



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11) **EP 1 478 490 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:  
**25.10.2006 Patentblatt 2006/43**

(51) Int Cl.:  
**B24B 13/06** <sup>(2006.01)</sup> **B24B 49/00** <sup>(2006.01)</sup>  
**B24B 51/00** <sup>(2006.01)</sup>

(21) Anmeldenummer: **03742562.6**

(86) Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/EP2003/001749**

(22) Anmeldetag: **20.02.2003**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 2003/070427 (28.08.2003 Gazette 2003/35)**

(54) **VERFAHREN ZUM NACHSCHLEIFEN UND POLIEREN VON FREIFORMFLÄCHEN, INSBESONDERE VON ROTATIONSSYMMETRISCHEN ASPHÄRISCHEN OPTISCHEN LINSEN**

METHOD FOR RE-GROUNDING AND POLISHING FREE-FORM SURFACES, ESPECIALLY ROTATIONALLY SYMMETRICAL ASPHERICAL OPTICAL LENSES

PROCEDE DE FINITION ET DE POLISSAGE DE SURFACES DE FORME LIBRE, NOTAMMENT DE LENTILLES OPTIQUES ASPHERIQUES A SYMETRIE DE REVOLUTION

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IT LI LU MC NL PT SE SI SK TR**

(74) Vertreter: **Liedtke, Klaus**  
**Liedtke & Partner**  
**Patentanwälte**  
**Postfach 10 19 16**  
**99019 Erfurt (DE)**

(30) Priorität: **21.02.2002 DE 10207379**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**24.11.2004 Patentblatt 2004/48**

(56) Entgegenhaltungen:  
**WO-A-00/32353** **FR-A- 2 448 417**  
**US-A- 4 606 151** **US-A- 4 958 463**

(73) Patentinhaber: **asphericon GmbH**  
**07745 Jena (DE)**

- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 1997, no. 07, 31. Juli 1997 (1997-07-31) -& JP 09 066464 A (TOPCON CORP), 11. März 1997 (1997-03-11) in der Anmeldung erwähnt**

(72) Erfinder:

- **KIONTKE, Sven**  
**07613 Hartmannsdorf (DE)**
- **DÖHLER, Hermann**  
**07778 Dornburg (DE)**

**EP 1 478 490 B1**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Schleifen und Polieren von Freiformflächen, insbesondere von rotationssymmetrischen asphärischen optischen Linsen. Im Gegensatz zu bisher vielfach eingesetzten sphärischen Linsen besitzen diese asphärischen Linsen spezielle optische Eigenschaften, die theoretisch das physikalische Optimum darstellen. Das bedeutet in der Praxis, dass die mit diesen asphärischen Linsen realisierten Abbildungen wesentlich lichtstärker und schärfer sind. Sie vermeiden Fehler wie die sphärische Abberation. Ähnliches gilt für die noch unregelmäßigeren Flächen, die hier als Freiformflächen bezeichnet werden. Sie können konische, wellenartige, zylindrische oder andere Formen annehmen. Die möglichen Einsatzgebiete sind bei ihnen noch größer.

Es besteht folglich die dringende Notwendigkeit, diese Oberflächen kostengünstig zu fertigen. Dies ist derzeit nicht möglich, da sich alle im Einsatz befindlichen Verfahren auf die Fähigkeiten erfahrener Bediener und/oder den Einsatz von Produktionsautomaten stützen, die nur mit sehr kleinen Werkzeugen arbeiten. Die Durchmesser, dieser Werkzeuge sind meist nur etwa ein Zehntel so groß wie die der Werkstücke. Aus diesem Grund sind die bisher schleifend und polierend hergestellten Asphären sehr teuer.

Diese Erfindung setzt an diesen Problempunkten an. Zum einen werden das Schleifen und das Polieren und hierbei im besonderen die korrespondierenden Korrekturdurchgänge nicht mehr von Hand, sondern durch ein Verfahren nach den Ansprüchen 1 fortfolgend (ff) gesteuert. Zum anderen sorgen die beschriebenen Werkzeuge für einen wesentlich höheren, aber trotzdem genau steuerbaren und reproduzierbaren Abtrag. Die Erfindung ermöglicht damit wesentlich geringere Fertigungskosten.

**[0002]** Es gab bereits mehrere Versuche diese Problematik zu lösen, unter anderem durch das Verfahren des Patentes JP9066464. Bisher jedoch ohne Erfolg. Bei dem in dieser Druckschrift offenbarten Verfahren wird die zu bearbeitende Oberfläche in Bereiche eingeteilt. Anschließend werden alle diese zusammen in einem linearen Gleichungssystem berechnet.

In der Praxis ist es jedoch unmöglich, ein solches Gleichungssystem in Kombination mit effektiven Werkzeugen für die gesamte Freiformfläche zu lösen. Darauf weist, auch das in der besagten Druckschrift beschriebene Beispiel durch seine extreme Einfachheit hin. Der hier dargestellte Fehler ist in dem Sinne gar keiner, da nur eine fast ebene Fläche bearbeitet wird.

**[0003]** Folglich ist es nicht möglich, mit diesem Verfahren die Genauigkeit der Oberfläche durch entsprechende Steuerung der Werkzeuge zu steigern.

**[0004]** Nach FR 2 448 417 A ist ein Verfahren zum Bearbeiten optischer Elemente, gemäss dem Oberbegriff des Anspruchs 1, bekannt, bei dem die Oberflächen der optischen Fläche mit einem Werkzeug bearbeitet wird, dessen Durchmesser wesentlich kleiner ist als der

Durchmesser des zu bearbeitenden optischen Teils. Dabei werden für Ringgebiete der optischen Fläche Anpressdruck und Aufenthaltsdauer des Werkzeugs als veränderliche Parameter genommen.

**[0005]** Nachteilig ist dabei ebenfalls, dass das Verfahren wegen der kleinen Werkzeuge sehr zeitaufwendig ist und dass das Verfahren nur für rotationssymmetrische optische Teile geeignet ist.

**[0006]** Gegenstand der Erfindung ist es, diese Nachteile zu vermeiden.

**[0007]** Diese Aufgabe wird durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst. Die Freiformfläche (1 oder 4) wird in Bereiche (Fig. 1 und Fig. 2), z.B. von der Größe des Werkzeuges entsprechend, aufgeteilt. Jeder dieser Bereiche enthält dann noch immer eine Vielzahl von Stellen, die in die Berechnung einfließen und wird einzeln mit einem separaten linearen Gleichungssystem gelöst. Da sich die Bereiche gegeneinander resultierend aus der Breite des Bearbeitungswerkzeuges beeinflussen, muss man deren Wechselwirkung berücksichtigen. Zu diesem Zweck fließt in das jeweilige lineare Gleichungssystem eine nullte Näherung ein, welche diese Wechselwirkung abschätzt. Diese Wechselwirkung zeigt auch das auf der Fläche (4) im Bereich B8 positionierte Werkzeug (2), welches trotzdem B 7 bearbeitet und damit beeinflusst.

**[0008]** Weiterhin werden alle Werkstück- und Werkzeugspezifika wie die Rotationsgeschwindigkeiten berücksichtigt. Die aus der Vielzahl der Gleichungssysteme resultierende Vielzahl der Lösungsmengen werden wieder kombiniert und zur Steuerung des Werkzeuges während des Schleifens oder Polierens eingesetzt.

**[0009]** In Abhängigkeit von der erforderlichen Oberflächengenauigkeit und den vorhandenen Fehlern im Vergleich zum Durchmesser des verwendeten Werkzeuges sind unterschiedliche Größen der Bereiche sinnvoll. Auf Grund der Wechselwirkung der Bereiche untereinander in Abhängigkeit von der Werkzeugbreite ist es sinnvoll, dass die Bereiche die gleiche oder die doppelte Breite des Werkzeuges aufweisen (siehe auch Fig. 2).

**[0010]** Durch die Kontrolle der das Schleifen und das Polieren bestimmenden Einflussfaktoren besteht die Möglichkeit, den Abtrag auf der Oberfläche per Verweildauer und/oder per Rotationsgeschwindigkeit und/oder per Anpreßdruck des Werkzeuges und/oder per Rotationsgeschwindigkeit des Werkstückes zu steuern.

**[0011]** Durch den Einsatz des Verfahrens wird es möglich, gerade nur so viel Material von der Oberfläche abzutragen, dass die Sollfläche danach so entsteht, dass der tiefste Punkt der unkorrigierten (Ist-) Fläche (Fig. 5 Minima der Kurve 7), da dieser nahezu nicht bearbeitet wurde, immer noch Teil der erzeugten Sollfläche ist. Praktisch wurde so wenig wie möglich Material abgetragen, aber trotzdem die Sollform realisiert. Es wurde der minimal notwendige Abtrag realisiert. Dies ist ein entscheidender Aspekt zur Reduzierung der Bearbeitungszeit. Bisher wird meist so lange poliert, bis irgendwann die Mindestgenauigkeit erfüllt wird. Das hat zur Folge, dass eher so viel Material wie in Fig. 6 Kurve 13 darge-

stellt abgetragen und die Bearbeitung damit unnötig verlängert wird.

