit denen die Tragstruktur an einem Träger eines optischen Geräts oder einem Träger einer der optischen Flächen anliegend oder zumindest mit festem maßlichen Bezug verbaut wird, um eine Verformung der optischen Flächen durch mechanische Spannungen zu verhindern.

Typischerweise weist die Bearbeitungsmaschine ein Drehwerkzeug auf, wobei zumindest einer der genannten Prozessschritte durch das Drehwerkzeug durchgeführt wird. Vorzugsweise weist das Drehwerkzeug oder die Drehmaschine dabei als spanabhebendes Element einen Diamanten auf, womit sich das Drehwerkzeug insbesondere für die Herstellung der optischen Funktionsflächen aus metallischen Rohlingen eignet. In jedem Fall können die zwei Funktionsflächen oder zumindest zwei der optischen Funktionsflächen eine gemeinsame Drehachse aufweisen, um welche die Tragstruktur in der Bearbeitungsmaschine zur Herstellung dieser Funktionsflächen gedreht wird.

Bei der Verwendung eines Drehwerkzeugs kann es vorgesehen sein, dass die Tragstruktur vor Beginn der genannten Prozessschritte mit einer beispielsweise als Scheibe ausgeführten Halterung verbunden wird - z.B. auf die Scheibe aufgekittet wird - und bis zur Vollendung des Verfahrens auf dieser Halterung verbleibt. Diese Halterung kann zum Drehen der Funktionsflächen und gegebenenfalls für andere Prozessschritte drehbar auf einer Achse der Bearbeitungsmaschine angeordnet sein. Wenn die Messvorrichtung, mit der die Funkti-

onsflächen und die Referenzstrukturen vermessen werden, räumlich von der Bearbeitungsmaschine getrennt ist, kann die Tragstruktur dann zum Vermessen zusammen mit der Halterung von der Bearbeitungsmaschine  
5 getrennt und für die Iteration der Prozessschritte wieder auf die Bearbeitungsmaschine aufgespannt werden, was das Verfahren erleichtert.

Da sich nicht alle denkbaren und für optische Anord-  
10 nungen hier beschriebener Art zweckmäßigen Strukturen und Geometrien durch Drehen herstellen lassen, können unter Umständen einer oder mehrere der genannten Prozessschritte auch durch ein Fräswerkzeug durchgeführt werden, dass dann als weitere Komponente der Bearbei-  
15 tungsmaschine vorgesehen ist und vorzugsweise wieder einen Diamanten als spanabhebendes Element aufweist.

Besonders einfach fällt das vorgeschlagene Verfahren aus, wenn die genannten Prozessschritte durch ein für  
20 alle genannten Prozessschritte gleiches Werkzeug der Bearbeitungsmaschine durchgeführt werden, weil sich dann Fehler vermeiden lassen, die andernfalls durch geringfügige unkontrollierte Schwankungen einer relativen Lage verschiedener Werkzeuge der Bearbeitungs-  
25 maschine verursacht werden könnten.

Bei typischen Ausführungen des Verfahrens weist die Bearbeitungsmaschine jedoch sowohl mindestens ein Drehwerkzeug als auch mindestens ein Fräswerkzeug  
30 auf, wobei die Prozessschritte zur Strukturierung der optischen Funktionsflächen und der Referenzstruktur dann teilweise durch das mindestens eine Drehwerkzeug und teilweise durch das mindestens eine Fräswerkzeug, die vorzugsweise jeweils einen Diamanten als spanab-  
35 hebendes Element aufweisen, durchgeführt werden. Dabei kann die Bearbeitung durch das Drehwerkzeug und

das Fräswerkzeug in einer festen Werkzeuganordnung nacheinander oder abwechselnd durchgeführt werden. Bei einer Bearbeitung durch verschiedene Werkzeuge - insbesondere durch ein Fräswerkzeug und ein Drehwerk-  
5 zeug - sollten diese verschiedenen Werkzeuge der Bearbeitungsmaschine selbstverständlich in einer bekannten und vorzugsweise festen Lagebeziehung zueinander stehen. Es ist aber auch denkbar, dass ein Fräskopf des Fräswerkzeugs relativ zu dem spanabhe-  
10 benden Element des Drehwerkzeugs beweglich ausgeführt ist, sofern nur trotzdem die relative Lage des einen Werkzeugs zum anderen jeweils genau bekannt ist.

Um eine Vermessung der Funktionsflächen relativ zu der mindestens einen Referenzstruktur zu ermöglichen, kann oder können letztere so ausgeführt sein, dass sie zumindest einen Punkt und/oder zumindest eine Li-  
15 nie und/oder zumindest eine Fläche definieren. Dazu können die Referenzstrukturen z.B. zumindest eine sphärisch konkave Fläche und/oder zumindest eine zy-  
20 linderförmige Fläche aufweisen oder bilden oder kreuzförmig ausgeführt sein. Um eine hinreichend genaue Vermessung möglich zu machen, kann die mindestens eine Referenzstruktur mit optischer Oberflächen-  
25 güte hergestellt werden. Dadurch kann sie ggf. so gestaltet werden, dass sie gemeinsam mit zumindest einer der optischen Funktionsflächen interferometrisch vermessen werden kann.

Die Referenzstrukturen sollten so ausgestaltet werden, dass anhand der Referenzstrukturen die Form und/oder Position zumindest einer der optischen Funktionsflächen relativ zu den Referenzstrukturen bezüglich einer, zweier oder vorzugsweise aller Raumrich-  
30 tungen und/oder ihre Orientierung bezüglich einer, mehrerer oder vorzugsweise aller Raumachsen eindeutig  
35

bestimmbar ist. Dazu können z.B. zwei, drei oder bis zu sechs Referenzstrukturen hergestellt werden.