**[0012]** Im Gegensatz zu beliebigen Freiformflächen weisen rotationssymmetrische Freiformflächen eine Regelmäßigkeit in Form Ihrer Rotationssymmetrie auf. Es ist unerheblich, wie die Linse innerhalb Ihrer Symmetrieachse verdreht wird, der Querschnitt der Oberflächenform wie beispielsweise in Fig. 4 Oberfläche (1) bleibt gleich. Werden selbige Oberflächen mit Verfahren, welche die Rotationssymmetrie ausnutzen (siehe ebenfalls Fig. 4), bearbeitet, so sind auch die Fehler der Oberfläche rotationssymmetrisch verteilt. Dann ist es möglich, die Steuerung des Abtrages nur radial durchzuführen. Für die Steuerung einer solchen Bearbeitung wird das vorgestellte Verfahren in eine eindimensionale Form überführt. Der virtuelle Abtrag und die Verteilung der Bereiche beschränkt sich auf den eindimensionalen, radialen Bereich (siehe Fig. 5). Die Bearbeitung geschieht dann unter Rotation von Werkzeug und Werkstück.

**[0013]** Da bisher keine Verfahren existieren, die den Einsatz großer Werkzeuge ermöglichen und gleichzeitig die Oberflächengenauigkeit erhöhen bzw. auf ein gewünschtes Maß steigern, war es bisher immer notwendig, mehrfach nachzubearbeiten und wiederholt nachzumessen. Dieses Verfahren ermöglicht erstmals simultan den Einsatz großer Werkzeuge bei gleichzeitiger Steigerung der Oberflächengenauigkeit in einem Bearbeitungsdurchgang. Beide Aspekte in Kombination mit der Kontrolle aller die Bearbeitung beeinflussenden Größen verringern die Produktionszeit auf zehn und weniger Minuten (vergleiche hierzu auch das Ausführungsbeispiel).

**[0014]** Zum Teil werden sehr hohe Anforderung an die Genauigkeit der Oberflächen gestellt. Trotzdem sollen die Fertigungskosten gering gehalten werden. Bisher ist das nicht möglich. Bereits bei vergleichsweise großen und breiten Fehlern wird mit kleinen Werkzeugen gearbeitet, woraus sehr lange Fertigungszeiten resultieren. Dazu kommt, dass zwischen den Bearbeitungsdurchgängen, sowohl bei der Verwendung von gleichen als auch von anderen, gewechselten Werkzeugen, wiederholt die Oberfläche vermessen wird. Dies erfordert durch Ein- und Ausspannen und die erforderliche Messzeit einen hohen Aufwand, der die Produktionskosten stark mehr.

Durch die werkzeugspezifische Verwendung des virtuellen Abtrages dieses Verfahrens, ist das Ergebnis einer ersten Bearbeitung mit einem größeren Werkzeug auch ohne Nachmessung bekannt (siehe Fig. 7 Kurve 10). Darauf aufbauend kann zur weiteren Steigerung der Genauigkeit auf Basis desselben Verfahrens unter Anwendung eines anderen für das kleinere Werkzeug spezifischen virtuellen Abtrages eine Steuerung für die sich anschließende Bearbeitung mit diesem kleineren Werkzeug berechnet werden. Die Gesamtbearbeitung ist wesentlich kürzer, als wenn von Beginn an nur mit dem zuletzt verwendeten, kleineren Werkzeug bearbeitet worden wäre. Die Einsparung des Nachmessens ermöglicht weitere Kostensenkungen.

**[0015]** Um die Einsatzbereiche des Verfahrens zu vergrößern, werden neben nicht überlappenden Bereichen auch überlappende Bereiche zugelassen. Die in Fig. 10 gezeigten Bereiche B1, B2, B3 ... B9 überlappen paarweise zu 50 %. Beispielsweise überlappt B3 zur Hälfte mit B4 und dieser wiederum zur Hälfte mit B5. Es existieren jeweils 16 gemeinsame Stützstellen bzw. Berechnungspunkte.

Eine Ausweitung der Überlappung der Bereiche bis zu dem Extremfall, dass sich benachbarte Bereiche nur noch um einen Wert unterscheiden, ergibt umso bessere Steuerungen für die Korrektur der Oberfläche. Für das Beispiel in Fig. 10 würde das bis zu 132 Bereiche (B1, B2, ..., B132) zur Folge haben.

Bezüglich der Überlappung der Bereiche gilt das entsprechende auch für den zweidimensionalen Fall. Die Anzahl der Bereiche nimmt hier quadratisch zu, da die Überlappung der Bereiche in zwei Dimensionen möglich ist.

**[0016]** Mit diesem Verfahren ist es erstmals möglich, asphärische Glaslinsen schleifend und polierend innerhalb von 20 min herzustellen.

**[0017]** Insbesondere konkave Linsen stellen sehr hohe Ansprüche an die Steuerung während der Bearbeitung. Es ist unter Anwendung dieses Verfahrens erstmalig möglich, konkave Linsen mit einem best fit Krümmungsradius von weniger 50 mm innerhalb von 40 min. schleifend und polierend mit einer pv-Genauigkeit von besser als 600 nm herzustellen.

**[0018]** Zur entscheidenden Verringerung der Bearbeitungszeiten ermöglicht dieses Verfahren den Einsatz von Werkzeugen (2) mit Durchmessern von einem Achtel bis einem Viertel des Durchmessers des Werkstückes (Fig. 11) und ist trotzdem in der Lage die Oberfläche (1) zu korrigieren (siehe auch im Ausführungsbeispiel). Im Vergleich mit bisherigen Werkzeugen mit der Größe von etwa einem Zehntel wird allein durch den Einsatz dieser Werkzeug eine mehr als Versechsfachung des Abtrages und eine entsprechende Verkürzung der Bearbeitungszeit möglich.

**[0019]** Bestimmend für den Einsatz von Werkzeugen sind die vorhandenen Fehler (7 in Fig. 12), die zum Erreichen der geforderten Genauigkeit entfernt werden müssen. Allgemein bekannt ist, dass die zur Korrektur verwendeten Werkzeuge nur so breit sein dürfen, wie der schmalste Fehler, hier 20 mm, der entfernt werden muss. Mit diesem Verfahren ist es möglich, Werkzeuge einzusetzen, die doppelt so breit sind resp. den doppelten Durchmesser von 40 mm aufweisen, wie die zu korrigierenden Fehler. Die Fehler werden wie bisher korrigiert, jedoch in einem viertel der Zeit, da sich die Bearbeitungsfläche mit dem im Vergleich zu bisher doppelt so breiten Werkzeug vervierfacht.

**[0020]** Um einen über die Zeit konstanten Abtrag zu gewährleisten, müssen die Bearbeitungsbedingung gleichbleibend sein. Deshalb soll die Polier- oder Schleifolie (14 aus Fig. 13), das mit der Bearbeitungsoberfläche in Kontakt tretende Material des Werkzeuges (2), eine homogene Struktur besitzen, die frei von Blasen, Rissen

oder ähnlichem ist. Auch die Zusammensetzung des Materiales selber soll makroskopisch gleichmäßig sein.

**[0021]** Damit aber trotzdem eine gleichmäßige Polier- oder Kühlmittelzufuhr (16) gewährleistet werden kann, werden senkrechte Kanten 15 (Fig. 13) in dieses homogene Material des Polier- oder Schleifpad's eingebracht, durch die das Polier- oder Kühlmittel unter der gesamten Werkzeugfläche annähernd gleichmäßig wirken kann.

**[0022]** Um die Bearbeitungsgeschwindigkeit zu steigern, ist es notwendig, die Abtragsfläche zu vergrößern. Eine Vergrößerung der Werkzeuge ist jedoch nicht möglich, da dann die notwendige Genauigkeit nicht mehr erreicht werden kann.

Dieses Problem umgeht man, in dem mehrere Werkzeuge (2) gleichzeitig auf der Freiformfläche (1 oder 4) zur Bearbeitung eingesetzt werden (Fig. 14 und 15). Die erreichbare Genauigkeit ist ebenso hoch wie bei der Verwendung nur eines Werkzeuges dieser Größe.

**[0023]** Ein reproduzierbarer Abtrag wird hierbei im wesentlichen dann erzielt, wenn die Werkzeuge senkrecht auf der Oberfläche aufliegen. Fig. 16 verdeutlicht eine Anordnung mehrer Werkzeuge, die alle tangential auf der Oberfläche aufliegen.