5 Zum Bestimmen der Abweichung der Funktionsflächen von der mit Bezug auf die Referenzstrukturen definierten Sollform und Sollposition können z.B. zunächst die Referenzstrukturen und dann die optischen Funktionsflächen in Relation zu den Referenzstrukturen vermessen werden. Dabei kann mittels der Referenzstrukturen  
10 zunächst eine Position eines Koordinatenursprungs bestimmt werden, der während der Prozessschritte mit Bezug auf die Bearbeitungsmaschine eindeutig definiert ist, so dass dann die optischen Funktionsflächen in Relation zu dem Koordinatenursprung vermessen  
15 werden können, die vermessenen Funktionsflächen also in einem Koordinatensystem mit diesem Koordinatenursprung angegeben werden können. Wenn die Bearbeitungsmaschine eine Drehmaschine ist oder ein Drehwerkzeug umfasst, kann der Koordinatenursprung dabei  
20 z.B. durch einen Punkt auf der Drehachse gegeben sein und vorzugsweise dort liegen, wo die Drehachse eine Oberfläche der optischen Anordnung durchstößt.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird nachfolgend anhand der Figuren 1 bis 7 erläutert. Es zeigt

Fig. 1 einen Querschnitt durch ein Teleskop als Beispiel für ein erfindungsgemäßes optisches Gerät,

Fig. 2 eine perspektivisch dargestellte optische Anordnung, die Bestandteil des Teleskops aus Fig. 1 ist,

- Fig. 3 in entsprechender Darstellung einen Bestandteil der optischen Anordnung aus Fig. 2,
- 5 Fig. 4 als Schnittzeichnung ein Detail der optischen Anordnung aus Fig. 2 an einer Stelle, an der diese optische Anordnung mit einem Träger des Teleskops aus Fig. 1 verbunden wird,
- 10 Fig. 5 eine perspektivische Ansicht einer Bearbeitungsmaschine, mit der optische Funktionsflächen der optischen Anordnung aus Fig. 2 hergestellt werden,
- 15 Fig. 6 in perspektivischer Darstellung eine Messvorrichtung zum Vermessen dieser optischen Funktionsflächen und
- 20 Fig. 7 ein Diagramm, das veranschaulicht, wie eine optische Güte der optischen Anordnung durch eine Iteration von mit der Bearbeitungsmaschine durchgeführten Prozessschritten und mit der Messvorrichtung durchgeführten Vermessungen verbessert wird.
- 25

30 In Fig. 1 ist ein Teleskop 1 zu erkennen, bei dem sich um ein Spiegelteleskop mit mehrfach gefaltetem Strahlengang handelt. Dieses Teleskop 1 weist einen als Stabwerk ausgeführten Träger 2 auf, an dem insbesondere ein konkaver Primärspiegel 3 und an einem gegenüberliegenden Ende eine optische Anordnung 4 befestigt sind.

35 Die optische Anordnung 4, die in Fig. 2 isoliert dargestellt ist, weist eine erste optische Funktionsflä-

che 5 und eine daneben angeordnete zweite optische Funktionsfläche 6 auf. Bei der zweiten Funktionsfläche 6 handelt es sich um einen asphärisch konvex gekrümmten Spiegel, der einen Sekundärspiegel des Teleskops 1 bildet, während die erste optische Funktionsfläche 5 durch einen asphärisch konkav gekrümmten Spiegel gegeben ist, auf den in das Teleskop 1 einfallendes Licht nach einer Reflexion am Primärspiegel 3, einer zweiten Reflexion an der Funktionsfläche 6 und einer weiteren Reflexion an einem planaren Faltspiegel 7 fällt. So entsteht im Strahlengang hinter der ersten optischen Funktionsfläche 5 in einer Bildebene 8 ein reelles Bild. Die beiden optischen Funktionsflächen 5 und 6 sind in fester Lagebeziehung zueinander auf einer gemeinsamen metallischen Tragstruktur 9 angeordnet. Die erste optische Funktionsfläche 5 ist bei dem vorliegenden Ausführungsbeispiel monolithisch mit der Tragstruktur 9 gebildet, während die zweite optische Funktionsfläche 6 durch eine Oberfläche eines weiteren metallischen Trägers gebildet ist, der an drei Befestigungspunkten 10 mit der Tragstruktur 9 verbunden ist. Bei einer Abwandlung der dargestellten Ausführung könnte selbstverständlich auch die erste optische Funktionsfläche 5 einen eigenen Träger aufweisen und auf die Tragstruktur 9 aufgesetzt sein. Auch können die optischen Funktionsflächen 5 und 6, die jeweils eine metallische Spiegeloberfläche aufweisen, bei Abwandlungen der hier beschriebenen optischen Anordnung 4 anders geformt sein. Insbesondere könnte auch eine der Funktionsflächen 5 oder 6 durch einen Planspiegel gegeben sein.

Die Tragstruktur 9 weist mehrere mit optischer Güte hergestellte Anlageflächen 11 auf, mit denen die optische Anordnung 4 an bestimmten Stellen des

Trägers 2 anliegt, wenn sie in das Teleskop 1 eingebaut ist. Dadurch ist eine Position und Orientierung der optischen Anordnung 4 im Teleskop 1 eindeutig und mit so hoher Genauigkeit festgelegt, dass nach einem  
5 Einbau der optischen Anordnung 4 keine weitere Justierung notwendig ist. Um zu verhindern, dass sich die optische Anordnung 4 verzieht, wenn sie mit dem Träger 2 verbunden wird, sind in einer Umgebung dreier der Anlageflächen 11, an denen die Tragstruktur 9  
10 fest mit dem Träger 2 verbunden wird, kinematische Entkopplungen 12 vorgesehen. Schließlich sind in Fig. 2 vier Referenzstrukturen 13 zu erkennen, bei denen es sich im vorliegenden Ausführungsbeispiel jeweils um eine sphärisch konkave Fläche sehr kleinen Durchmessers von etwa 1,5 mm, also um eine Kuhle, handelt  
15 und die außerhalb eines Qualitätsbereichs der ersten optischen Funktionsfläche 5 angeordnet sind und im vorliegenden Fall ein Quadrat aufspannen und die jeweils einen Punkt, nämlich den zentralen und tiefsten  
20 Punkt der jeweiligen Kuhle, definieren.

In Fig. 3 ist die Tragstruktur 9 mit der ersten optischen Funktionsfläche 5 noch einmal ohne den Träger der zweiten optischen Funktionsfläche 6 dargestellt.  
25 Wiederkehrende Merkmale sind dort, wie auch in den übrigen Figuren, mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

Fig. 4 zeigt als Schnittzeichnung einen Ausschnitt  
30 der optischen Anordnung 4, der auch in Fig. 2 geschnitten dargestellt ist. Dort ist die kinematische Entkopplung 12 genauer zu erkennen, die monolithisch mit der Tragstruktur 9 hergestellt und als Membran ausgeführt ist. Diese Membran verbindet eine der Anlageflächen 11 mit einem Grundkörper der Tragstruktur  
35 9. Zu erkennen ist in Fig. 4 auch eines von drei axi-

al fixierten Befestigungselementen 14, das als externe Referenz für eine genau positionierte Befestigung der optischen Anordnung 4 dient und der als lösbarer Bestandteil des Trägers 2 verstanden sei.