**[0024]** Bei der Bearbeitung rotationssymmetrische Freiformflächen ist die Bewegung jedes der Werkzeuge entsprechend dem oben beschriebenen Verfahren entlang einer radialen Strecke vorteilhaft.

**[0025]** Sollen besonders viele Werkzeuge gleichzeitig die Fläche bearbeiten, ist es vorteilhaft, wenn die Bewegung der Werkzeuge entlang nicht-radialer Strecken erfolgt.

**[0026]** Sind die Werkzeuge besonders angeordnet, so ist eine Bearbeitung der Fläche auch dann möglich und sinnvoll, wenn sich die Werkzeuge nicht bewegen.

**[0027]** Es ist in diesem Fall anzustreben, dass bei rotierender Freiformfläche die Werkzeuge so angeordnet werden, dass die gesamte Freiformfläche bearbeitet wird, was in dem Beispiel aus Fig. 14 der Fall ist.

**[0028]** Nur durch die Anordnung mehrerer Werkzeuge ist es möglich, Freiformflächen, die weder sphärisch noch plan sind, mit mehr als 5 Prozent gleichzeitig bearbeiteter Fläche der gesamten Freiformfläche so zu bearbeiten, dass der Prozess beherrschbar bleibt und seinen korrigierenden Charakter behält.

**[0029]** Der Einsatz mehrerer Werkzeuge wird damit verbessert, dass jedes der einzelnen Werkzeuge separat gesteuert wird.

**[0030]** Beim Einsatz vieler Werkzeuge ist es, insbesondere wenn das Handlingsystem der Werkzeuge für mehrere Linsen universell sein soll, einfacher, wenn jedes der Werkzeuge einen beweglichen Fuß aufweist, der die Bedingung, dass das Werkzeug tangential auf der Freiformfläche aufliegt auch bei nicht ganz korrekter Zustellung gewährleistet.

**[0031]** Die Steuerung mehrerer Werkzeuge auf einer Freiformfläche (1 oder 4) ist insbesondere auf kleinen Flächen technologisch sehr anspruchsvoll. Werden jeweils mehrere Werkzeuge (2) in mechanischen Verbun-

den zusammengefasst, ist bei verringerter feinmechanischer Komplexität eine Steuerung des Abtrages immer noch in ausreichendem Maße möglich. (Fig. 17 und 18)

**[0032]** Die einzelnen Werkzeuge können, wie in Fig. 18 zu sehen, in einem stabförmigen Verbund (18) mechanisch gebündelt werden.

**[0033]** Ebenfalls sind runde Verbunde (17) eine Möglichkeit Einzelwerkzeuge (2) zu kombinieren. Sie sind im Sinne der tangentialen Auflage des Werkzeuges speziell auf einer runden rotationssymmetrischen Freiformfläche (1) von Vorteil.

**[0034]** Selbige Verbunde werden unter Berücksichtigung des veränderten Abtrages, wie Einzelwerkzeuge mit dem Verfahren nach Anspruch 1 ff gesteuert. Der virtuelle Abtrag muss entsprechend angepasst werden.

#### Ausführungsbeispiel:

**[0035]** Das Ausführungsbeispiel betrifft eine asphärische optische Linse, die korrekturpoliert werden soll. Zu diesem Zweck wird die Linse interferometrisch vermessen. Die vor der Bearbeitung gemessene Fehlerverteilung zeigt Fig. 3. Da das vorangegangene Auspolieren der Linse, wie in Fig. 3 sehr gut zu sehen ist, bereits auf rotationssymmetrische Weise stattfand, sind die auf der Oberfläche vorhandenen Fehler rotationssymmetrisch verteilt. Währenddessen sowohl die Linse als auch das Werkzeug rotieren, fährt das Werkzeug vom Rand der Linse auf radialem Weg mit senkrechter Ausrichtung zu deren Oberfläche zur Linsenmitte (Fig. 4). Die Korrektur der Fehler soll entlang dieses Weges durch die Verweilzeit gesteuert werden.

**[0036]** Die gesamte Fehlerbetrachtung zur Korrektur dieser Linse wird im Gegensatz zu allgemeinen Freiformflächen auf die radiale Strecke begrenzt. Zur vereinfachten Darstellung wird hier ein etwas anschauliches Beispiel gewählt. Die Anwendung des Verfahrens bei allgemeinen Freiformflächen bedeutet lediglich eine Transformation in zwei Dimensionen, also die Verwendung einer Fläche anstatt nur einer (radialen) Strecke.

**[0037]** Der Fehler der gesamten, vermessenen Fläche wird zunächst auf den radialen Durchschnitt gemittelt. Das Ergebnis zeigt Fig. 5 in Kurve 7. Die innen liegende 0, der Anfang der Abszissenachse, bezeichnet den Linsenmittelpunkt, das rechts liegende Ende den Linsenrand. Dargestellt ist nur der Fehler der Oberfläche mit einem peak to valley (pv) von ca. 1700 nm. Das gesamte Verfahren arbeitet in diesem Beispiel auf 130 Stützstellen, auf denen gerechnet wird. Für jede Stelle ist der virtuelle Abtrag bekannt. Darauf aufbauend wird jeweils eine Verweilzeit erzeugt und zur Steuerung des Abtrages während der Bearbeitung genutzt. Jede dieser Stützstellen wurde mit Meßwerten der Fig. 3 erzeugt. Diese 130 Stützstellen entsprechen bei diesem Beispiel einer Strecke von 20 mm.

Der virtuelle Abtrag des Werkzeuges wird auf Basis eines Footprints für die gesamte Oberfläche berechnet.

Nun wird die radiale Arbeitsstrecke von 20 mm in Berei-

che eingeteilt (Fig. 5). Das Werkzeug hat eine Breite von 33 Punkten, etwa 5 mm. Die Bereiche sollen die Breite des Werkzeuges haben. Damit ergeben sich 4 Bereiche B1, B2, B3 und B4. Für jeden dieser Bereiche wird jetzt ein Gleichungssystem aufgestellt und gelöst, welches den Fehler der Oberfläche in diesem Bereich gemindert um die mittels der Nullten Näherung abgeschätzte Beeinflussung der angrenzenden Bereiche (für B1: B2 / für B2: B1, B3 / für B3: B2, B4 / und für B4: B3) und den virtuellen Abtrag an jeder der zu dem Bereich gehörenden 33 Stellen enthält.

**[0038]** Als Ergebnis entstehen die in Fig. 8 dargestellten Verweilzeiten 11. Die aus den vier einzelnen Gleichungssystemen stammenden Verweilzeiten an den jeweils 33 Stellen wurden hier wieder zusammengefügt. Diese Verweilzeiten bedingen den prognostizierten Abtrag, der sich aus der Summe der Kurven 8 und 9 aus Fig. 7 zusammensetzt. Die resultierende, prognostizierte Fehlerverteilung der Oberfläche zeigt Kurve 10.

**[0039]** Die Bearbeitung der Oberfläche mit dieser Verweilzeitsteuerung benötigte 5,48 min. Die radial gemittelte Verteilung der Oberfläche nach der Korrektur zeigt Fig. 9 in Kurve 12. Zwischen den Stützstellen 0 und 70 wurde eine Genauigkeit von besser 150 nm erreicht. Von der Stelle 70 bis zum Rand der Linse konnte noch eine pv-Genauigkeit von pv 400 nm erreicht werden. Damit entspricht die prognostizierte Fehlerverteilung bis auf kleine Abweichungen im Betrag der tatsächlich nach der Bearbeitung entstandenen Fehlerverteilung.

**[0040]** Das Beispiel zeigt, dass das Verfahren in der Lage ist, bei Verwendung von großen Werkzeugen schwierige Oberflächenfehler in extrem kurzer Zeit zu korrigieren. Wesentlichen Anteil an der Verkürzung der Fertigungszeit hat neben dem großen Werkzeug (Durchmesser Verhältnis Werkzeug: Werkstück / 1 : 8) die Fähigkeit des Verfahrens genau so viel abzutragen, dass nur der tatsächlich vorhandene Fehler abgetragen wird. Mit den bisher verwendeten Verfahren wurde meist sehr viel mehr Abtrag realisiert, so dass die Bearbeitung sehr viel mehr Zeit in Anspruch nahm. Fig. 6 zeigt eine Kurve 13, die veranschaulicht, wie viel Abtrag in solchen Fällen zu viel abgetragen wird. Die Bearbeitungszeit würde in dem Fall auf 20 min steigen. Entscheidend ist auch, dass dieses Ergebnis in nur einem Bearbeitungsdurchgang ohne wiederholtes Nachmessen und Nachbearbeiten erreicht wurde.

**[0041]** Es ist auch möglich, Werkzeuge mit einer Polier- oder Schleifolie aus insbesondere Polyurethan, zu verwenden, ohne Bläschen und ohne Einkerbungen oder sonstige Inhomogenitäten, wobei Polier- oder Schleifolienmaterial verwendet wird.

Dieses Werkzeug kann mit absichtlich eingearbeiteten Ritzen mit steilen bis senkrechten Kanten zur besseren Polier- und Kühlmittelzufuhr versehen sein, wobei die Ritzen groß genug sind, dass sie nicht mit Polier- oder Kühlmittel verstopft werden.

**[0042]** Eine Werkzeuganordnung, welche mehrere die Freiformfläche, ausgenommen eine Planfläche, gleich-

zeitig bearbeitende Werkzeuge aufweist, kann derart eingesetzt werden, dass die gleichzeitig bearbeitete Fläche mehr als fünf Prozent der Freiformfläche mit Ausnahme der Planfläche und der sphärischen Fläche beträgt.

**[0043]** Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren können beim Vor- bzw. Auspolieren der Freiformfläche nach dem Schleifen die vorhandene Genauigkeit erhalten bleiben oder verbessert werden.

#### Beschreibung der Bilder:

#### [0044]

Fig. 1: Einteilung einer runden Freiformfläche (1) in Bereiche (3) bei Anwendung des Werkzeuges (2) mit Durchmesser 16 mm (Draufsicht auf die Freiformfläche)

Fig. 2: Einteilung einer rechteckigen Freiformfläche (4) in durch die Bereichsgrenzen (5) voneinander abgegrenzte Bereiche (3), die der Größe des Werkzeuges (2) entsprechen (Draufsicht auf die Freiformfläche)

Fig. 3: Zweidimensionale Fehlerverteilung (6) einer rotationssymmetrischen optischen Linse (Asphäre)

Fig. 4: Bewegungsabläufe bei der Bearbeitung einer rotationssymmetrischen optischen Linse (1) mit einem (Polier-) Werkzeug (2) (Seitenansicht / Schnittdarstellung)

Fig. 5: Radialer Durchschnitt der Fehlerverteilung (7) auf der rotationssymmetrisch optischen Linse aus Fig. 4; dies entspricht dem minimal notwendigen Abtrag

Fig. 6: Vershobener radialer Durchschnitt der Fehlerverteilung (13) auf der rotationssymmetrischen optischen Linse aus Fig. 4; dies entspricht dem bisher oft realisierten Abtrag

Fig. 7: Veranschaulichung des Verfahrens mit Ist-Zustand des Oberflächenfehlers (7), dem prognostizierten Abtrag (Summe aus 8 und 9) und dem prognostizierten verbleibendem Fehler nach der Bearbeitung (10)

Fig. 8: Die durch das Verfahren bestimmten Verweilzeiten (11)

Fig. 9: Der auf der mit diesen Verweilzeiten (11) bearbeiteten Oberfläche verbleibende Oberflächenfehler (12)

Fig. 10: beispielhafte Verteilung von zu 50 % überlappenden Bereichen (B1, ..., B9) innerhalb eines ra-

dialen Durchschnitts einer rotationssymmetrischen Fläche

Fig. 11 : Größenverhältnisse zwischen Werkzeug und Werkstück 1 : 8 und 1 : 4

Fig. 12: Größenvergleich zwischen dem schmalsten Fehler der Fehlerverteilung 0 und dem Werkzeug (2)

Fig. 13: Werkzeug mit adaptierter polier- oder Schleifolie (14) mit senkrechten Kanten (15)

Fig. 14: Anordnung von mehreren Werkzeugen (2) auf der runden Freiformfläche (1)

Fig. 15: Anordnung von mehreren Werkzeugen (2) auf der rechteckigen Freiformfläche (4)

Fig.16: Anordnung mehrerer Werkzeuge (2), die tangential d.h. mit senkrechter Orientierung auf der Freiformfläche (1) aufliegen.

Fig. 17: Anordnung von runden mechanischen Verbunden (17) von Werkzeugen (2) auf einer runden Freiformfläche (1)

Fig. 18: Anordnung von stabförmigen mechanischen Verbunden (18) von Werkzeugen (2) auf einer rechteckigen Freiformfläche (4)

#### Zahlen an den Bildern:

#### [0045]

- 1 = runde Freiformfläche
- 2 = Werkzeug
- 3 = durchnummerierten Bereiche (B1,B2, ...)
- 4 = rechteckige Freiformfläche
- 5 = Bereichsgrenzen
- 6 = zweidimensionale rotationssymmetrische Fehlerverteilung
- 7 = radialer Durchschnitt der zweidimensionalen rotationssymmetrischen Fehlerverteilung
- 8/9 = prognostizierter Abtrag
- 10 = prognostizierter verbleibender Fehler
- 11 = bestimmte Verweilzeiten
- 12 = nach der Bearbeitung auf der Oberfläche tatsächlich verbleibender Restfehler
- 13 = zu großer, bisher oft abgetragene Fehler
- 14 = Polier- oder Schleifolie aus homogenem Material
- 15 = senkrechte Kanten für Polier- oder Kühlmittelzufuhr
- 16 = Polier- oder Kühlmittel
- 17 = mechanische Verbunde von Werkzeugen in runder Ausführung
- 18 = mechanische Verbunde von Werkzeugen in stabförmiger Ausführung

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Schleifen und Polieren von Freiformflächen (1, 4), insbesondere von rotationssymmetrischen asphärischen, optischen Flächen wie Linsen oder Spiegel, durch ein Werkzeug (2) oder mehrere Werkzeuge (2), wobei ein virtueller Abtrag von einer vorbearbeiteten, vorzugsweise vorgeschliffenen optischen Fläche durch vorzugsweise interferometrische Vermessung und Vergleich von festgestellter Ist- mit der Sollform berechnet wird, Andruck, Rotationsgeschwindigkeiten und Verweildauer bzw. Fortbewegung des Werkzeugs (2) oder der Werkzeuge (2) aufgrund des virtuellen Abtrags gesteuert werden und dazu die Oberfläche der optischen Fläche in Teilbereiche unterteilt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine nullte Näherung für die Steuerung des Werkzeugs (2) oder der Werkzeuge (2) errechnet wird, anhand der nullten Näherung virtuell die Wechselwirkung der Teilbereiche untereinander abgeschätzt wird und unter Berücksichtigung der abgeschätzten Wechselwirkung ein Verweilzeitverlauf des Werkzeugs (2) oder für jedes Werkzeug (2) für jeden Teilbereich unter Berücksichtigung von Andruck, Rotationsgeschwindigkeit und Poliermittelverhalten des Werkzeugs (2) bzw. der Werkzeuge (2) für jeden Teilbereich durch ein lineares Gleichungssystem errechnet wird und das Werkzeug (2) oder die Werkzeuge (2) entsprechend gesteuert werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Teilbereiche der Größe des Werkzeugs (2) oder eines der Werkzeuge (2) entsprechen.
3. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Teilbereiche der doppelten Größe des Werkzeugs (2) oder eines der Werkzeuge (2) entsprechen.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Verweildauer des Werkzeugs (2) oder eines der Werkzeuge (2) zur Steuerung des Abtrags variiert wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Rotationsgeschwindigkeit des oder eines Werkzeugs (2) zur Steuerung des Abtrags variiert wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Rotationsgeschwindigkeit des Werkstücks zur Steuerung des Abtrags variiert wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Anpressdruck

des Werkzeugs (2) oder eines der Werkzeuge (2) zur Steuerung des Abtrags variiert wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche, 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** zu einer Korrektur der Oberfläche nur der minimal notwendige Abtrag abgetragen wird. 5
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8 für rotationssymmetrische Freiformflächen (1), insbesondere asphärische Linsen oder Spiegel, **dadurch gekennzeichnet, dass** der virtuelle Abtrag in eine eindimensionale Form überführt wird, und die grob vorgeschliffene z. B. Linse, beim Schleifen und Polieren rotiert. 10
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** zu einem Erreichen einer gewünschten Oberflächenform-Genauigkeit nur einmal geschliffen oder poliert wird, was nur eine kurze Bearbeitungszeit von ca. zehn oder weniger Minuten bedingt. 20
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit oder ohne bevorzugt interferometrischen Nachmessung oder eine andere Nachmessung eine geringe Anzahl von Malen des Schleifens oder Polierens mit jedem Mal verkleinerten Werkzeugen (2) erfolgt, was höchste Genauigkeit mit sich führt und eine Zeitersparnis gegenüber einmaligem Schleifen oder Polieren mit den kleinsten Werkzeugen (2) gewährleistet. 25
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Teilbereiche nicht überlappen oder zumindest teilweise überlappen. 30