5

10

15

20

25

30

35

Eine Vorrichtung zur Herstellung der optischen Anordnung 4 umfasst eine in Fig. 5 dargestellte Bearbeitungsmaschine 15 zum Herstellen der Funktionsflächen 5 und 6 und der Referenzstrukturen 13 sowie eine im vorliegenden Ausführungsbeispiel davon getrennt angeordnete Messvorrichtung 16 zum Vermessen der Funktionsflächen 5 und 6 und der Referenzstrukturen 13, die in Fig. 6 abgebildet ist. Eine als Drehscheibe ausgeführte Halterung 17 sitzt auf einer motorisch angetriebenen Achse der Bearbeitungsmaschine 15 und kann dadurch in Drehbewegung versetzt werden. Dabei weist die Bearbeitungsmaschine 15 ein Drehwerkzeug 18 und ein Fräswerkzeug 19 auf. Das Drehwerkzeug 18, das einen Diamanten 20 als spanabhebendes Element aufweist, kann mit Hilfe von Servomotoren auf die Halterung 17 zu und von dieser weg bewegt werden, und zwar bei Bedarf mit hoher Geschwindigkeit oder Frequenz, sowie radial zur Drehachse der Bearbeitungsmaschine 15 verschoben werden. Das Fräswerkzeug 19 weist einen ebenfalls motorisch in beliebiger Richtung verschiebbaren Fräskopf 21 mit einem spanabhebenden Element 22 auf, das ebenfalls durch einen Diamanten gegeben ist. Sowohl der Fräskopf 21 als auch das Drehwerkzeug 18 können dabei mit einer Genauigkeit im Submikrometerbereich kontrolliert relativ zur Halterung 17 bewegt werden und befinden sich damit auch jeweils in einer genau kontrollierbaren und vorzugsweise festen Lagebeziehung zueinander. Die Messvorrichtung 16, die bei anderen Ausführungen der Erfindung auch in der Bearbeitungsmaschine 15 integriert sein könnte, ist im vorliegenden Ausführungsbeispiel

rungsbeispiel für eine taktile Vermessung der Funktionsflächen 5 und 6 und der Referenzstrukturen 13 ausgelegt und weist dazu einen Messstift 23 auf, der kontrolliert über die zu vermessenden Flächen geführt werden kann, so dass diese dadurch gescannt werden.

Eine in der Fig. 6 nicht dargestellte Rechneereinheit der Messvorrichtung 16 ist programmtechnisch dazu eingerichtet, eine Abweichung der optischen Funktionsflächen 5 und 6 gegenüber einer relativ zu den Referenzstrukturen 13 definierten Sollform und Sollposition zu bestimmen. Zusätzlich ist sie dazu eingerichtet, die so ermittelte Abweichung in ein durch Freiheitsgrade der Bearbeitungsmaschine definiertes Koordinatensystem zu transformieren und korrigierte Einstellwerte für die Bearbeitungsmaschine 15 zu berechnen, durch die sich die ermittelte Abweichung bei einer weiteren Bearbeitung der optischen Anordnung 4 durch die Bearbeitungsmaschine 15 zumindest weitgehend kompensieren lässt.

Nachfolgend wird beschrieben, wie die optische Anordnung 4 mit Hilfe der Bearbeitungsmaschine 15 und der Messvorrichtung 16 hergestellt wird.

Zunächst wird die in Leichtbauweise ausgeführte Tragstruktur 9 auf die Halterung 17 aufgekittet, von der sie erst am Ende des Herstellungsverfahrens wieder gelöst wird.

Dann werden mit der Bearbeitungsmaschine 15 vier verschiedene Prozessschritte durchgeführt, wobei die Halterung 17 mit der Tragstruktur 9 bis zur Vollendung dieser Prozessschritte auf der Achse der Bearbeitungsmaschine 15 aufgespannt und dadurch fest mit der Bearbeitungsmaschine 15 verbunden bleibt. Dabei wird in einem ersten Prozessschritt aus einem durch

die Tragstruktur 9 gebildeten Rohling mittels des Drehwerkzeugs 18 die erste optische Funktionsfläche 5 herstellt, die dabei eine durch eine Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine 15 definierte Form erhält.

5 Dann wird der Träger der zweiten optischen Funktionsfläche 6 als weiterer Rohling auf die Tragstruktur 9 aufgesetzt und an den Befestigungspunkten 10 mit dieser zusammengefügt. In einem zweiten Prozessschritt wird dann wieder mittels des Drehwerkzeugs 18 aus dem  
10 weiteren Rohling die zweite optische Funktionsfläche 6 herstellt, und zwar mit einer Form und einer relativen Lage zur ersten Funktionsfläche 5, die wieder durch die Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine 15 definiert wird. In einem dritten Prozessschritt, der  
15 auch vor dem zweiten Prozessschritt durchgeführt werden kann, werden mit dem Fräswerkzeug 19 die Referenzstrukturen 13 auf dem durch die Tragstruktur 9 gebildeten Rohling mit definierter und messbarer relativer Lage zu den optischen Funktionsflächen 5 und  
20 6 herstellt. In einem weiteren Prozessschritt werden mit dem Fräswerkzeug 19 und unter Umständen teilweise auch mit dem Drehwerkzeug 18 die Anlageflächen 11 gebildet, von denen drei auf den Membranen der kinematischen Entkopplungen 12 zu liegen kommen.

25 Alternativ oder zusätzlich zu den Membranen könnten die kinematischen Entkopplungen 12 auch mit anderen Festkörpergelenken ausgeführt werden und dazu z. B. Stege aufweisen oder als Stabwerk ausgeführt sein.

30 Die optischen Funktionsflächen 5 und 6 werden bei ihrer Herstellung mit dem Drehwerkzeug 18 um eine gemeinsame Drehachse gedreht, die durch die Achse der Bearbeitungsmaschine 15 gegeben ist. Die vier beschriebenen Prozessschritte können auch in anderer  
35 zeitlicher Reihenfolge und unter Umständen auch teilweise gleichzeitig durchgeführt werden. Zusätzlich

können mit den beschriebenen Prozessschritten auch andere Strukturen auf der Tragstruktur 9 oder dem weiteren Rohling hergestellt werden, beispielsweise optische Gitter oder Anlagestrukturen für den Träger der zweiten optischen Funktionsfläche 6 um die Befestigungspunkte 10. Auch wäre es denkbar, dass der Rohling für die erste optische Funktionsfläche nicht durch die Tragstruktur 9 selbst gebildet wird, sondern, ähnlich dem Träger der zweiten optischen Funktionsfläche 6, durch ein in entsprechender Weise auf die Tragstruktur 9 gefügtes separates Bauteil. Bei anderen Ausführungen des Verfahrens, insbesondere bei einer anderen Geometrie der optischen Anordnung 4, können die genannten Prozessschritte auch durch ein für alle Prozessschritte gleiches Werkzeug der Bearbeitungsmaschine 15 durchgeführt werden, beispielsweise ausschließlich durch das Fräswerkzeug 19. Anstelle der vier im vorliegenden Ausführungsbeispiel vorgesehenen Referenzstrukturen 13 können auch anders gestaltete Referenzstrukturen vorgesehen werden, beispielsweise solche, die jeweils eine Linie oder eine Fläche definieren. Eine solche Referenzstruktur könnte z. B. auch durch eine zylinderförmige Fläche gebildet werden. Abhängig davon, wie die Referenzstrukturen 13 geformt sind, können diese auch in abweichender Zahl vorgesehen sein, so dass unter Umständen auch nur zwei oder drei oder auch z.B. bis zu sechs Referenzstrukturen 13 in dem geschilderten dritten Prozessschritt hergestellt werden können. In jedem Fall sollten die Referenzstrukturen 13, die alternativ oder zusätzlich auch an dem Träger der zweiten optischen Funktionsfläche 6 vorgesehen sein könnten, so ausgeführt werden, dass sie ein Koordinatensystem aufspannen, mit Bezug auf welches die Form, Position und Orientierung der optischen Funktionsflächen 5 und 6 eindeutig definiert werden können.

Nach den beschriebenen Prozessschritten, die mit der Bearbeitungsmaschine 15 durchgeführt werden, werden die Form und die Lage der optischen Funktionsflächen 5 und 6 auf der Tragstruktur 9 mit der Messvorrichtung 16 relativ zu den Referenzstrukturen 13 vermessen, wobei eine Abweichung der optischen Funktionsflächen 5 und 6 von einer Sollform und einer Sollposition, die relativ zu den Referenzstrukturen 13 exakt definiert sind, bestimmt wird. Dazu wird die Halterung 17 mit der Tragstruktur 9 von der Achse der Bearbeitungsmaschine 15 abgenommen und, wie in Fig. 6 gezeigt, in der Messvorrichtung 16 platziert. Bei der Vermessung der Referenzstrukturen 13 und der Funktionsflächen 5 und 6 wird auch eine Abweichung der Anlageflächen 11 und gegebenenfalls weiterer Strukturen von einer Sollform und Solllage relativ zu den Referenzstrukturen bestimmt. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel erfolgt das Vermessen taktil, indem der Messstift 23 der Messvorrichtung 16 über die zu vermessenden Flächen geführt wird. Bei anderen Ausführungen können die Referenzstrukturen 13 und die optischen Funktionsflächen 5 und 6 zur Bestimmung der genannten Abweichung alternativ oder zusätzlich auch interferometrisch vermessen werden. Das wird dadurch möglich, dass nicht nur die optischen Funktionsflächen 5 und 6, sondern auch die Referenzstrukturen 13 - wie auch die Anlageflächen 11 - mit optischer Oberflächengüte hergestellt werden.

Zum Bestimmen der Abweichung der optischen Funktionsflächen 5 und 6 von ihrer Sollform und Solllage werden in der Messvorrichtung 16 zunächst die Referenzstrukturen 13 vermessen, also deren Positionen ermittelt, worauf die optischen Funktionsflächen 5 und 6 in Relation zu diesen Referenzstrukturen 13

vermessen werden. Dabei wird wiederum zunächst mit Hilfe der vermessenen Referenzstrukturen 13 ein Ort eines Koordinatenursprungs bestimmt, der im vorliegenden Ausführungsbeispiel so gewählt wird, dass er auf der Drehachse der Bearbeitungsmaschine 15 liegt, genauer dort, wo diese Drehachse eine Oberfläche der optischen Anordnung 4 durchstößt. Dieser Drehpunkt und Koordinatenursprung kann im vorliegenden Ausführungsbeispiel dadurch sehr einfach aufgefunden werden, dass er genau zwischen zwei der vier Referenzstrukturen 13 liegt, während die anderen beiden Referenzstrukturen 13 auf einem größeren Kreis mit einem durch den genannten Drehpunkt und Koordinatenursprung definierten Mittelpunkt liegen. Die Koordinaten der vermessenen optischen Funktionsflächen 5 und 6 sowie der Anlageflächen 11 werden dann in einem Koordinatensystem mit diesem Koordinatenursprung angegeben. Da die Referenzstrukturen durch die Bearbeitungsmaschine 15 hergestellt sind, handelt es sich bei diesem Koordinatensystem um ein System, das eine definierte Lage mit Bezug auf die Bearbeitungsmaschine 15 hat, wenn die Halterung 17 wieder mit der Bearbeitungsmaschine verbunden wird. In beschriebener Weise wird also das Maschinenkoordinatensystem der Bearbeitungsmaschine 15 in der - vorerst halbfertigen - optischen Anordnung 4 wieder aufgefunden, was es erlaubt, die genannte Abweichung von Form und Lage der optischen Funktionsflächen 5 und 6 nicht nur relativ zu den Referenzstrukturen 13, sondern damit auch relativ zur Bearbeitungsmaschine 15 zu bestimmen. Daher können Fehler sowohl der Form als auch der Lage und insbesondere der relativen Lage der Funktionsflächen 5 und 6 zueinander durch die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen drastisch reduziert werden. Vorzugsweise wird das genannte Koordinatensystem, in dem auch die Abweichung gegenüber der Sollform und

der Solllage bestimmt wird, ferner so orientiert, dass eine Koordinatenachse mit der Drehachse übereinstimmt, die wiederum einem Freiheitsgrad des beweglichen Drehwerkzeugs 18 und des Fräskopfs 19 entspricht.

Nachdem die beschriebenen Prozessschritte ein erstes Mal durchgeführt und die Funktionsflächen 5 und 6 sowie die Anlageflächen 11 ein erstes Mal vermessen sind, werden die vier beschriebenen Prozessschritte mindestens einmal wiederholt, und zwar mit einer derart geänderten Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine 15, dass die beim Vermessen ermittelte Abweichung verringert wird. Das Bestimmen der Abweichung durch die Messvorrichtung 16 und das anschließende Wiederholen der Prozessschritte mit einer in Abhängigkeit von der gemessenen Abweichung geänderten Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine 15 kann dabei mehrfach hintereinander erfolgen, bis durch diese Iteration die am Schluss verbleibende Abweichung eine vorgegebene Toleranz im Submikrometerbereich unterschreitet.

Dass dadurch schon mit sehr wenigen Iterationsschritten eine außerordentlich hohe Genauigkeit erreicht werden kann, und zwar sowohl bezüglich der Form der optischen Funktionsflächen 5 und 6 als auch bezüglich deren relativer Lage zueinander, ist in Fig. 7 zu erkennen. Dort ist eine Abweichung  $\Delta z$  der nach einer erstmaligen Durchführung der genannten Prozessschritte gemessenen Funktionsflächen 5 und 6 gegenüber einer Idealfläche für einen durch den Koordinatenursprung verlaufenden Schnitt durch die Funktionsflächen 5 und 6 mit a gekennzeichnet. Das entsprechende Ergebnis einer zweiten Vermessung nach einer zweiten Durchführung der Prozessschritte mit geänderter Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine 15 ist

in der gleichen Figur mit b gekennzeichnet. In diesem Beispiel ist die Korrektur der Ansteuerung für den zweiten Durchlauf der Prozessschritte offensichtlich zu groß ausgefallen, weshalb die Ansteuerung noch einmal geringfügig geändert wird. Nach einem dritten Durchlauf der Prozessschritte ergeben sich dann die in Fig. 7 mit c gekennzeichneten Werte für die Abweichung  $\Delta z$ , die vollständig im Submikrometerbereich liegen.

## 5 Patentansprüche

1. Verfahren zur Fertigung einer optischen Anordnung (4) mit mindestens zwei in fester Lagebeziehung zueinander auf einer gemeinsamen Tragstruktur (9) angeordneten optischen Funktionsflächen (5, 6) definierter Form, bei dem
- 10 in einem ersten Prozessschritt durch eine Bearbeitungsmaschine (15) aus einem durch die Tragstruktur (9) gebildeten oder auf der Tragstruktur (9) angeordneten Rohling eine erste optische Funktionsfläche (5) mit einer durch eine Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine (15) definierten Form hergestellt wird,
- 15 in einem zweiten Prozessschritt durch die Bearbeitungsmaschine (15) aus dem genannten Rohling oder einem auf der Tragstruktur (9) angeordneten weiteren Rohling zumindest eine zweite optische Funktionsfläche (6) mit durch die Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine (15) definierter Form und definierter relativer Lage zur ersten Funktionsfläche (5) hergestellt wird und
- 20 in einem dritten Prozessschritt durch die Bearbeitungsmaschine (15) auf und/oder an der Tragstruktur (9) und/oder dem Rohling und/oder dem weiteren Rohling zumindest eine Referenzstruktur (13) mit definierter und messbarer relativer Lage zu den optischen Funktionsflächen (5, 6) hergestellt wird,
- 25 wobei die Tragstruktur (9) bis zur Vollendung aller der genannten drei Prozessschritte, die in
- 30
- 35

beliebiger zeitlicher Folge oder gleichzeitig ausgeführt werden, fest mit der Bearbeitungsmaschine (15) verbunden bleibt und

wobei anschließend die Form und die Lage der mindestens zwei optischen Funktionsflächen (5, 6) auf der Tragstruktur (9) in einem Messaufbau relativ zu der zumindest einen Referenzstruktur (13) vermessen werden und eine Abweichung der optischen Funktionsflächen (5, 6) von einer Sollform und Sollposition, die relativ zu der zumindest einen Referenzstruktur (13) exakt definiert ist, bestimmt wird,

wonach die genannten drei Prozessschritte mindestens einmal mit einer derart geänderten Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine (15) wiederholt werden, dass die genannte Abweichung verringert wird.

2. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass das Bestimmen der Abweichung und das anschließende Wiederholen der drei genannten Prozessschritte mit geänderter Ansteuerung der Bearbeitungsmaschine (15) deterministisch mehrfach erfolgt, bis die verbleibende Abweichung eine vorgegebene Toleranz unterschreitet.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Rohling und/oder der weitere Rohling erst nach Beginn oder Abschluss mindestens eines der genannten Prozessschritte auf der mit der Bearbeitungsmaschine (15) verbundenen Tragstruktur (9) angeordnet wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass im Verlauf der

genannten Prozessschritte zusätzlich zu den optischen Funktionsflächen (5, 6) und der mindestens einen Referenzstruktur (13) durch die Bearbeitungsmaschine (15) zumindest eine weitere Struktur auf und/oder an der Tragstruktur (9) und/oder dem Rohling und/oder dem weiteren Rohling hergestellt wird, deren Abweichung von einer Sollform und Solllage relativ zur mindestens einen Referenzstruktur (13) beim Vermessen ebenfalls bestimmt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die weitere Struktur zumindest eine Anlage- und/oder Auflagestruktur zur Anlage bzw. Aufnahme des Rohlings oder des weiteren Rohlings an der Tragstruktur (9) bildet oder dass sie eine Anlagegeometrie bildet, an der anliegend die Tragstruktur (9) in ein optisches Gerät einsetzbar ist und durch die eine Lage der Tragstruktur (9) im optischen Gerät bezüglich zumindest eines Freiheitsgrads, vorzugsweise bezüglich aller translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade, festgelegt ist, oder dass sie ein optisches Gitter auf mindestens einer der optischen Funktionsflächen (5, 6) bildet.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass die mindestens eine weitere Struktur auf einer an und/oder in der Tragstruktur (9) vorgesehenen kinematischen Entkopplung (12) gebildet wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei die kinematische Entkopplung (12) monolithisch mit der Tragstruktur (9) gebildet wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 oder 7, wobei die kinematische Entkopplung (12) mit mindestens einem Festkörpergelenk und/oder zumindest einem Steg und/oder zumindest einer Membran und/oder als Stabwerk ausgeführt wird.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zumindest einer der genannten Prozessschritte durch ein Drehwerkzeug (18) der Bearbeitungsmaschine (15), das vorzugsweise einen Diamanten (20) als spanabhebendes Element aufweist, durchgeführt wird.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zumindest einer der genannten Prozessschritte durch ein Fräswerkzeug (19) der Bearbeitungsmaschine (15), das vorzugsweise einen Diamanten als spanabhebendes Element (22) aufweist, durchgeführt wird.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Prozessschritte zur Strukturierung der optischen Funktionsflächen (5, 6) und der mindestens einen Referenzstruktur (13) teilweise mit mindestens einem Drehwerkzeug (18) und teilweise mit mindestens einem Fräswerkzeug (19) der Bearbeitungsmaschine (15), die vorzugsweise jeweils einen Diamanten (20) als spanabhebendes Element (22) aufweisen, durchgeführt werden, wobei die Bearbeitung durch das Drehwerkzeug (18) und das Fräswerkzeug (19) in einer festen Werkzeuganordnung nacheinander oder abwechselnd durchgeführt werden.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eine

der optischen Funktionsflächen (5, 6) ein Spiegel ist, vorzugsweise ein Spiegel mit metallischer Spiegeloberfläche.

- 5           13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die optischen Funktionsflächen (5, 6) plan oder konkav oder konvex oder frei geformt oder mit einer Kombination solcher Formen gebildet werden.
- 10           14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die zumindest eine Referenzstruktur (13) zumindest einen Punkt und/oder zumindest eine Linie und/oder zumindest eine Fläche definiert und/oder zumindest eine sphärisch konkave Fläche und/oder zumindest eine zylinderförmige Fläche aufweist oder bildet oder kreuzförmig ausgeführt ist.
- 15           15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die mindestens eine Referenzstruktur (13) und/oder die optischen Funktionsflächen (5, 6) zur Bestimmung der genannten Abweichung taktil und/oder interferometrisch und/oder mittels einer abbildenden Optik vermessen wird.
- 20           16. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die mindestens eine Referenzstruktur (13) mit optischer Oberflächengüte hergestellt wird und/oder so hergestellt werden, dass sie gemeinsam mit zumindest einer der optischen Funktionsflächen (5, 6) interferometrisch vermessen werden kann.
- 25           17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Referenzstrukturen (13) so ausgestaltet werden, dass anhand der Referenzstruktu-
- 30

- ren (13) die Form und/oder Position und/oder Orientierung zumindest einer der optischen Funktionsflächen (5, 6) relativ zu den Referenzstrukturen (13) bezüglich einer, zweier oder aller Raumrichtungen und/oder einer, mehrerer oder aller Raumachsen eindeutig bestimmbar ist.
- 5
18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zwei, drei oder bis zu sechs Referenzstrukturen (13) hergestellt werden.
- 10
19. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zumindest zwei der optischen Funktionsflächen (5, 6) eine gemeinsame Drehachse aufweisen, um welche die Tragstruktur (9) in der Bearbeitungsmaschine (15) zur Herstellung dieser Funktionsflächen (5, 6) gedreht wird.
- 15
20. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zum Bestimmen der Abweichung zunächst die Referenzstrukturen (13) vermessen werden und dann die optischen Funktionsflächen (5, 6) in Relation zu den Referenzstrukturen (13) vermessen werden.
- 20
21. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei mittels der Referenzstrukturen (13) zunächst eine Position eines Koordinatenursprungs bestimmt wird, der während der Prozessschritte mit Bezug auf die Bearbeitungsmaschine (15) eindeutig definiert ist, und dann die optischen Funktionsflächen (5, 6) in Relation zu dem Koordinatenursprung vermessen werden.
- 25
22. Optisches Gerät, umfassend eine durch ein Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche hergestellte oder herstellbare optische Anordnung (4).
- 30

23. Optisches Gerät nach Anspruch 22, wobei eine Position und Orientierung der optischen Anordnung (4) in dem optischen Gerät durch zumindest eine Anlagegeometrie festgelegt ist, die als weitere Struktur der optischen Anordnung (4) mit optischer Genauigkeit hergestellt ist und mit der die optische Anordnung (4) an einem Träger (2) des optischen Geräts anliegt.
24. Optisches Gerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche 22 oder 23, dadurch gekennzeichnet, dass es ein Teleskop (1) ist.
25. Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 21, umfassend eine Bearbeitungsmaschine (15) zum Herstellen der mindestens zwei Funktionsflächen (5, 6) und der mindestens einen Referenzstruktur (13) sowie eine davon getrennt angeordnete oder in der Bearbeitungsmaschine (15) integrierte Messvorrichtung (16) zum Vermessen der Funktionsflächen (5, 6) und der mindestens einen Referenzstruktur (13), wobei die Messvorrichtung (16) programmtechnisch eingerichtet ist, die Abweichung der optischen Funktionsflächen (5, 6) gegenüber einer relativ zu der mindestens einen Referenzstruktur (13) definierten Sollform und Sollposition zu bestimmen.
26. Vorrichtung nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, dass die Messvorrichtung (16) programmtechnisch eingerichtet ist, die ermittelte Abweichung in ein durch Freiheitsgrade der Bearbeitungsmaschine (15) definiertes Koordinatensystem zu transformieren und/oder korrigierte Einstellungswerte für die Bearbeitungsmaschine (15) zu berechnen, durch die die Abweichung bei

einer weiteren Durchführung der Prozessschritte  
zumindest weitgehend kompensiert werden kann.

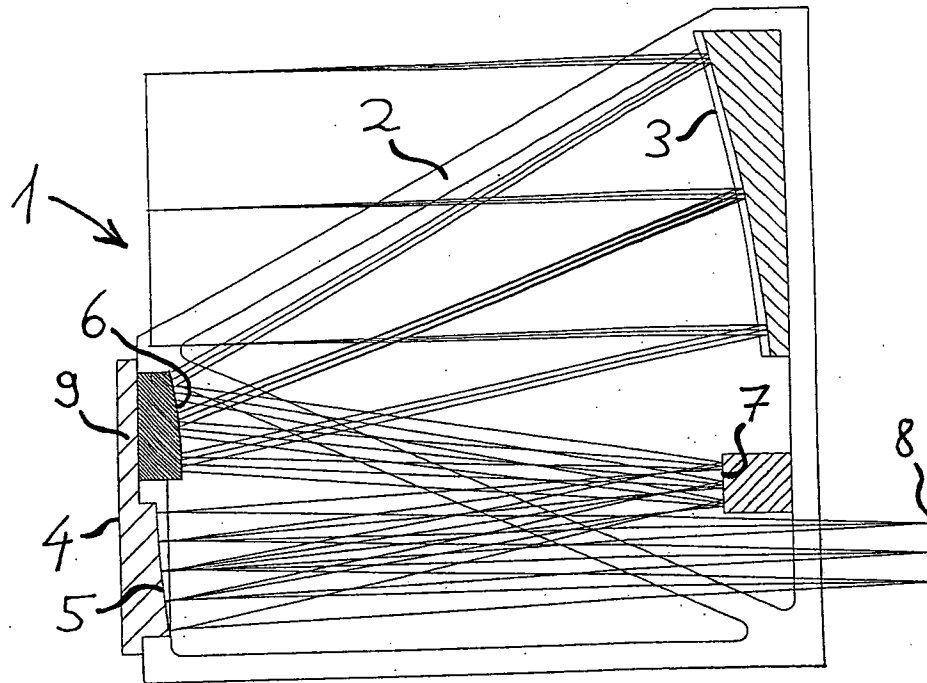


Fig. 1

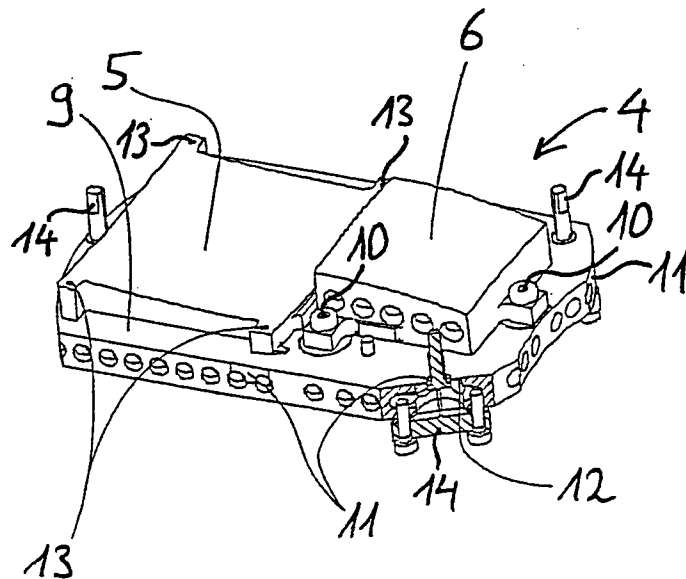


Fig. 2

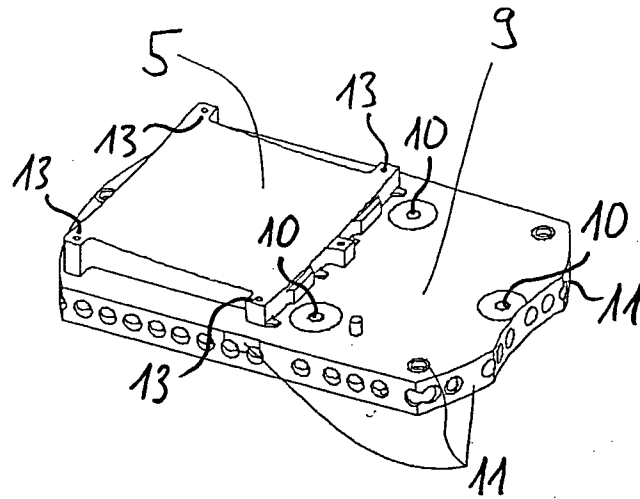


Fig. 3

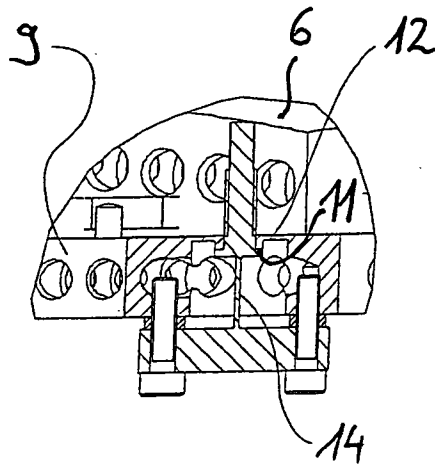


Fig. 4

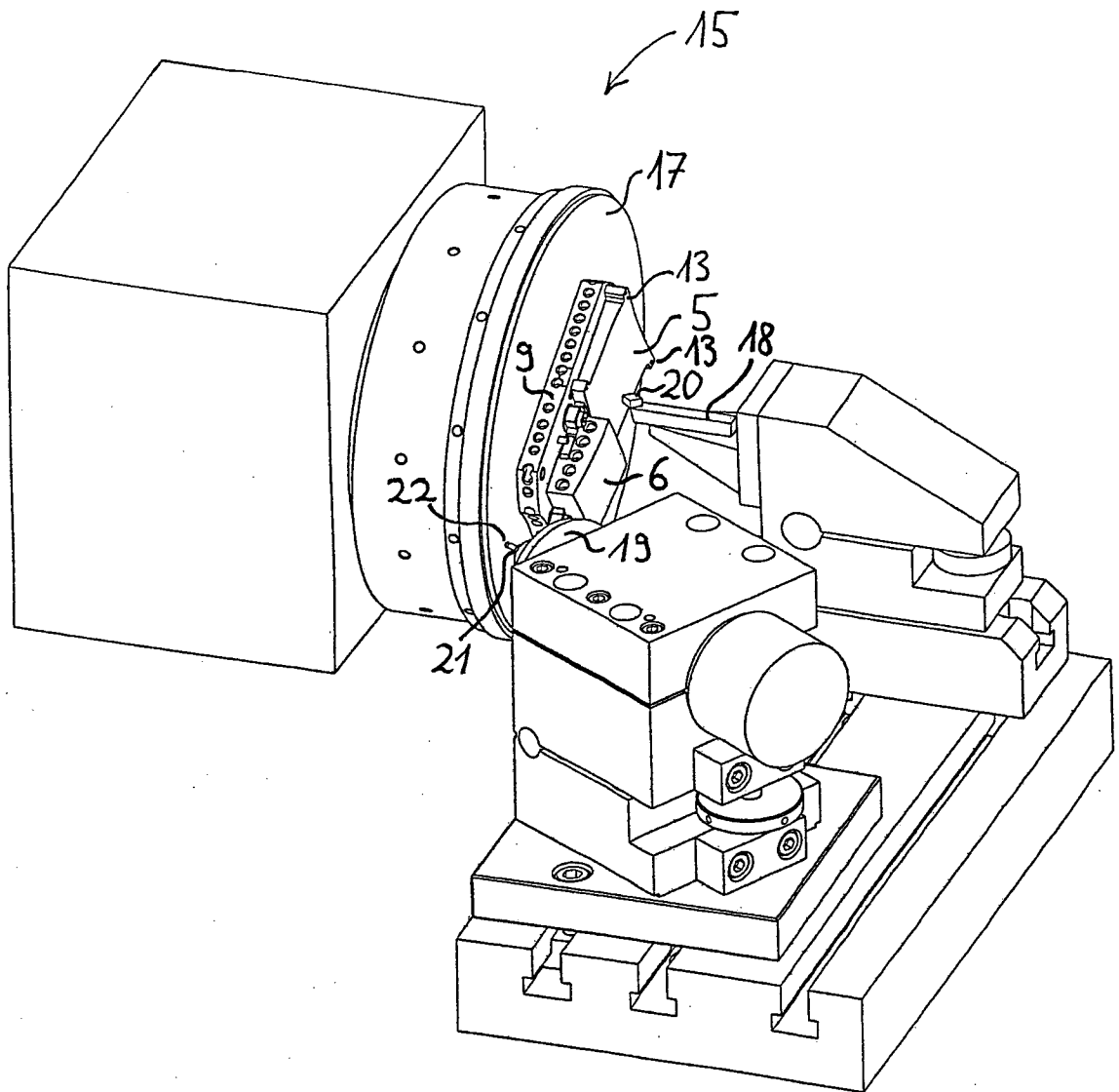


Fig. 5

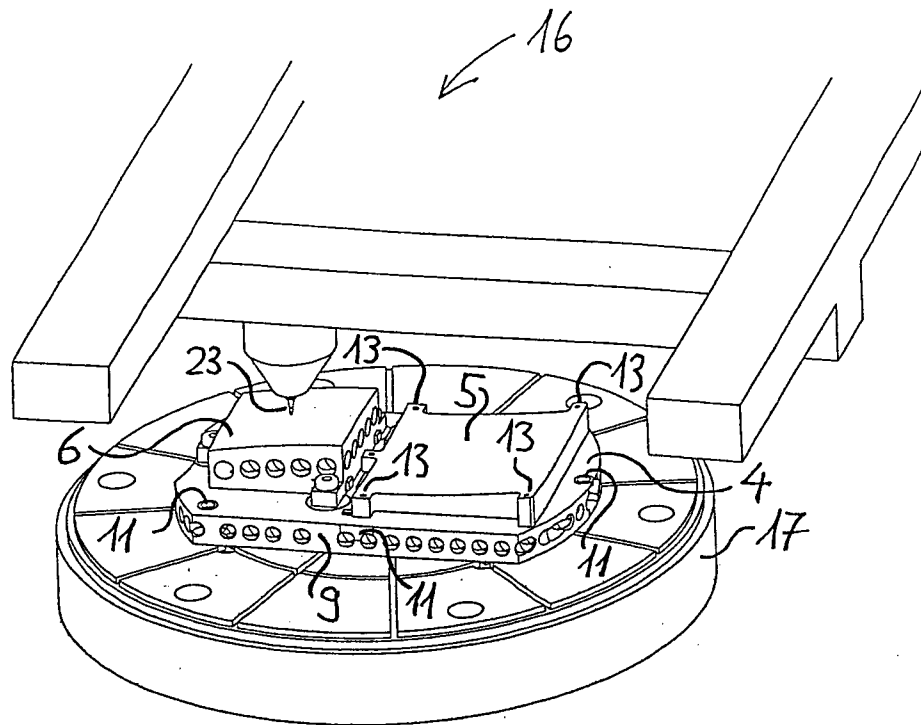


Fig. 6

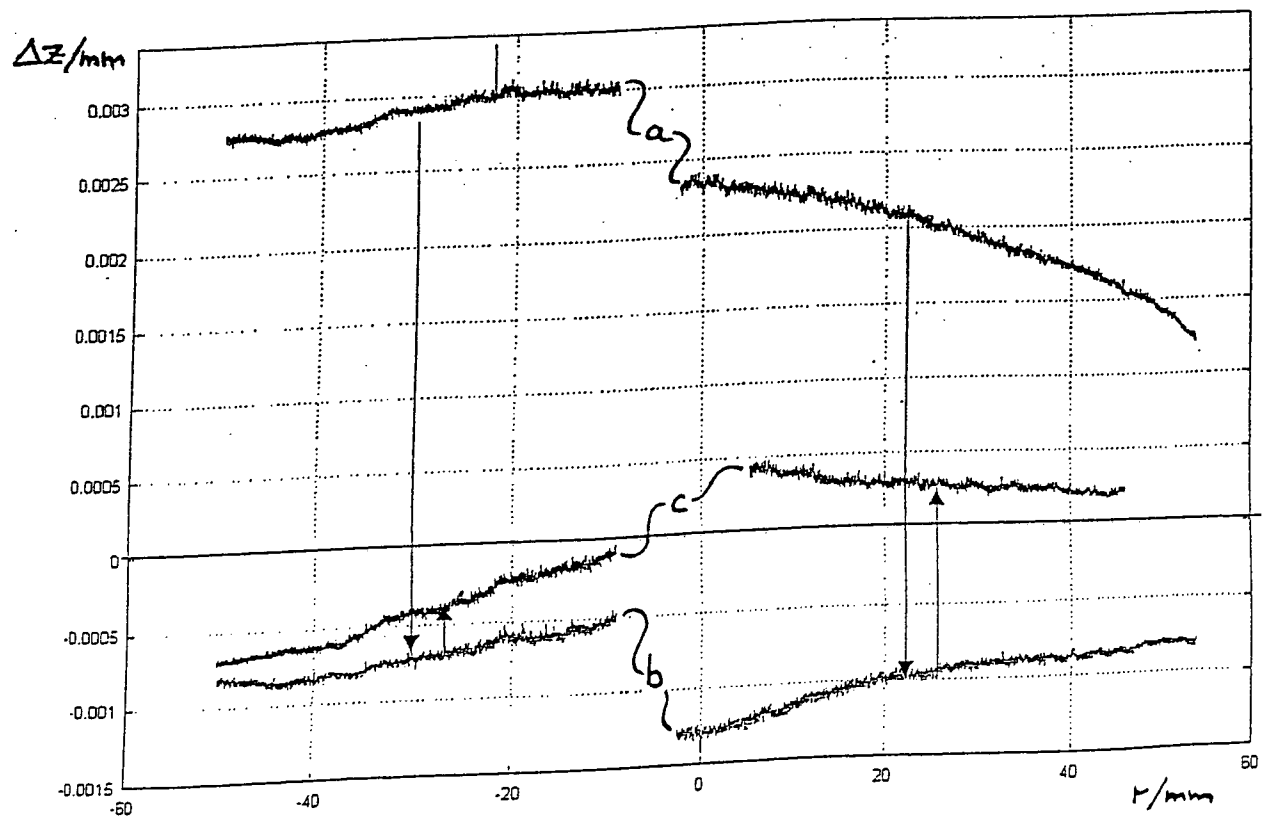


Fig. 7