## Claims

1. Method for grinding and polishing of free-form surfaces (1, 4), in particular of rotationally symmetric aspherical optical surface areas such as lenses or mirrors, by a tool (2) or several tools (2), wherein a virtual removal of a preprocessed, preferably pre-grounded optical surface is calculated by a preferably interferometrical measurement and comparison of an observed actual shape with a specified shape, contact pressure, speeds of rotation and, respectively, dwell times or movement of the tool (2) or of the tools (2) are controlled due to the virtual removal and additionally the surface of the optical surface area is divided into subareas, **characterized in that** a zeroth order approximation is calculated for the control of the tool (2) or of the tools (2), a mutual interaction of the subareas is estimated by means of the zeroth order approximation and a dwell time course for the tool (2) or for each tool (2) for each subarea is calculated by a linear system of equations by taking into account the estimated interaction, contact pressure, speed of rotation and behavior of the polishing agent of, respectively, the tool (2) or the tools (2) for each subarea and the tool (2) or the tools (2) are controlled accordingly. 5
2. Method according to claim 1, **characterized in that** the subareas correspond to the size of the tool (2) or of one of the tools (2). 10
3. Method according to claim 1, **characterized in that** the subareas correspond to the double size of the tool (2) or of one of the tools (2). 15
4. Method according to one of the claims 1 to 3, **characterized in that** the dwell time of the tool (2) or of one of the tools (2) is varied for controlling the removal. 20
5. Method according to one of the claims 1 to 3, **characterized in that** the speed of rotation of the tool (2) or of one tool (2) is varied for controlling the removal. 25
6. Method according to one of the claims 1 to 3, **characterized in that** the speed of rotation of the workpiece is varied for controlling the removal. 30
7. Method according to one of the claims 1 to 3, **characterized in that** the contact pressure of the tool (2) or of one of the tools (2) is varied for controlling the removal. 35
8. Method according to one of the claims 1 to 7, **characterized in that** for a correction of the surface only the minimally necessary removal is removed. 40
9. Method according to one of the claims 1 to 8 for rotationally symmetric free-form surfaces (1), in particular aspherical lenses or mirrors, **characterized in that** the virtual removal is transferred to a one-dimensional form, and the coarsely pre-grounded for example lens is rotating during the grinding and polishing. 45
10. Method according to one of the claims 1 to 9, **characterized in that** for achieving a desired accuracy of the surface's shape only one grinding or polishing is carried out, which causes only a short processing time of about ten or less minutes. 50
11. Method according to one of the claims 1 to 9, **characterized in that** with or without a preferably interferometrical remeasurement or a different remeasurement a small number of times of grinding or polishing are carried out with tools (2) downsized each time, which brings highest accuracy along and ensures a saving of time compared to one-time grinding 55

culated by a linear system of equations by taking into account the estimated interaction, contact pressure, speed of rotation and behavior of the polishing agent of, respectively, the tool (2) or the tools (2) for each subarea and the tool (2) or the tools (2) are controlled accordingly.

2. Method according to claim 1, **characterized in that** the subareas correspond to the size of the tool (2) or of one of the tools (2). 10
3. Method according to claim 1, **characterized in that** the subareas correspond to the double size of the tool (2) or of one of the tools (2). 15
4. Method according to one of the claims 1 to 3, **characterized in that** the dwell time of the tool (2) or of one of the tools (2) is varied for controlling the removal. 20
5. Method according to one of the claims 1 to 3, **characterized in that** the speed of rotation of the tool (2) or of one tool (2) is varied for controlling the removal. 25
6. Method according to one of the claims 1 to 3, **characterized in that** the speed of rotation of the workpiece is varied for controlling the removal. 30
7. Method according to one of the claims 1 to 3, **characterized in that** the contact pressure of the tool (2) or of one of the tools (2) is varied for controlling the removal. 35
8. Method according to one of the claims 1 to 7, **characterized in that** for a correction of the surface only the minimally necessary removal is removed. 40
9. Method according to one of the claims 1 to 8 for rotationally symmetric free-form surfaces (1), in particular aspherical lenses or mirrors, **characterized in that** the virtual removal is transferred to a one-dimensional form, and the coarsely pre-grounded for example lens is rotating during the grinding and polishing. 45
10. Method according to one of the claims 1 to 9, **characterized in that** for achieving a desired accuracy of the surface's shape only one grinding or polishing is carried out, which causes only a short processing time of about ten or less minutes. 50
11. Method according to one of the claims 1 to 9, **characterized in that** with or without a preferably interferometrical remeasurement or a different remeasurement a small number of times of grinding or polishing are carried out with tools (2) downsized each time, which brings highest accuracy along and ensures a saving of time compared to one-time grinding 55

or polishing with the smallest tools (2).

12. Method according to one of the claims 1 to 11, **characterized in that** the subareas do not overlap or overlap at least partially.

### Revendications

1. Procédé pour la rectification et le polissage de surfaces à forme libre (1, 4), notamment de surfaces optiques asphériques à symétrie de rotation telles que lentilles ou miroirs, au moyen d'un outil (2) ou de plusieurs outils (2), un enlèvement virtuel de matière d'une surface optique préalablement travaillée, de préférence dégrossie à la meule, étant préférentiellement calculé par mesure interférométrique et comparaison de la forme effective constatée avec la forme de consigne, la pression, les vitesses de rotation et la durée d'application ou la poursuite du mouvement de l'outil (2) ou des outils (2) étant commandées sur la base de l'enlèvement virtuel de matière et la superficie de la surface optique étant subdivisée en zones partielles à cet effet, **caractérisé en ce qu'**une approximation à l'ordre zéro est calculée pour la commande de l'outil (2) ou des outils (2), **en ce que** l'interaction des zones partielles entre elles est estimée à partir de l'approximation à l'ordre zéro, **en ce qu'**une courbe de temps d'application de l'outil (2) ou des outils (2) est calculée en tenant compte de l'interaction estimée pour chaque zone partielle, prenant en considération la pression, la vitesse de rotation et le comportement de polissage de l'outil (2) ou des outils (2) pour chaque zone partielle par système d'équations linéaires, et **en ce que** l'outil (2) ou les outils (2) sont commandés en conséquence.
2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les zones partielles correspondent à la grandeur de l'outil (2) ou de l'un des outils (2).
3. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les zones partielles correspondent à deux fois la grandeur de l'outil (2) ou de l'un des outils (2).
4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** la durée d'application de l'outil (2) ou de l'un des outils (2) est variable pour la commande d'enlèvement de matière.
5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** la vitesse de rotation de l'outil ou d'un outil (2) est variable pour la commande d'enlèvement de matière.
6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** la vitesse de rotation la pièce

est variable pour la commande d'enlèvement de matière.

7. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** la pression de serrage de l'outil (2) ou de l'un des outils (2) est variable pour la commande d'enlèvement de matière.
8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce que** seul l'enlèvement minimal de matière est déduit pour une correction de la surface.
9. Procédé selon l'une des revendications 1 à 8 pour des surfaces à forme libre (1) à symétrie de rotation, en particulier lentilles ou miroirs asphériques, **caractérisé en ce que** l'enlèvement virtuel de matière est réduit à une forme unidimensionnelle, et ce que la lentille dégrossie à la meule, p. ex., est soumise à une rotation lors de la rectification et du polissage.
10. Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, **caractérisé en ce que** pour obtenir une précision souhaitée de forme de surface, il n'est procédé qu'une seule fois à la rectification et au polissage, ce qui ne nécessite qu'un temps d'usinage court, de quelque 10 minutes ou moins.
11. Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, **caractérisé en ce qu'**avec ou sans mesure postérieure préférentiellement interférométrique ou toute autre mesure postérieure, un nombre réduit de passes de rectification ou de polissage sont exécutées par des outils (2) à chaque fois plus petits, ce qui se traduit par une précision maximale et une économie de temps par rapport à une seule passe de rectification ou de polissage avec les outils (2) les plus petits.
12. Procédé selon l'une des revendications 1 à 11, **caractérisé en ce que** les zones partielles ne se chevauchent pas ou se chevauchent au moins partiellement.

Fig.1:

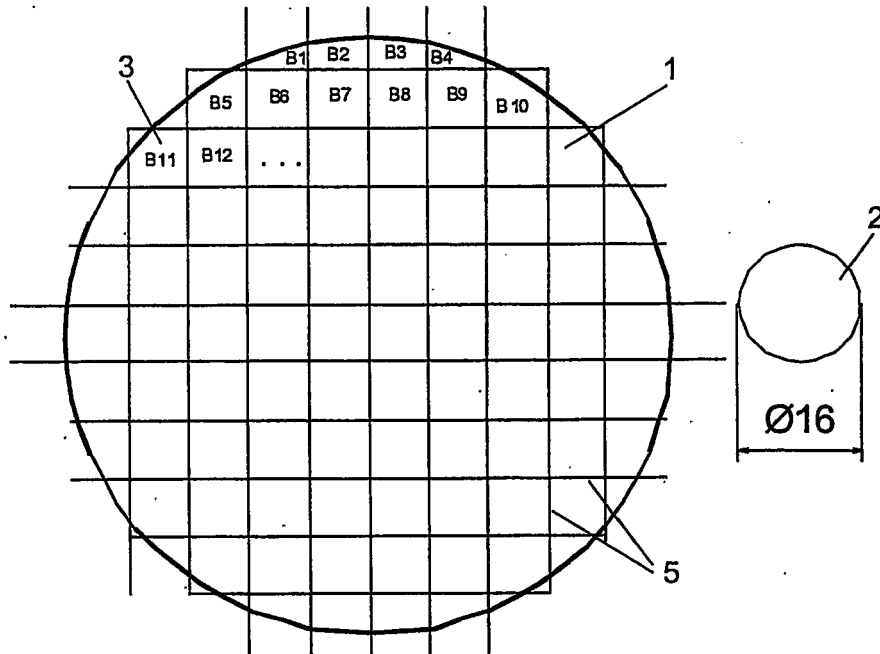


Fig.2:

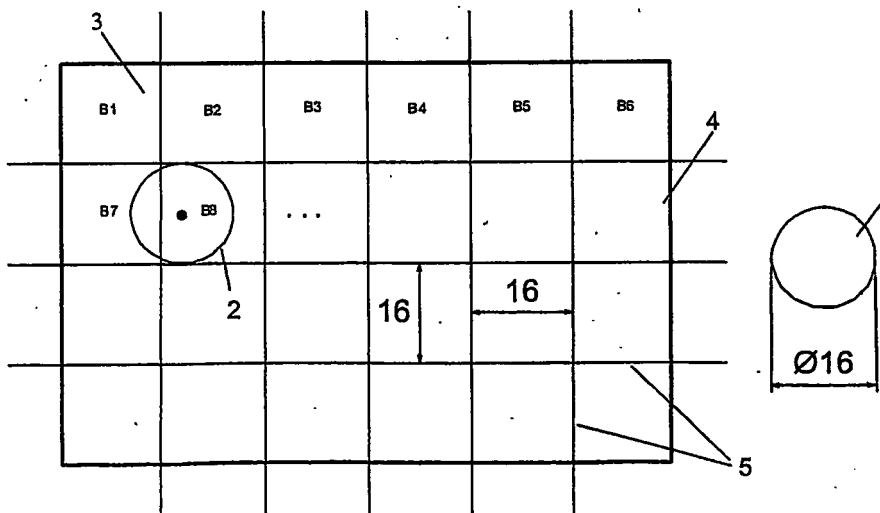


Fig. 3:

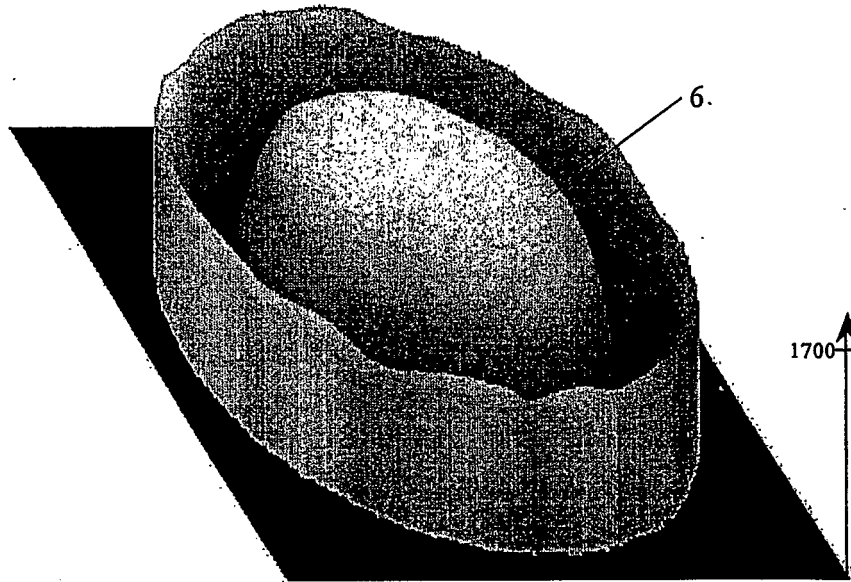


Fig. 4:

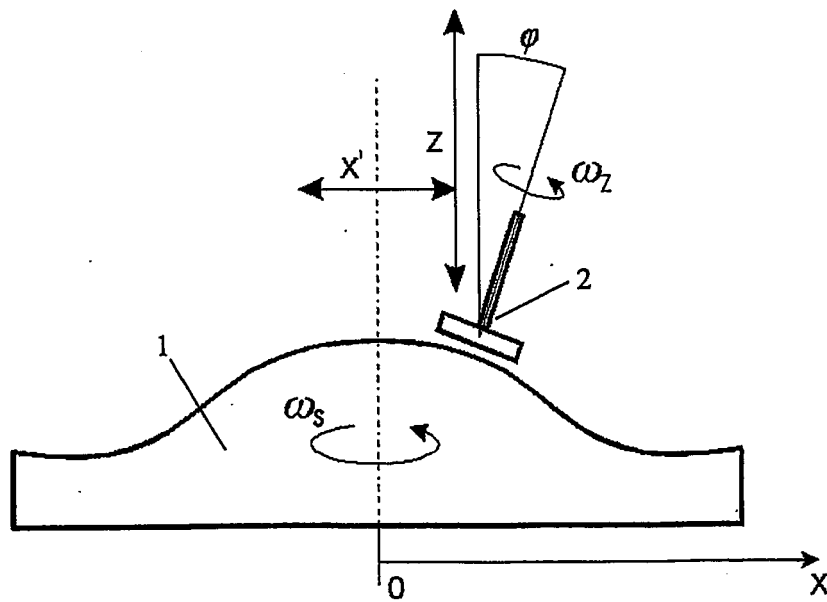


Fig. 5:

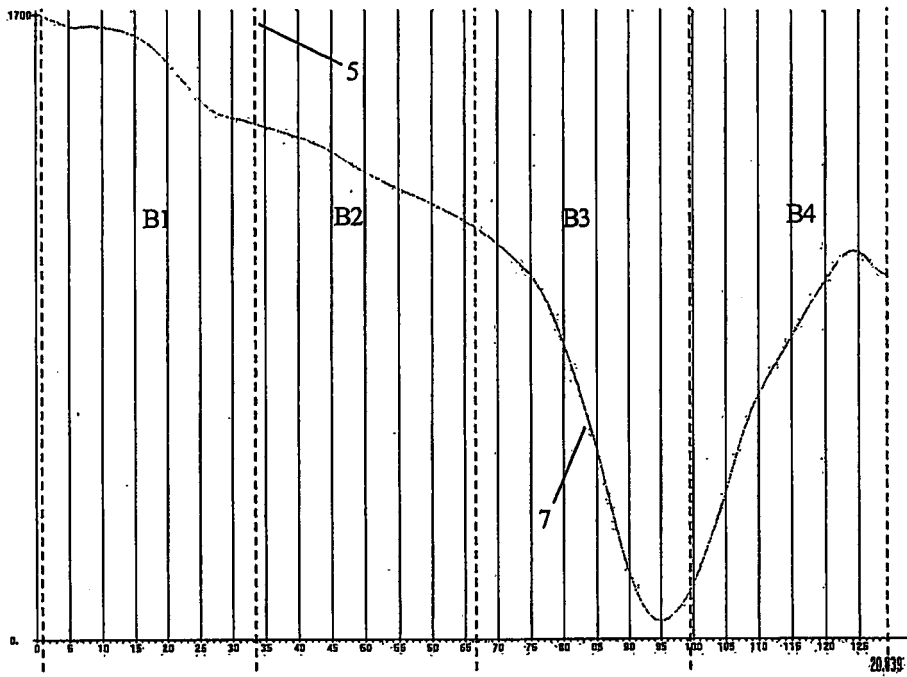


Fig. 6:

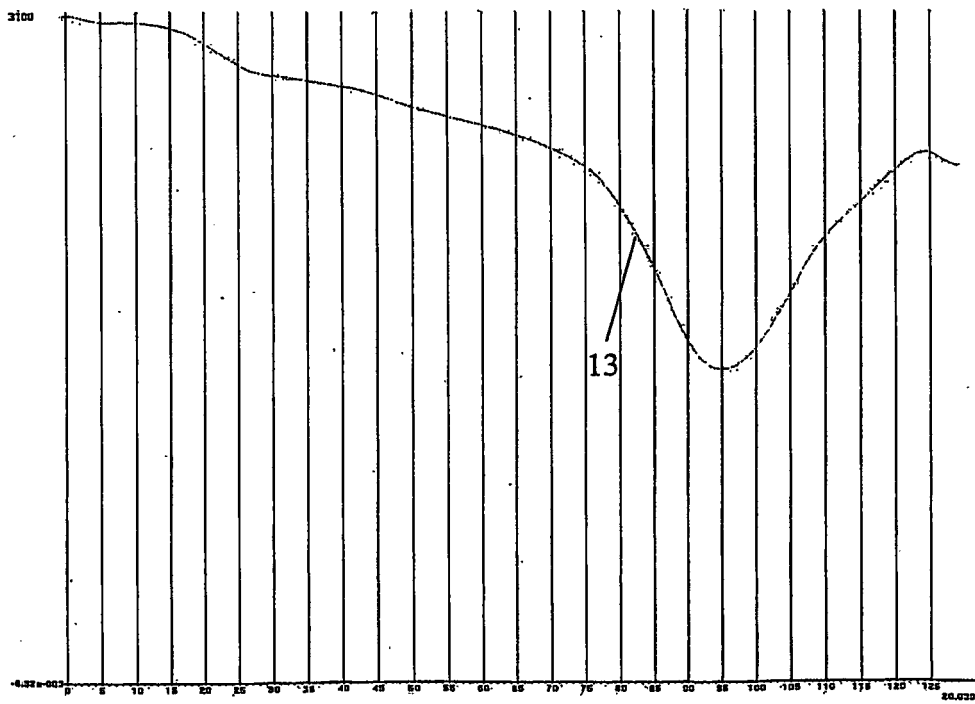


Fig. 7:

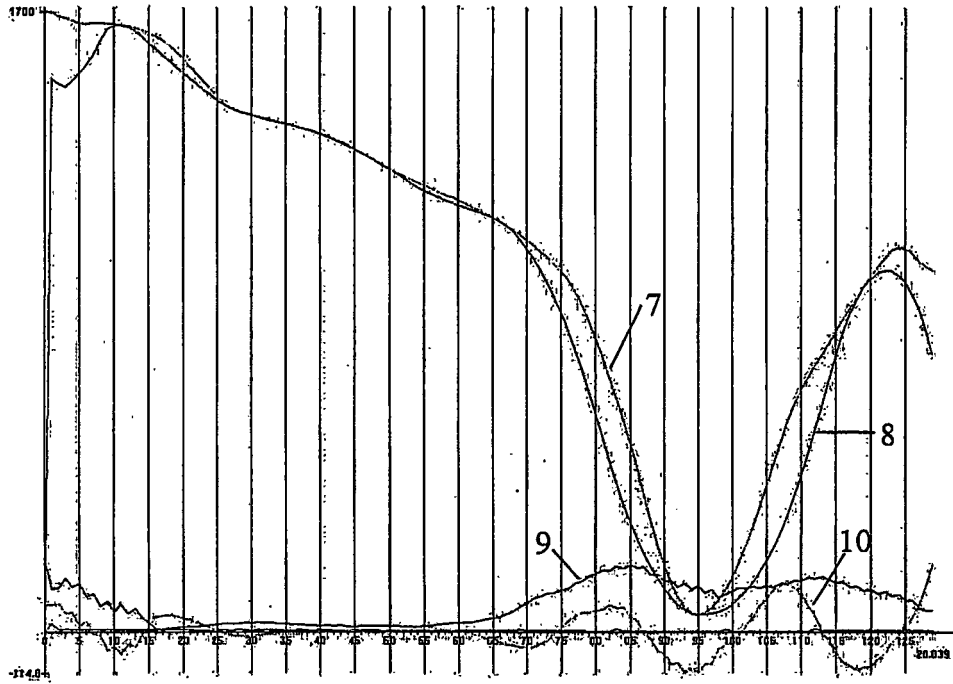


Fig. 8:

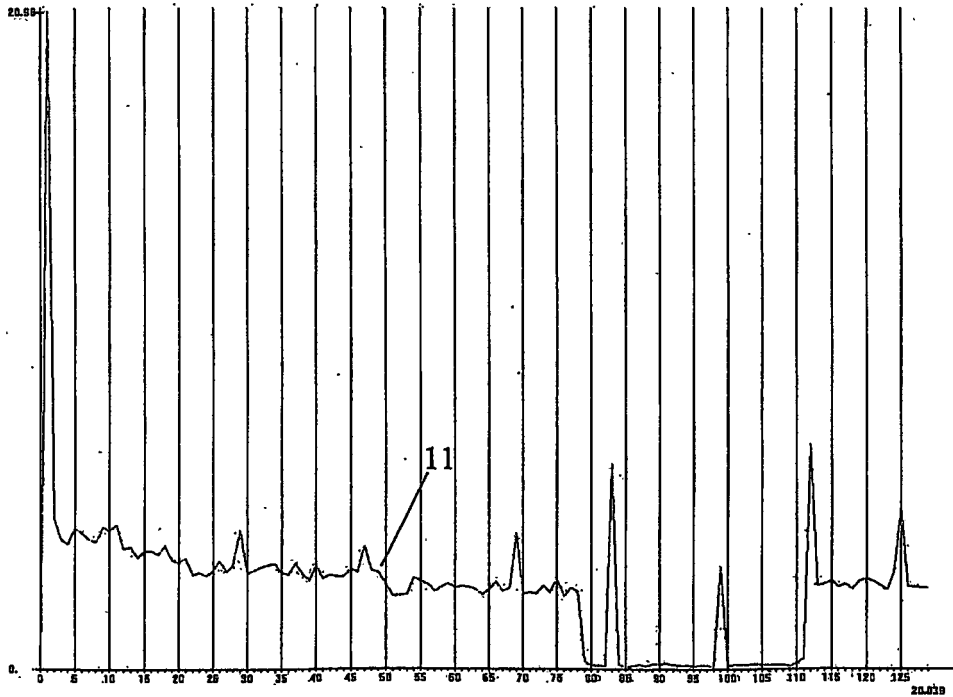


Fig. 9:

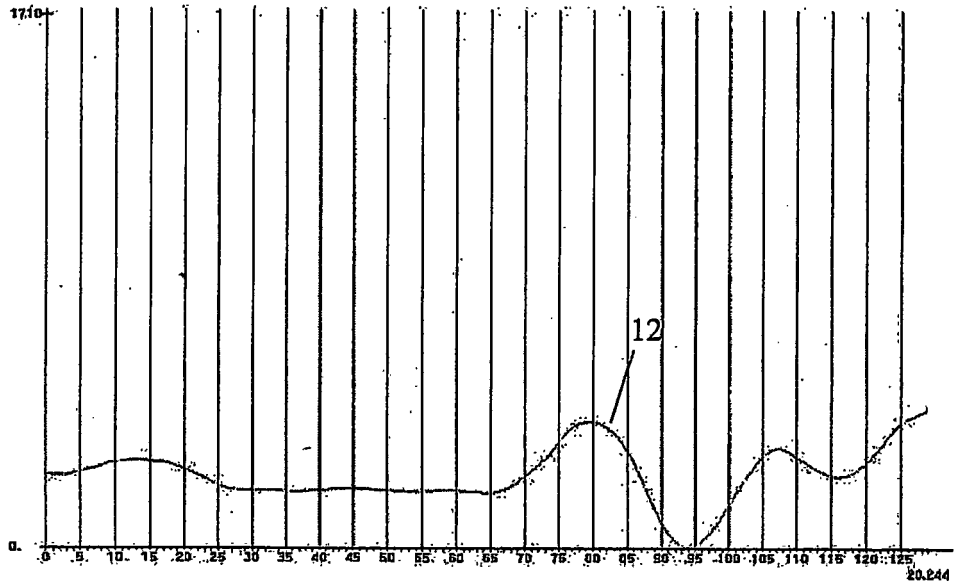


Fig. 10:

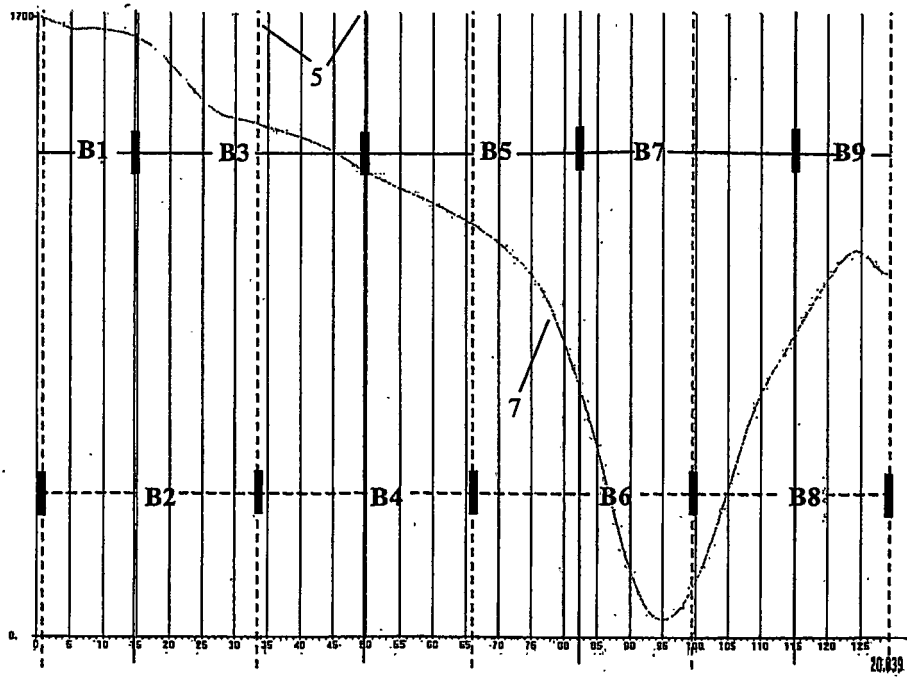


Fig. 11

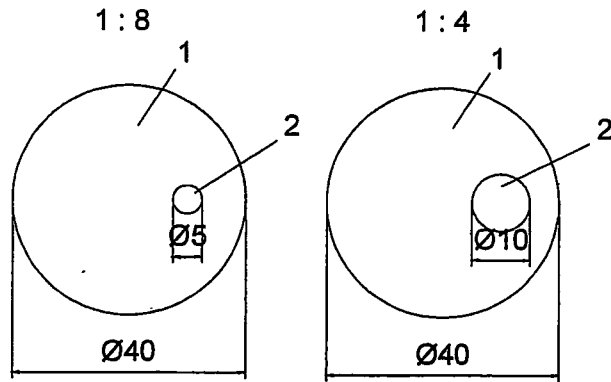


Fig. 12:

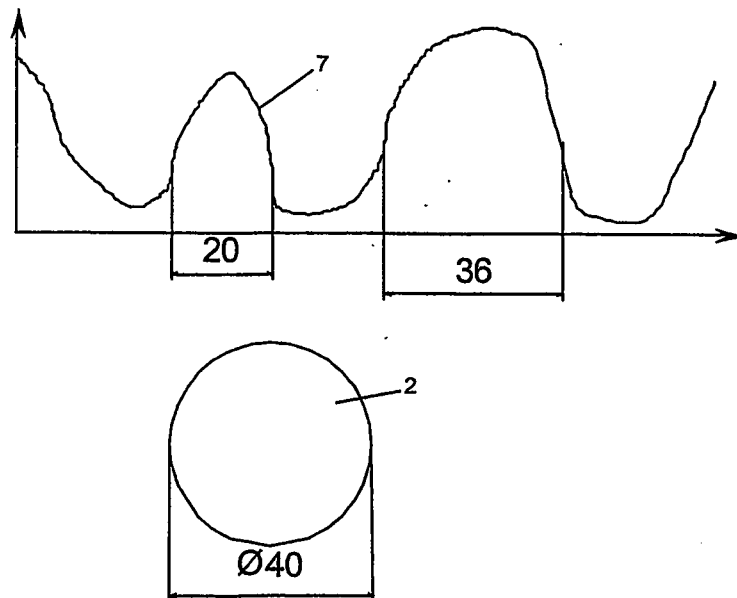


Fig. 13:

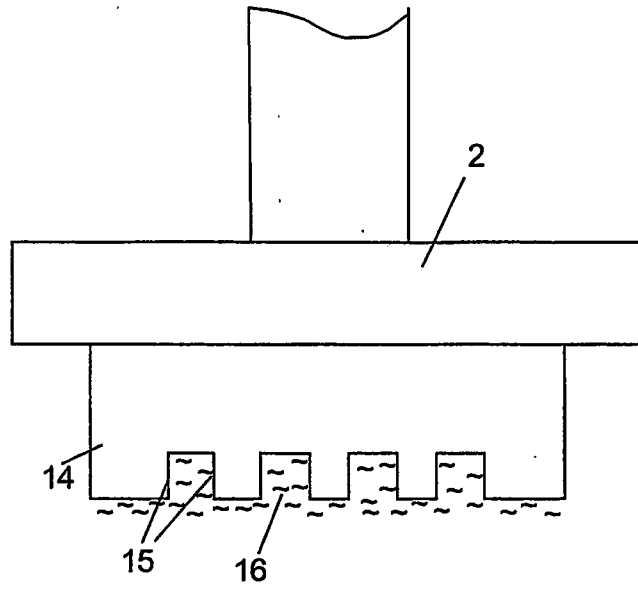


Fig. 14:

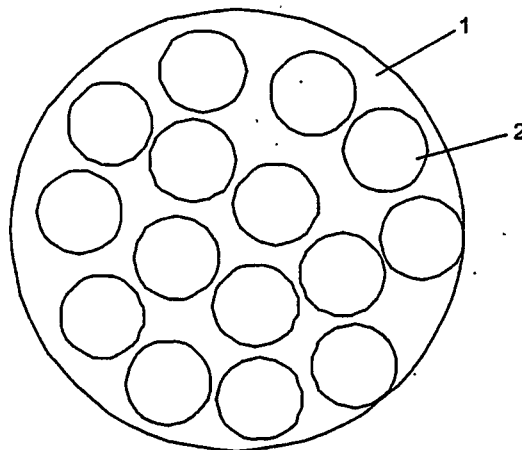


Fig. 15:

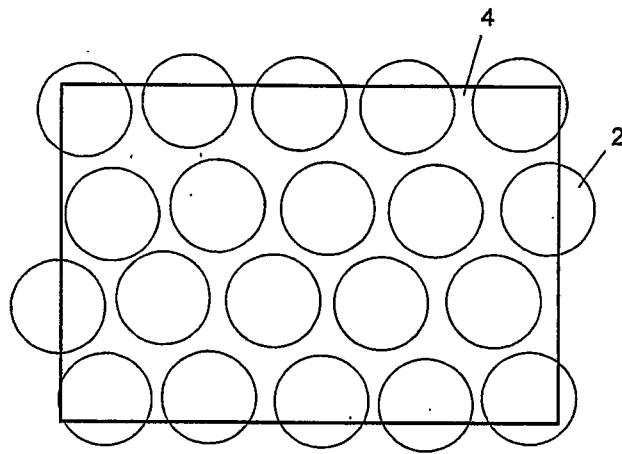


Fig. 16:

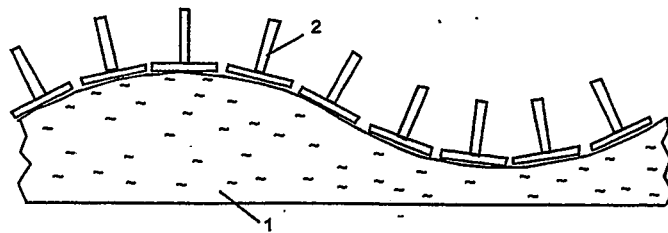


Fig. 17

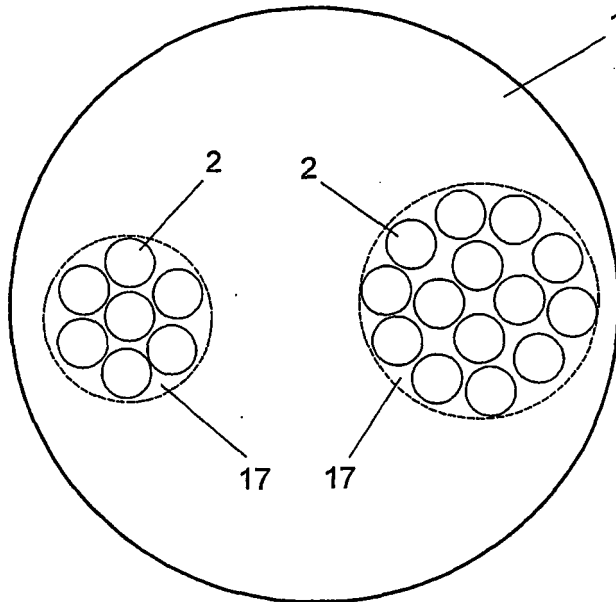


Fig. 18:

