(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) Veröffentlichungsnummer: **0 346 819 A2**

(12) EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer: **89110657.7**

(51) Int. Cl.4: **B24B 13/015**

(22) Anmeldetag: **13.06.89**

(30) Priorität: **14.06.88 DE 3820225**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung: **20.12.89 Patentblatt 89/51**

(84) Benannte Vertragsstaaten: **CH DE FR GB LI**

(71) Anmelder: **HPO HANSEATISCHE PRÄZISIONS- UND ORBITTECHNIK GMBH**
Fahrenheitstrasse 1
D-2800 Bremen 33(DE)

(72) Erfinder: **Netzel, Karl-Hermann, Dipl.-Ing.**
Hollerlander Weg 102
D-2800 Bremen 33(DE)
Erfinder: **Preuss, Werner, Dr.**
Tessiner Strasse 117
D-2800 Bremen 44(DE)
Erfinder: **Fetting, Rudolf, Dipl.-Ing.**
Vor dem Heisterbusch 7
D-2820 Bremen 77(DE)

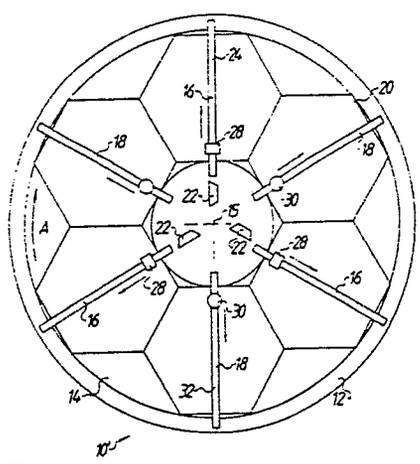
(74) Vertreter: **Eisenführ & Speiser**
Martinistrasse 24
D-2800 Bremen 1(DE)

(54) Verfahren und Vorrichtung zur berührungslosen Vermessung und ggf. abtragenden Bearbeitung von Oberflächen.

(57) Die Erfindung betrifft Verfahren zur berührungslosen Vermessung und ggf. abtragenden Bearbeitung von Oberflächen, insbesondere von großflächigen Spiegeln oder dergleichen, bei dem zur Ermittlung von Konturabweichungen der Oberfläche die Differenz zwischen interferometrisch erfaßten Oberflächenkontur-Istwerten und vorgewählten Oberflächenkontur-Sollwerten bestimmt wird. Erfindungsgemäß wird eine Bezugskontur wenigstens eines Referenzelements, deren Erstreckung einem Vermessungs-und ggf. Bearbeitungsbereich der Oberfläche im wesentlichen entspricht, interferometrisch bezüglich eines Normals vermessen, dessen Geometrie innerhalb der zulässigen Konturtoleranz der Oberfläche bekannt ist. Die zu vermessende Oberfläche wird in eine definierte räumliche Lage bezüglich des Referenzelementes gebracht, die Beabstandung der Bezugskontur vom Vermessungs- bzw. Bearbeitungsbereich der Oberfläche wird inkrementell interferometrisch erfaßt und die jeweilige Differenz zwischen Ist- und Sollwert wird bestimmt. Für die Bearbeitung wird ggf. ein Materialabtrag von der Oberfläche vorgenommen, dessen Ausmaß die zulässige Konturtoleranz nicht übersteigt.

Außerdem betrifft die Erfindung Vorrichtungen zur Durchführung dieser Verfahren.

Fig.7



EP 0 346 819 A2

Verfahren und Vorrichtung zur berührungslosen Vermessung und ggf. abtragenden Bearbeitung von Oberflächen

Die Erfindung betrifft Verfahren zur berührungslosen Vermessung und ggf. abtragenden Bearbeitung von Oberflächen, insbesondere zum Feinstpolieren großflächiger Spiegel oder dergleichen, bei dem die Differenz zwischen interferometrisch erfaßten Oberflächenkontur-Istwerten und vorgewählten Oberflächenkontur-Sollwerten bestimmt und ggt. in Abhängigkeit vom Ergebnis ein oberflächiger Materialabtrag vorgenommen wird.

Außerdem betrifft die Erfindung zur Durchführung dieser Verfahren geeignete Vorrichtungen.

Bekannte Bearbeitungsverfahren dienen zur Erzeugung von Oberflächen mit hochgradiger Formtreue auch bei großen Oberflächen. Anwendung finden diese Verfahren beispielsweise bei der Herstellung von Reflexionsoptiken, insbesondere für die Astronomie; ein Beispiel bilden Teleskopspiegel für den sichtbaren und infraroten Spektralbereich.

Die formtreue Herstellung insbesondere großflächiger Werkstücke bietet besondere Schwierigkeiten. Dies gilt schon dann, wenn die Oberfläche plan, sphärisch oder rotationssymmetrisch asphärisch (beispielsweise parabolförmig) ist. Erst recht gilt dies für nicht-rotationssymmetrische asphärische Oberflächen; für die Erzeugung solcher Oberflächen gab es bislang kein befriedigendes Verfahren.

Dabei werden insbesondere im Bereich der Astronomie solche Werkstücke dringend benötigt. Spezieller betrifft dies das bestehende Bedürfnis, nicht-rotationssymmetrische asphärische Segmentspiegel für Großteleskope mit Öffnungen von mehreren Metern ökonomisch herstellen zu können.

Zur Herstellung solcher Spiegel folgte man bisher dem klassischen, von Herschel, Ritchey, Anderson und anderen entwickelten Verfahren. Dabei wird zunächst mit großflächigen Schleif- und Polierkörpern die best-angenäherte sphärische Form hergestellt; mit kleinen Läpp- und Polierscheiben werden sodann die verbliebenen Abweichungen zur Soll-Form beseitigt. Der Polierprozeß muß mehrfach durch Inspektionen der erreichten Ist-Form unterbrochen werden, wofür bis heute der Foucault-Test die zuverlässigste Prüfmethode darstellt.

Aus der DE-PS 34 30 499 sind bereits ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Erzeugung asphärischer Oberflächen bekannt. Dabei soll ein flexibles Läpp- oder Polierwerkzeug verwendet werden, welches im wesentlichen die gesamte zu bearbeitende Werkstückoberfläche gleichzeitig bedeckt und am Werkstück mit örtlich unterschiedlichen Drücken anliegt; die örtlichen Druckunterschiede sollen den Abweichungen der Werkstückoberfläche von der Soll-Form entsprechend gewählt werden. Realisiert wird dies durch eine Membran, die die gesamte Werkstückoberfläche bedeckt und werkstückseitig eine Vielzahl einzelner Bearbeitungskörper trägt. Von der anderen Seite her wird die Membran mitsamt den Bearbeitungskörpern durch einzeln steuerbare Druckschuhe gegen die Oberfläche gedrückt. Die Formtreue soll durch die Steuerung der einzelnen Druckschuhe hinsichtlich des Bearbeitungsdruckes sowie durch gelegentliche Vermessung des Werkstückes sichergestellt werden, wobei die Membran zwischen jedem Bearbeitungsvorgang etwa in Soll-Form der zu bearbeitenden Fläche gebracht wird. Dazu kann sie beispielsweise auf einem separaten Werkzeug abgedrückt werden, das etwa die Soll-Form der zu bearbeitenden Fläche besitzt.

Dieses Verfahren ist für die Herstellung größerer asphärischer Oberflächen (etwa ab 1m) wegen der dann über das erlaubte Toleranzband anwachsenden Unsicherheit des Meßsystems wenig geeignet.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur berührungslosen Vermessung von Oberflächen, insbesondere von großflächigen Spiegeln o. dgl. zu schaffen, das eine exakte Vermessung beliebig geformter Oberflächen bei geringem Aufwand gestattet.

Aufgabe der Erfindung ist es weiterhin, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur abtragenden Bearbeitung von Oberflächen anzugeben, die es gestatten, auch große Oberflächen bei beliebiger, auch nicht-rotationssymmetrisch asphärischer, Gestalt formtreu herzustellen.

Dabei wird eine Formtreue angestrebt, die bezüglich des Werkstückdurchmessers Abweichungen von mehr als 3×10^{-8}m ausschließt. Das bedeutet, daß bei einem Spiegeldurchmesser von 1m beispielsweise eine Formtreue erreicht wird, die besser als 30 Nanometer ist. Gleichzeitig soll eine Mikrorauhigkeit von weniger als 10 Å rms erreicht werden.

Die Bearbeitung großflächiger Werkstücke soll möglich sein, wobei unter großflächig ein Verhältnis von Durchmesser zu mittlerem Krümmungsradius des Werkstücks verstanden wird, das typischerweise kleiner als 1 zu 10 ist. Dies bedeutet z.B. bei einem Spiegeldurchmesser von 1m einen mittleren Krümmungsradius von mehr als 10m. Die Bearbeitung beliebig geformter Oberflächen soll möglich sein, so daß neben planen, sphärischen, rotationssymmetrisch asphärischen auch nicht-rotationssymmetrisch asphärische Oberflächenformen formtreu ausgebildet werden können. Es soll keine Rol-

le spielen, ob die Oberflächenkrümmung ganzflächig konkav oder konvex oder aber auch zwischen konkav und konvex wechselnd ist, wie z.B. bei Schmidt-Platten.

Die Bearbeitung aller polierbarer Substrate soll möglich sein, also z.B. die Bearbeitung von Glassubstraten, insbesondere Quarzglas; Glaskeramiksubstraten wie beispielsweise Zerodur; Keramiksubstraten und Metallsubstraten.

Zur Lösung dieser Aufgaben dienen die Merkmale der unabhängigen Patentansprüche.

Ein Grundzug der Erfindung liegt in dem Konzept, daß die Ist-Kontur der Werkstückoberfläche in-process gemessen und ggf. das Bearbeitungswerkzeug bis zum Erreichen der gewünschten Soll-Kontur in-process gesteuert werden kann. Die erzielbare Konturtreue ist auch bei sehr großflächigen, nicht-rotationssymmetrischen Asphären besser als 25 Nanometer. Erfindungsgemäß werden an die Genauigkeiten der verfahrens- und vorrichtungsrelevanten Achsen keine hohen Anforderungen gestellt. Es besteht keine Notwendigkeit, das Bearbeitungswerkzeug hinsichtlich Druckkraft, Geschwindigkeit, Ausrichtung oder Zustellung aufwendig zu kontrollieren. Es ist nicht nötig, den Bearbeitungsprozeß zu Inspektionszwecken zu unterbrechen oder dafür gar das Werkstück aus der Bearbeitungsvorrichtung zu entnehmen; vielmehr erfolgt die Qualitätskontrolle während des Bearbeitungsvorganges selbst.

Erfindungsgemäß wird zunächst aus, insbesondere lineraren, Referenzelementen ein Bezugsystem für die Vermessung der Oberflächenkontur aufgebaut. Dieses Be zugsystem kann interferometrisch gegenüber einem Normal eingemessen werden, dessen Geometrie mit der nötigen Genauigkeit bekannt ist. Dieses Bezugsystem ist in den Vorrichtungsaufbau so integriert, daß das anfängliche Einmessen der Referenzelemente mittels derselben Interferometer erfolgen kann, die auch zur Vermessung der Oberfläche dienen. So wird in besonders einfacher Weise eine unmittelbare Anbindung der Meßgeometrie an die Genauigkeit des Geradlinigkeitsnormals erhalten, welches sich auch bei der erforderlichen hohen Genauigkeit (typischerweise kleiner als 10 nm) relativ einfach realisieren läßt, beispielsweise durch eine Quecksilberoberfläche.

Vorzugsweise werden als Interferometer-Meßeinrichtungen scannende Heterodyn-Interferometer verwendet, die mit zwei eng benachbarten Wellenlängen arbeiten. Die Wellenlängenbeziehungen entsprechen einer Schwebung. Solche Heterodyn-Interferometer eignen sich insbesondere deswegen, weil sie gegenüber Oberflächenrauhigkeiten relativ unempfindlich sind.

Die Erfindung ermöglicht es, an die Gradlinigkeit der verfahrens- und vorrichtungsrelevanten Linearachsen in horizontaler wie vertikaler Hinsicht keine besonderen Anforderungen zu stellen. Geradlinigkeiten von 10 Mikrometer reichen völlig aus.

Wenn die Oberfläche nicht nur vermessen, sondern auch abtragend bearbeitet, beispielsweise geschliffen werden soll, muß die Abtragsrate nicht genau bekannt sein, ebensowenig ist eine zeitliche Kontrolle des Andrucks oder eine Normalausrichtung der Bearbeitungswerkzeuge nötig.

Wenn vorzugsweise eine rotatorische Linearachse, um die das Werkstück gegenüber den Meßeinrichtungen und den Bearbeitungseinheiten verdreht, sowie mehrere radial verlaufende Linearachsen verwendet werden, entlang derer die Meß- und Bearbeitungsvorvorgänge ablaufen, kann die Radialabweichung der Rotationsachse in der Größenordnung von 10 Mikrometern liegen.

Die vorzugsweise verwendeten Heterodyn-Interferometer dienen wahlweise zur Messung oder zur Messung des Winkels zwischen Werkstückoberfläche und Referenzelement. Im ersten Fall wird eine Auflösung von 1 nm, im zweiten Fall von 1/20 Bogensekunde erreicht.

Mit besonderem Vorteil werden bei der abtragenden Bearbeitung der Werkstück-Oberfläche mehrere Meßeinrichtungen und Bearbeitungseinheiten radial alternierend über dem rotierenden Werkstück aufgehängt bzw. abgestützt. Beispielsweise können je drei unter 120° zueinander angeordnete Meßeinrichtungen und drei unter 120° zueinander angeordnete Bearbeitungseinheiten verwendet werden, wobei der Winkel zwischen einer Meßeinrichtung und der benachbarten Bearbeitungseinheit 60° beträgt.

Wenn nur gemessen wird, wird eine entsprechende Anordnung von drei unter 120° zueinander angeordneten Meßeinrichtungen eingesetzt; die Bearbeitungseinheiten können dann ganz fehlen oder werden, bei einer Vermessungs- und Bearbeitungsvorrichtung, nicht betätigt.

Der simultane Einsatz mehrerer Meßsysteme erbringt eine Vielfalt von Vorteilen, beispielsweise die Möglichkeit einer wechselseitigen Kontrolle der einzelnen Meßeinrichtungen; die Erkennung von Störungen wie beispielsweise Vibrationen, geometrischen Änderungen der Tragkonstruktion, Luftturbulenzen im Strahlengang, Spindelschlag usw.; die Weiterarbeit auch bei zeitweiligem Ausfall einer Meßeinrichtung und eine insgesamt sehr viel schnellere Vermessung und ggf. Bearbeitung, insbesondere wenn gleichzeitig mehrere Meßsysteme und ggf. Bearbeitungseinrichtungen in Drehrichtung hintereinander eingesetzt werden.

Insgesamt ermöglicht die Erfindung die Vermessung und die Formgebung großflächiger, auch nicht-rotationssymmetrischer Asphären mit einer Konturtreue besser als 25 nm. Die Erfindung ist von schlagender konzeptioneller Einfachheit, da sie

ein Minimum an Achsen benötigt, keine außergewöhnliche Anforderung an die Genauigkeit der Achsen stellt und eine aufwendige Kontrolle der Bearbeitungswerkzeuge hinsichtlich Druckkraft, Geschwindigkeit, Ausrichtung und Zustellung nicht nötig ist. Die Störanfälligkeit ist wegen der hohen Redundanz in den Meßeinrichtungen gering, was zusammen mit der Möglichkeit der Selbstkontrolle und Fehlererkennung eine große Betriebssicherheit gewährleistet. Mehrere Einzelteile, beispielsweise mehrere Spiegelkörper eines Segmentspiegels, können gleichzeitig vermessen und ggf. bearbeitet werden. Der Vermessungs- bzw. Bearbeitungsprozeß muß nicht unterbrochen werden, um die Inspektion und Kontrolle der Oberflächengüte zu ermöglichen; erst recht muß das Werkstück dazu nicht aus der Vorrichtung entnommen werden. Die Erfindung ermöglicht so eine sehr schnelle und sehr ökonomische Vermessung und ggf. Bearbeitung.

Im folgenden werden bevorzugte Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der beigefügten Zeichnung näher erläutert. Darin zeigen

Fig. 1 eine periphere Anordnung von Spiegelsegmenten auf einem Rundtisch einer erfindungsgemäßen Vermessungsvorrichtung;

Fig. 2 eine schematische Aufsicht auf die Vorrichtung gemäß Fig. 1;

Fig. 3 eine seitliche Schnittansicht der Vorrichtung gemäß Fig. 1 und 2;

Fig. 4 eine schematisierte Draufsicht auf einen Teil einer Meßeinrichtung;

Fig. 5 eine schematisierte Seitenansicht entsprechend Fig. 4;

Fig. 6 eine Rückansicht der Meßeinrichtung gemäß Fig. 4 und 5;

Fig. 7 eine schematische Aufsicht auf eine erfindungsgemäße Poliervorrichtung und

Fig. 8 eine seitliche Schnittansicht der Poliervorrichtung gemäß Fig. 7.

Die in Fig. 1 und 2 gezeigte erfindungsgemäße Vorrichtung umfaßt einen großen luftgelagerten Rundtisch, auf dem die zu vermessenden Werkstücke, im Ausführungsbeispiel mehrere Spiegelsegmente 20, zusammen mit ihren Tragelementen peripher aufgebaut werden. Die als Vermessungsmaschine 10 für diese Spiegelsegmente 20 dienende Vorrichtung umfaßt einen Grundrahmen 12, in dem eine Spindel 14 (Fig. 3) gelagert ist, die die Spiegelsegmente trägt. Die Spindel 14 ist gegenüber dem Grundrahmen durch einen Motorantrieb um eine senkrecht zur Zeichnungsebene stehende, zentrale Rotationsachse 15 drehbar; diese Drehung erfolgt relativ langsam, beispielsweise mit einer Umdrehung pro Minute. Außerdem ist mit der Spindel ein (nicht dargestellter) Encoder zur Bestimmung der Winkelstellung der Spindel 14 gegenüber dem Grundrahmen 12 verbunden. Der Encoder kann als Glasmaßstab ausgeführt werden und gestattet eine Genauigkeit der Winkelstellungsbestimmung im Bereich von 10 bis 20 Bogensekunden. Die mittels des Encoders ermittelten Daten zur Stellung der Spindel werden in einen Computer eingegeben.

Die Vermessungsmaschine 10 wird vorzugsweise in einem vibrationsentkoppelten, klimatisierten Reinraum aufgestellt.

Oberhalb der Oberflächen 34 der Spiegelsegmente 20 sind Meßeinrichtungen 16 vorgesehen, die fest mit dem Grundrahmen 12 verbunden sind und bei der Verdrehung der Spindel 14 nicht mitverdreht werden.

Wie Fig. 2 zeigt, sind drei Meßeinrichtungen 16 vorgesehen. Der Radialwinkel zwischen zwei Meßeinrichtungen beträgt jeweils 120°.

Die Meßeinrichtungen 16 sind mit Heterodyn-Interferometern ausgestattet. Diese entsprechen im Ausführungsbeispiel den von der Firma Zygo erhältlichen Heterodyn-Interferometern vom Typ Axiom 2/20, sind aber hinsichtlich des Strahlenganges abgewandelt.

Ein Laserkopf und Empfänger 22 jedes Interferometers ist nahe der Rotationsachse der Spindel 14 so angeordnet, daß der Strahlengang vom Laser radial auswärts gerichtet ist, wie der Pfeil R in Fig. 3 bis 5 angibt. Der Strahlengang zurück zum Empfänger ist radial einwärts gerichtet.

Entlang dem Strahlengang des Laserkopfs/Empfängers 22 verläuft eine Führungsbahn 24 radial auswärts (Fig. 3), wobei das rotationsachsennahe Ende der Führungsbahn als Halterung für den Laserkopf/Empfänger 22 dienen kann.

Ein Meßkopf 28 des Heterodyn-Interferometers ist entlang der Führungsbahn 24 in radialer Richtung verschiebbar, so daß er über die gesame Breite des Spiegelsegments 20 in radialer Richtung verfahren werden kann. Die Bewegung des Meßkopfes 28 erfolgt durch im Stand der Technik bekannte Vorrichtungen.

Die Gradlinigkeit der Führungsbahn 24 in horizontaler wie vertikaler Hinsicht ist relativ unkritisch; Gradinigkeiten von 10 µm reichen aus.

Entlang der Führungsbahn 24 erstreckt sich ein als Encoder für die Radialstellung des Meßkopfes dienender Glasmaßstab oder dergleichen, der in den Fig. nicht gezeigt ist.

Neben der Führungsbahn 24 erstreckt sich, wie Fig. 4 zeigt, parallel ein Referenzelement 26, das beispielsweise durch ein poliertes Zerodurlineal gebildet wird. Das Referenzelement 26 ist im Abstand einiger Millimeter über der Oberfläche 34 des Spiegelsegmentes 20 aufgehängt, und wird im Ausführungsbeispiel von den Abstützungen für die Führungsbahn 24 getragen, die sich einerseits nahe der Rotationsachse, andererseits am Außen-

umfang der Vermessungsmaschine 10 vom Grundrahmen 12 erheben.

Der Meßkopf 28 ermöglicht eine interferometrische Vermessung sowohl hinsichtlich des Referenzelementes 26, als auch der Oberfläche 34, wie in Fig. 4 bis 6 einerseits durch eine gepunktete, andererseits durch eine durchgezogene Linie angedeutet ist.

Die vom Heterodyn-Interferometer ermittelten Daten werden ebenfalls in den genannten Computer eingegeben.

Der Vermessungsvorgang beginnt mit dem Einmessen der Referenzelemente mittels der zugeordneten Heterodyn-Interferometer. Dazu wird der Meßkopf 28 auf der Führungsbahn 24 entlang dem zugeordneten Referenzelement 26 verfahren, dessen Kontur zunächst nur näherungsweise bekannt ist. Die Vermessung erfolgt bezüglich eines Geradlinigkeitsnormals bekannter Geometrie, beispielsweise einer Quecksilberoberfläche, mit einer Genauigkeit besser als 10 nm. So wird eine Bezugskontur 26′ am Referenzelement ermittelt, die datenmäegebenen, im Computer bereits gespeicherten Sollwerte können die Abweichungen von der Sollgeometrie bestimmt werden.

Falls erforderlich, können Axialschlag der Spindel, Vibrationen und dergleichen überwacht und entsprechende Meßdaten dem Computer zur Kompensation übermittelt werden. Hierzu können beispielsweise weitere unabhängige Interferometer eingesetzt werden.

Ein (nicht gezeigter) Wellenlängenkompensator mit einer Auflösung von beispielsweise 5×10^{-9} stellt luftdruckabhängige Wellenlängenänderungen fest und ermöglicht eine entsprechende Kompensation der Meßdaten.

Bei der Messung erfolgt die genannte langsame Drehbewegung der Spindel 14, so daß zusammen mit der radialen linearen Bewegung des Meßkopfes 28 die zu vermessenden Oberflächenbereiche spiralförmig radial einwärts oder auswärts von den Meßeinrichtungen überstrichen werden. Wegen der genannten geometrischen Bedingungen sind die Toleranzen bezüglich der Oberflächen-Hauptebene nicht sehr kritisch. Dies gilt natürlich nicht für die Toleranzen in zur Hauptebene senkrechter Richtung, d. h. Axialrichtung der Spindel 14.

Während sich die zu vermessende Oberfläche unter der Meßeinrichtung 16 durchbewegt, wird, wie schon gesagt, die Ist-Kontur gemessen und im Computer gespeichert.

Damit die interferometrisch abgetasteten Werkstück- und Referenzelement-Oberflächen keine Fehlmessungen ergeben, müssen diese staubfrei bleiben. Zur Entfernung von Staub u.dgl. kann eine zwischen den Meßeinrichtungen angeordnete eine Säuberungsvorrichtung, beispielsweise eine Absaugvorrichtung (nicht gezeigt) eingesetzt werden.

Fig. 7 und 8 zeigen eine erfindungsgemäße Poliervorrichtung, mit der das erfindungsgemäße Bearbeitungsverfahren durchgeführt werden kann.

In ihrem grundsätzlichen Aufbau entspricht die Poliervorrichtung 10′ der bereits anhand Fig. 1 bis 6 beschriebenen Vermessungsvorrichtung. Daher entsprechen die in Fig. 7 und 8 gezeigten Teile den Teilen in Fig. 1 bis 6, die gleiche Bezugszeichen tragen.

Gegenüber der Vermessungsvorrichtung (Fig. 1 bis 6) kommen bei der Poliervorrichtung nur Bearbeitungseinheiten 18 hinzu.

Die Bearbeitungseinheiten 18 sind ebenfalls fest mit dem Grundrahmen 12 verbunden und werden bei der Verdrehung der Spindel 14 nicht mitverdreht. Im Ausführungsbeispiel sind drei Bearbeitungseinheiten 18 um jeweils 120° zueinander versetzt so gegenüber den Meßeinrichtungen 16 angeordnet, daß jeweils zwischen zwei Meßeinrichtungen 16 eine Bearbeitungseinheit 18 liegt und der Winkel zwischen benachbarten Meßeinrichtungen 16 und Bearbeitungseinheiten 18 gerade 60° beträgt.

Die Bearbeitungseinheiten 18 weisen, ähnlich wie die Meßeinrichtungen 16, eine Führungsbahn 32 auf, die oberhalb der Oberfläche 34 des Spiegelsegments 20 verläuft und am nichtverdrehten Teil der Poliermaschine 10′ abgestützt ist.

Entlang der Führungsbahn 32 ist ein Polierkopf 30 über die gesamte Radialerstreckung des Spiegelsegments 20 verfahrbar. Größe und Formgebung des Polierstiftes des Polierkopfes 30 werden auf die Geometrie der zu bearbeitenden Oberfläche abgestimmt.

Antrieb und Verstellung des Polierkopfes 30 erfolgen durch im Stand der Technik bekannte Vorrichtungen; ein sich entlang der Führungsbahn 32 erstreckender Encoder (nicht gezeigt), der ebenfalls durch einen Glasmaßstab gebildet werden kann, ermöglicht die Feststellung der jeweiligen Radialposition des Polierkopfes 30. Im Betrieb wird der Polierkopf 30 auf der Grundlage der im Computer gespeicherten Daten stets im gleichen Abstand zur Rotationsachse 15 (Rundtischmitte) gehalten wie der zugeordnete Interferometermeßkopf 28, d. h. der Meßkopf der in Bearbeitungsrichtung A (Fig. 7) vorausgehenden Meßeinrichtung 16. Die Polierstifte der Polierköpfe 30 werden computergesteuert auf die Oberfläche aufgesetzt bzw. von dieser abgehoben. Der Bearbeitungsdruck der Polierstifte auf die Oberfläche wird so eingestellt, daß der Materialabtrag zwischen zwei Interferometerplätzen höchstens gleich der zulässigen Konturtoleranz (z. B. 25 nm) ist.

Der Bearbeitungsvorgang beginnt, wie der schon beschriebene Vermessungsvorgang, mit dem Einmessen der Referenzelemente 26. Es folgt

die schon beschriebene Vermessung der Oberflächenkontur-Istwerte und die rechnerische Bestimmung der Abweichungen von der Sollgeometrie der Oberfläche.

Bei der Drehbewegung der Spindel 14 werden Bearbeitungsbereiche gebildet, die sich entsprechend den schon be schriebenen Vermessungsbereichen spiralförmig radial einwärts oder auswärts erstrecken. Der Abstand der Spiralbahnen entspricht der Wegstrecke, auf der sich die Pfeilhöhe der Spiegeloberfläche in radialer Richtung bezüglich des Referenzelementes um eine Toleranzeinheit ändert, beispielsweise um 25 nm. Bei langbrennweitigen Parabolsegmenten macht dies typischerweise einige Zehntel Millimeter aus, bei günstiger Ausbildung der Referenzelemente sogar nur einige Millimeter. Diese Bahnabstände werden bei der Wahl der Polierstifte hinsichtlich Größe und Formgebung zugrundegelegt.

Während sich die Oberfläche unter der Meßeinrichtung 16 durchbewegt, wird ihre Ist-Kontur gemessen und datenmäßig im Computer gespeichert. Mittels dieser gespeicherten Ist-Konturdaten erfolgt die Steuerung der in Bearbeitungsrichtung A folgenden Bearbeitungseinheit, also des Polierkopfes 30. Die Abtragsrate wird dabei so eingestellt, daß der Abtrag zwischen zwei in Bearbeitungsrichtung A aufeinanderfolgenden Meßeinheiten kleiner ist als die Toleranzeinheit (z. B. 25 nm). Das bedeutet, daß zwischen zwei Meßvorgängen nie so viel Material abgetragen werden kann, daß die Konturtoleranz überschritten wird.

Die der genannten Bearbeitungsstation in Bearbeitungsrichtung A folgende Meßeinrichtung 16 stellt fest, ob der vorausgegangene Bearbeitungsschritt die Oberflächen-Istkontur bereits in den Toleranzbereich der Oberflächen-Sollkontur gebracht hat. Wenn dies der Fall ist, wird die nachfolgende Bearbeitungsstation in diesem Bearbeitungsbereich nicht betätigt, so daß kein weiterer Abtrag erfolgt.

Die Meß- und Bearbeitungsvorgänge werden solange wiederholt, bis sämtliche Spiegelsegmente innerhalb der Toleranz die Oberflächen-Sollkontur erreicht haben.

Die bereits genannte Absaugvorrichtung dient bei der Bearbeitung vorteilhaft zur Entfernung von Abtragungsrückständen.

Die Trennung des Meßvorganges zum zugeordneten Bearbeitungsvorgang (d. h. beim gleichen Oberflächenbereich) in zeitlicher Hinsicht ermöglicht es, daß beim Bearbeiten entstehende lokale Erwärmungen sich vor der nächsten Messung wieder abbauen und Luftwirbel abklingen.

Wenn eine Unterbrechung der Bearbeitung an Fugen und Aussparungen zwischen einzelnen Werkstückteilen, beispielsweise Spiegelsegmenten, unerwünscht ist, können Füllkörper eingesetzt und mitpoliert werden.

Es versteht sich, daß der gesamte Bearbeitungsvorgang beendet wird, sobald die Meßeinheiten das Erreichen der Sollkontur für die gesamte Oberfläche feststellen.

Ansprüche

1. Verfahren zur berührungslosen Vermessung von Oberflächen, insbesondere von großflächigen Spiegeln oder dergleichen, bei dem zur Ermittlung von Konturabweichungen der Oberfläche die Differenz zwischen interferometrisch erfaßten Oberflächenkontur-Istwerten und vorgewählten Oberflächenkontur-Sollwerten bestimmt wird, dadurch gekennzeichnet, daß

a) eine Bezugskontur wenigstens eines Referenzelements, deren Erstreckung einem Vermessungsbereich der Oberfläche im wesentlichen entspricht, interferometrisch bezüglich eines Normals vermessen wird, dessen Geometrie innerhalb der zulässigen Konturtoleranz der Oberfläche bekannt ist,

b) daß die zu vermessende Oberfläche in eine definierte räumliche Lage bezüglich des Referenzelementes gebracht und

c) die Beabstandung der Bezugskontur vom Vermessungsbereich der Oberfläche inkrementell interferometrisch erfaßt wird und die jeweilige Differenz zwischen Ist-und Sollwert bestimmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Referenzelement und die zu bearbeitende Oberfläche relativ zueinander bewegt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Referenzelement auf eine gedachte Radiallinie bezüglich einer senkrechten Rotaionsachse durch die Oberflächenhauptebene liegt, um welche Rotationsachse die Oberfläche gedreht wird, so daß der im wesentlichen radial verlaufende Vermessungsbereich einen Teil einer Spirallinie auf der Oberfläche bildet.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß jede von einem Vermessungsbereich gebildete Spiralbahn der Spirallinie einer Wegstrecke entspricht, auf der sich die Pfeilhöhe der Oberfläche in radialer Richtung bezüglich der Bezugskontur des Referenzelementes um die Konturtoleranz ändert.

5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Meßkopf des Interferometers in inkrementellen Schritten entlang der zugeordneten Radiallinie über den Vermessungsbereich bewegt wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Referenzelemente beabstandet aufeinanderfolgend verwendet werden.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
dadurch gekennzeichnet, daß die Bestimmung der Ist- und Sollwerte durch Laser-Interferometer erfolgt und gegebenenfalls der Einfluß der Wellenlängen-Luftdruckabhängigkeit des Laserlichts interferometrisch in Echtzeit zur Korrektur erfaßt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7,
dadurch gekennzeichnet, daß scannende Heterodyn-Interferometer zusammen mit linearen Referenzelementen verwendet werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8,
dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächen-Hauptebene im wesentlichen horizontal bezüglich der Gravitationsrichtung ausgerichtet wird und das Referenzelement im geringen Abstand von der Oberfläche oberhalb dieser aufgehängt oder abgestützt wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9,
dadurch gekennzeichnet, daß die Oberfläche vorbereitend auf eine Konturrichtigkeit im Bereich einiger 10^{-6} m vorpoliert wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10,
dadurch gekennzeichnet, daß die interferometrischen Erfassungsvorgänge, die Berechnungen sowie die Steuer-und Regelvorgänge bei der Vermessung mittels eines Computers automatisiert vorgenommen werden.

12. Verfahren nach Anspruch 11,
dadurch gekennzeichnet, daß mittels des Computers die geometrischen Soll-Daten der Oberfläche berechnet bzw. gespeichert werden.

13. Verfahren zur berührungslosen Vermessung und abtragenden Bearbeitung von Oberflächen, insbesondere zum Feinstpolieren großflächiger Spiegel oder dergleichen, bei dem die Differenz zwischen interferometrisch erfaßten Oberflächenkontur-Istwerten und vorgewählten Oberflächenkontur-Sollwerten bestimmt und in Abhängigkeit vom Ergebnis ein oberflächiger Materialabtrag vorgenommen wird, dadurch gekennzeichnet, daß

a) eine Bezugskontur wenigstens eines Referenzelements, deren Erstreckung einem Bearbeitungsbereich der Oberfläche im wesentlichen entspricht, interferometrisch bezüglich eines Normals vermessen wird, dessen Geometrie innerhalb der zulässigen Konturtoleranz der zu erzielenden Oberfläche bekannt ist,

b) daß die zu bearbeitende Oberfläche in eine definierte räumliche Lage bezüglich des Referenzelementes gebracht und

c) die Beabstandung der Bezugskontur vom Bearbeitungsbereich der Oberfläche inkrementell interferometrisch erfaßt sowie die jeweilige Differenz zwischen Ist- und Sollwert bestimmt wird,

d) daß in Abhängigkeit vom Ergebnis im Bearbeitungsbereich nachfolgend ein Materialabtrag von der Oberfläche vorgenommen wird, dessen Ausmaß die zulässige Konturtoleranz nicht übersteigt, und

e) die Erfaßung gemäß Schritt c) und gegebenenfalls die Bearbeitung gemäß Schritt d) wiederholt werden, bis die Oberflächenkontur innerhalb der Toleranz dem Sollwert entspricht.

14. Verfahren nach Anspruch 13,
dadurch gekennzeichnet, daß der Materialabtrag durch wenigstens ein antreibbares gesteuertes Werkzeug einer Bearbeitungseinheit, insbesondere einen oder mehrere Polierstifte erfolgt.

15. Verfahren nach Anspruch 13 oder 14,
dadurch gekennzeichnet, daß das Referenzelement und eine Bearbeitungseinheit in festem Abstand zueinander angeordnet werden und die zu bearbeitende Oberfläche relativ dazu bewegt wird, so daß der Bearbeitungsbereich nacheinander in entsprechende Stellungen gegenüber dem Referenzelement und der Bearbeitungseinheit gebracht wird.

16. Verfahren nach Anspruch 15,
dadurch gekennzeichnet, daß das Referenzelement und die Bearbeitungseinheit auf gedachten Radiallinien bezüglich einer senkrechten Rotationsachse durch die Oberflächenhauptebene liegen, um welche Rotationsachse die Oberfläche gedreht wird, so daß der im wesentlichen radial verlaufende Bearbeitungsbereich einen Teil einer Spirallinie auf der Oberfläche bildet.

17. Verfahren nach Anspruch 16,
dadurch gekennzeichnet, daß jede der von den Bearbeitungsbereichen gebildeten Spiralbahnen der Spirallinie einer Wegstrecke entspricht, auf der sich die Pfeilhöhe der Oberfläche in radialer Richtung bezüglich der Bezugskontur des Referenzelementes um die Konturtoleranz ändert.

18. Verfahren nach Anspruch 16 oder 17,
dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens ein Bearbeitungswerkzeug der Bearbeitungseinheit und der Meßkopf des Interferometers in einander zugeordneten inkrementellen Schritten entlang den jeweiligen Radiallinien bewegt werden.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 18,
dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Referenzelemente und Bearbeitungseinheiten alternierend aufeinanderfolgend verwendet werden.

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 19,
dadurch gekennzeichnet, daß die Bestimmung der Ist- und Sollwerte durch Laser-Interferometer erfolgt und gegebenenfalls der Einfluß der Wellenlängen-Luftdruckabhängigkeit des Laserlichts interferometrisch in Echtzeit zur Korrektur erfaßt wird.

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 20,
dadurch gekennzeichnet, daß scannende Heterodyn-Interferometer zusammen mit linearen Referenzelementen verwendet werden.

22. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 21,
dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächen-Hauptebene im wesentlichen horizontal bezüglich der Gravitationsrichtung ausgerichtet wird und das Referenzelement im geringen Abstand von der Oberfläche oberhalb dieser aufgehängt oder abgestützt wird.

23. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 22,
dadurch gekennzeichnet, daß die Oberfläche vorbereitend auf eine Konturrichtigkeit im Bereich einiger 10^{-6} m vorpoliert wird.

24. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die interferometrischen Erfassungsvorgänge, die Berechnungen sowie die Steuer-und Regelvorgänge bei der Bearbeitung mittels eines Computers automatisiert vorgenommen werden.

25. Verfahren nach Anspruch 24,
dadurch gekennzeichnet, daß mittels des Computers die geometrischen Soll-Daten der Oberfläche berechnet bzw. gespeichert werden.

26. Vorrichtung zur berührungslosen Vermessung von Oberflächen, insbesondere von großflächigen Spiegeln oder dergleichen, mit einer das Werkstück, dessen Oberfläche zu vermessen ist, aufnehmenden Tragstruktur und Meßvorrichtungen zur interferometrischen Erfassung der Oberflächenkontur,
dadurch gekennzeichnet, daß

a) wenigstens ein Referenzelement (26) vorgesehen ist, das sich beabstandet im wesentlich parallel zu einem Vermessungsbereich der Oberfläche (34) erstreckt,

b) eine Interferometer-Meßeinrichtung (16) dem Referenzelement (26) zugeordnet ist, mittels derer das Referenzelement (26) vermessen und der Abstand zwischen dem Referenzelement (26) und dem Vermessungsbereich erfaßt wird,

c) Vorrichtungen (14) zur Erzeugung einer Relativbewegung zwischen dem Werkstück (20) und der Meßeinrichtung (16) vorgesehen sind.

27. Vorrichtung nach Anspruch 26,
dadurch gekennzeichnet, daß eine Tragstruktur (12, 14) zur Aufnahme des Werkstücks mit bezüglich der Gravitationsrichtung im wesentlichen waagerecht liegender Oberflächen-Hauptebene vorgesehen ist.

28. Vorrichtung nach Anspruch 27,
dadurch gekennzeichnet, daß die Tragstruktur von einem Rundtisch mit einer Spindel (14) gebildet wird, die um eine vertikale Rotationsachse drehbar ist.

29. Vorrichtung nach Anspruch 27 oder 28,
dadurch gekennzeichnet, daß die Tragstruktur bzw. der Rundtisch eine luftgelagerte Spindel (14) aufweist, der ein Encoder zur Ermittlung der Winkelstellung der Spindel bezüglich der nicht verdrehten Tragstruktur zugeordnet ist, wobei die Spindel vorzugsweise einen Axialschlag von weniger als 0,1 Bogensekunden aufweist.

30. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 27 bis 29,
dadurch gekennzeichnet, daß die Tragstruktur einen im Betrieb nicht mitverdrehten Grundrahmen (12) umfaßt.

31. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 26 bis 30,
dadurch gekennzeichnet, daß die Meßeinrichtungen (16) ortsfest oberhalb der Oberfläche (34) des Werkstücks (20) angeordnet, insbesondere am Grundrahmen (12) aufgehängt bzw. abgestützt sind und bei der Verdrehung des Werkstücks nicht mitverdreht werden.

32. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 26 bis 31,
dadurch gekennzeichnet, daß die Meßeinrichtung eine horizontal, insbesondere von der Rotationsachse radial bis über die äußere Begrenzung der zu bearbeitenden Oberfläche (34) hinaus verlaufende Führungsbahn (24) aufweist, entlang derer der Interferometer-Meßkopf (28) verfahrbar ist.

33. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 26 bis 32,
dadurch gekennzeichnet, daß jeweils mehrere gleiche Meßeinrichtungen (16) vorgesehen sind, insbesondere drei um 120° um die Rotationsachse des Rundtisches winkelbeabstandete Meßeinrichtungen (16) vorgesehen sind.

34. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 26 bis 33,
dadurch gekennzeichnet, daß die Meßeinrichtungen (16) mit Encodern wie beispielsweise Glasmaßstäben oder dergleichen zur Erfassung der Stellung, insbesondere der Radialstellung des jeweiligen

Meßkopfes (28) versehen sind, wobei sich die Encoder insbesondere entlang den Führungsbahnen (24) erstrecken.

35. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 26 bis 34,
dadurch gekennzeichnet, daß die Interferometer-Meßeinrichtungen (16) als scannende Heterodyn-Interferometer ausgebildet sind, wobei insbesondere die Laserköpfe und Empfänger (22) nahe der Rotationsachse des Rundtisches bzw. der Spindel (14) angeordnet sind.

36. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 26 bis 35,
dadurch gekennzeichnet, daß ein interferometrischer Wellenlängen-Kompensator vorgesehen ist, der luftdruck abhängige Wellenlängenänderungen zur Kompensation erfaßt.

37. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 26 bis 36,
dadurch gekennzeichnet, daß die Referenzelemente (26) im wesentlichen linear ausgebildet sind und sich insbesondere parallel zur zugeordneten Führungsbahn (24) erstrecken, und insbesondere aus langgestreckten mechanisch formstabilen Körpern, beispielsweise einem polierten Zerodurlineal, bestehen.

38. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 26 bis 37,
dadurch gekennzeichnet, daß die Referenzelemente (26) im Abstand einiger Millimeter über der zu bearbeitenden Oberfläche (34) aufgehängt bzw. abgestützt sind.

39. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 26 bis 38,
dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens ein weiteres unabhängiges Interferometer zur Erfassung des Axialschlags der Spindel, zur Erfassung von Vibrationen der Vorrichtung und dergleichen vorgesehen ist.

40. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 26 bis 39,
dadurch gekennzeichnet, daß ein Computer zur Speicherung der Sollkontur-Daten, der Istkontur-Meßdaten und zur Berechnung der Differenz zwischen beiden vorgesehen ist.

41. Vorrichtung zur abtragenden Bearbeitung von Oberflächen, insbesondere zum Feinstpolieren großflächiger Spiegel oder dergleichen, mit einer das Werkstück, dessen Oberfläche zu bearbeiten ist, aufnehmenden Tragstruktur, wenigstens einem abtragenden Bearbeitungswerkzeug, Vorrichtungen zur Relativbewegung von Werkstück und Bearbeitungswerkzeug sowie Meßvorrichtungen zur interferometrischen Erfassung der Oberflächenkontur,
dadurch gekennzeichnet, daß

a) wenigstens ein Referenzelement (26) vorgesehen ist, das sich beabstandet im wesentlich parallel zu einem Bearbeitungsbereich der Oberfläche (34) erstreckt,

b) eine Interferometer-Meßeinrichtung (16) dem Referenzelement (26) zugeordnet ist, mittels derer das Referenzelement (26) vermessen und der Abstand zwischen dem Referenzelement (26) und dem Bearbeitungsbereich erfaßt wird,

c) wenigstens eine von der Meßeinrichtung (16) beabstandete Bearbeitungseinheit (18) vorgesehen ist, mittels derer das Bearbeitungswerkzeug (30) abtragend über den gesamten Bearbeitungsbereich bewegbar ist, und

d) Vorrichtungen (14) zur Erzeugung einer Relativbewegung zwischen dem Werkstück (20) einerseits und der Meßeinrichtung (16) sowie der Bearbeitungseinheit (18) andererseits vorgesehen sind, um den Bearbeitungsbereich nacheinander mit der Meßeinrichtung (16) und der Bearbeitungseinheit (18) in einander entsprechende Relativstellungen zu bringen.

42. Vorrichtung nach Anspruch 41,
dadurch gekennzeichnet, daß eine Tragstruktur (12, 14) zur Aufnahme des Werkstücks mit bezüglich der Gravita tionsrichtung im wesentlichen waagerecht liegender Oberflächen-Hauptebene vorgesehen ist.

43. Vorrichtung nach Anspruch 42,
dadurch gekennzeichnet, daß die Tragstruktur von einem Rundtisch mit einer Spindel (14) gebildet wird, die um eine vertikale Rotationsachse drehbar ist.

44. Vorrichtung nach Anspruch 42 oder 43,
dadurch gekennzeichnet, daß die Tragstruktur bzw. der Rundtisch eine luftgelagerte Spindel (14) aufweist, der ein Encoder zur Ermittlung der Winkelstellung der Spindel bezüglich der nicht verdrehten Tragstruktur zugeordnet ist, wobei die Spindel vorzugsweise einen Axialschlag von weniger als 0,1 Bogensekunden aufweist.

45. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 42 bis 44,
dadurch gekennzeichnet, daß die Tragstruktur einen im Betrieb nicht mitverdrehten Grundrahmen (12) umfaßt.

46. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 41 bis 45,
dadurch gekennzeichnet, daß die Meßeinrichtungen (16) und die Bearbeitungseinheiten (18) ortsfest oberhalb der Oberfläche (34) des Werkstücks (20) angeordnet, insbesondere am Grundrahmen (12) aufgehängt bzw. abgestützt sind und bei der Verdrehung des Werkstücks nicht mitverdreht werden.

47. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 41 bis 46,
dadurch gekennzeichnet, daß die Meßeinrichtung

und die Bearbeitungseinheit horizontal, insbesondere von der Rotationsachse radial bis über die äußere Begrenzung der zu bearbeitenden Oberfläche (34) hinaus verlaufende Führungsbahnen (24 bzw. 32) aufweisen, entlang derer einesfalls der Interferometer-Meßkopf (28), andernfalls das Bearbeitungswerkzeug (30) verfahrbar ist.

48. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 41 bis 47,
dadurch gekennzeichnet, daß jeweils mehrere gleiche, alternierend angeordnete Meßeinrichtungen (16) und Bearbeitungseinheiten (18) vorgesehen sind, insbesondere drei um 120° um die Rotationsachse des Rundtisches winkelbeabstandete Meßeinrichtungen (16) und drei um 120° um die Rotationsachse winkelbeabstandete Bearbeitungseinheiten (18) so vorgesehen sind, daß einander benachbarte Meßeinrichtungen und Bearbeitungseinheiten unter einem Winkel von 60° zueinander liegen.

49. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 41 bis 48,
dadurch gekennzeichnet, daß die Meßeinrichtungen (16) und die Bearbeitungseinheiten (18) mit Encodern wie beispielsweise Glasmaßstäben oder dergleichen zur Erfassung der Stellung, insbesondere der Radialstellung des jeweiligen Meßkopfes (28) bzw. Werkzeugs (30) versehen sind, wobei sich die Encoder insbesondere entlang den Führungsbahnen (24 bzw. 32) erstrecken.

50. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 41 bis 49,
dadurch gekennzeichnet, daß die Interferometer-Meßeinrichtungen (16) als scannende Heterodyn-Interferometer ausgebildet sind, wobei insbesondere die Laserköpfe und Empfänger (22) nahe der Rotationsachse des Rundtisches bzw. der Spindel (14) angeordnet sind.

51. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 41 bis 50,
dadurch gekennzeichnet, daß ein interferometrischer Wellenlängen-Kompensator vorgesehen ist, der luftdruckabhängige Wellenlängenänderungen zur Kompensation erfaßt.

52. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 41 bis 51,
dadurch gekennzeichnet, daß die Referenzelemente (26) im wesentlichen linear ausgebildet sind und sich insbesondere parallel zur zugeordneten Führungsbahn (24) erstrecken, und insbesondere aus langgestreckten mechanisch formstabilen Körpern, beispielsweise einem polierten Zerodurlineal, bestehen.

53. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 41 bis 52,
dadurch gekennzeichnet, daß die Referenzelemente (26) im Abstand einiger Millimeter über der zu bearbeitenden Oberfläche (34) aufgehängt bzw. abgestützt sind.

54. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 41 bis 53,
dadurch gekennzeichnet, daß elektronische Steuervorrichtungen zur Führung der Werkzeuge (30) auf der Radialposition des Meßkopfes (28) der bezüglich des Bearbeitungsablaufs der Oberfläche (34) vorausgehenden Meßeinrichtung (16) sowie zum Aufsetzen und Abheben des Bearbeitungswerkzeugs (30) auf die bzw. von der Oberfläche (34) vorgesehen sind.

55. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 41 bis 54,
dadurch gekennzeichnet, daß Druckeinstellvorrichtungen für das Bearbeitungswerkzeug (30) vorgesehen sind, die den Bearbeitungsdruck des Werkzeugs so einzustellen gestatten, daß der Materialabtrag bei einem Bearbeitungsschritt höchstens gleich der zulässigen Konturtoleranz ist.

56. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 41 bis 55,
dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens ein weiteres unabhängiges Interferometer zur Erfassung des Axialschlags der Spindel, zur Erfassung von Vibrationen der Vorrichtung und dergleichen vorgesehen ist.

57. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 41 bis 56,
dadurch gekennzeichnet, daß ein Computer zur Speicherung der Sollkontur-Daten, der Istkontur-Meßdaten, zur Berechnung der Differenz zwischen beiden und zur Steuerung der der jeweiligen Meßeinrichtung (16) zugeordneten Bearbeitungseinheit (18) vorgesehen ist.

58. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 41 bis 57,
dadurch gekennzeichnet, daß eine Säuberungs-, insbesondere Absaugvorrichtung zur Entfernung von Abtragungsrückständen von der Oberfläche vorgesehen ist.

Fig. 1

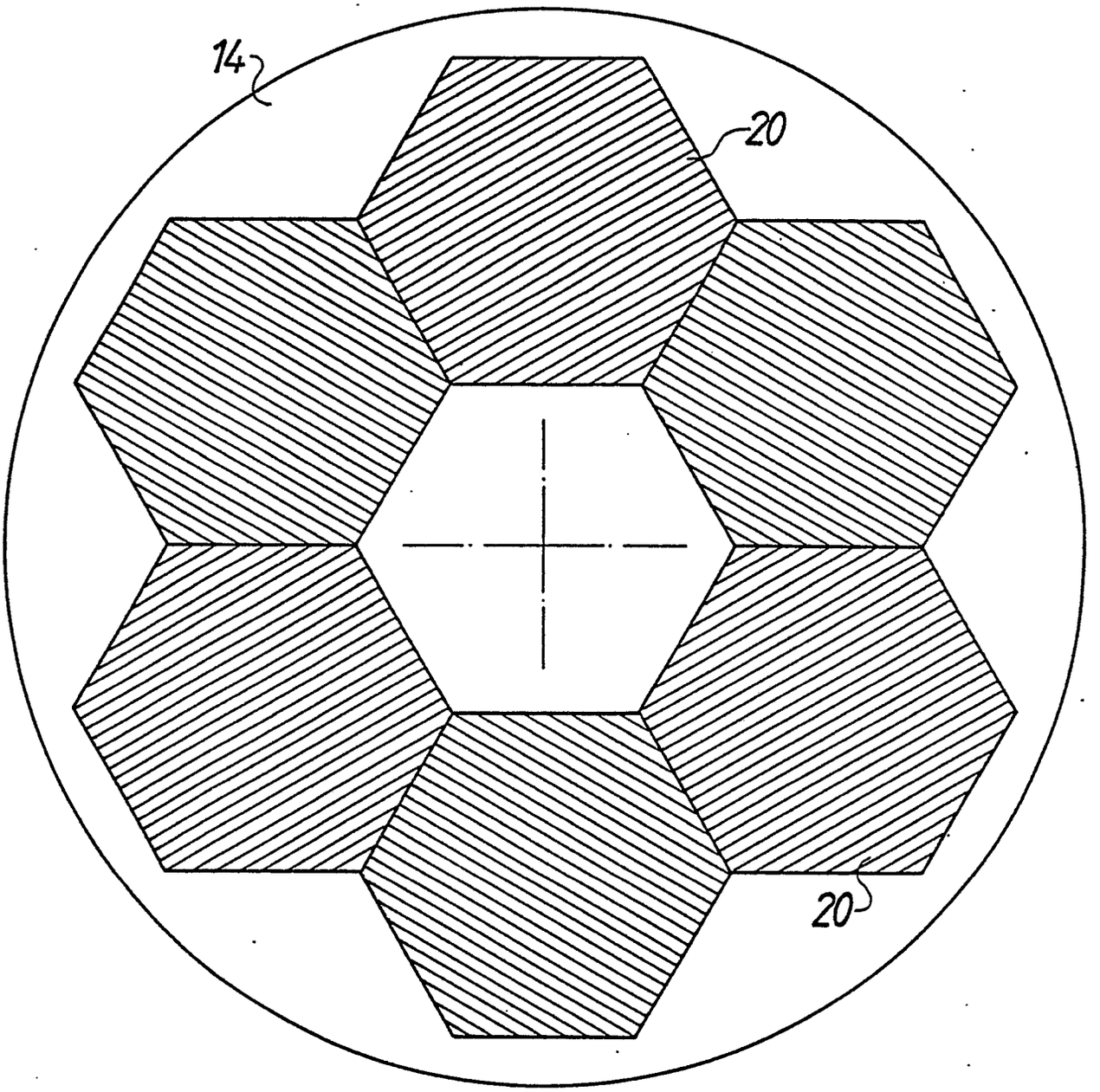


Fig. 2

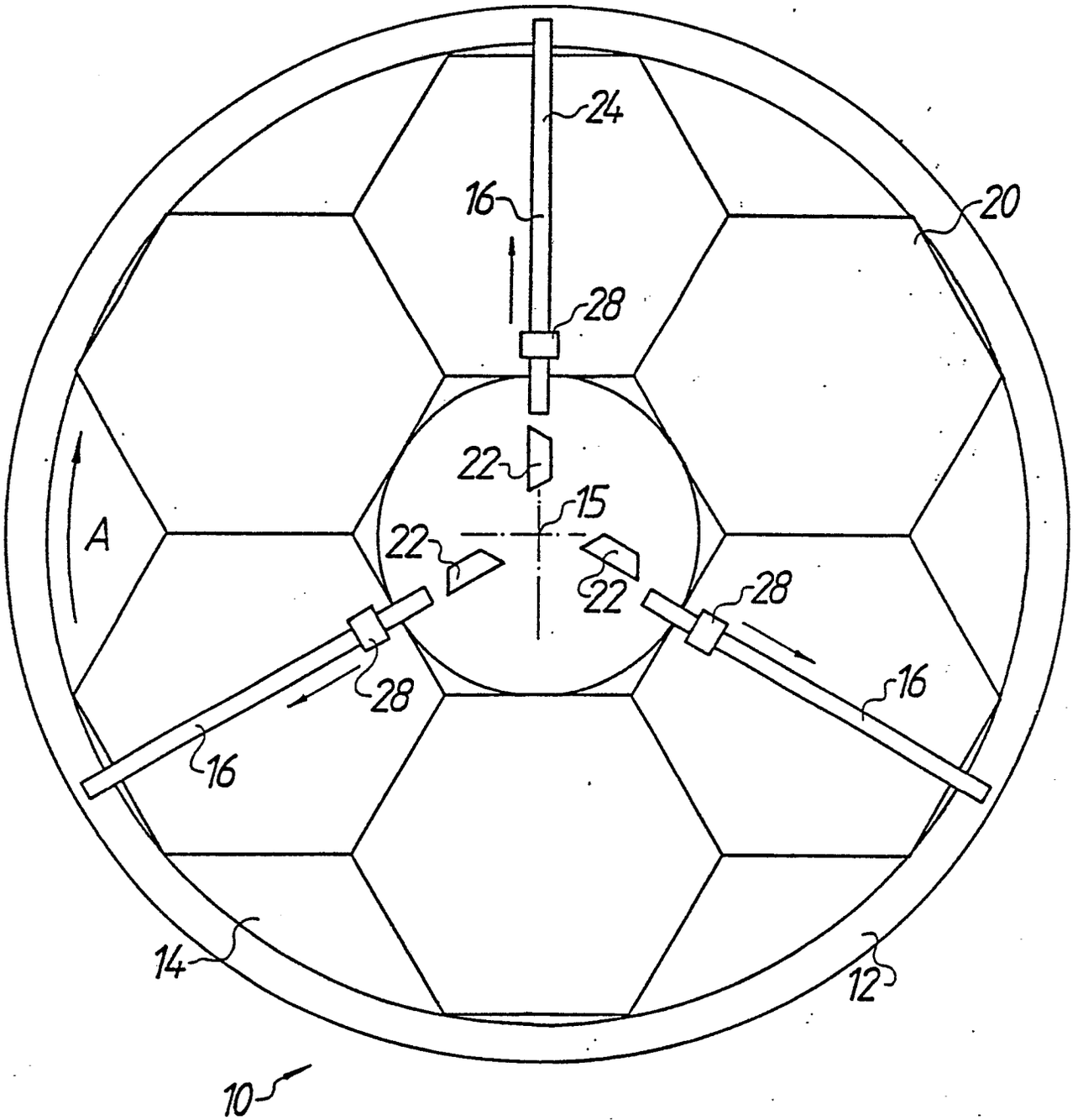


Fig.3

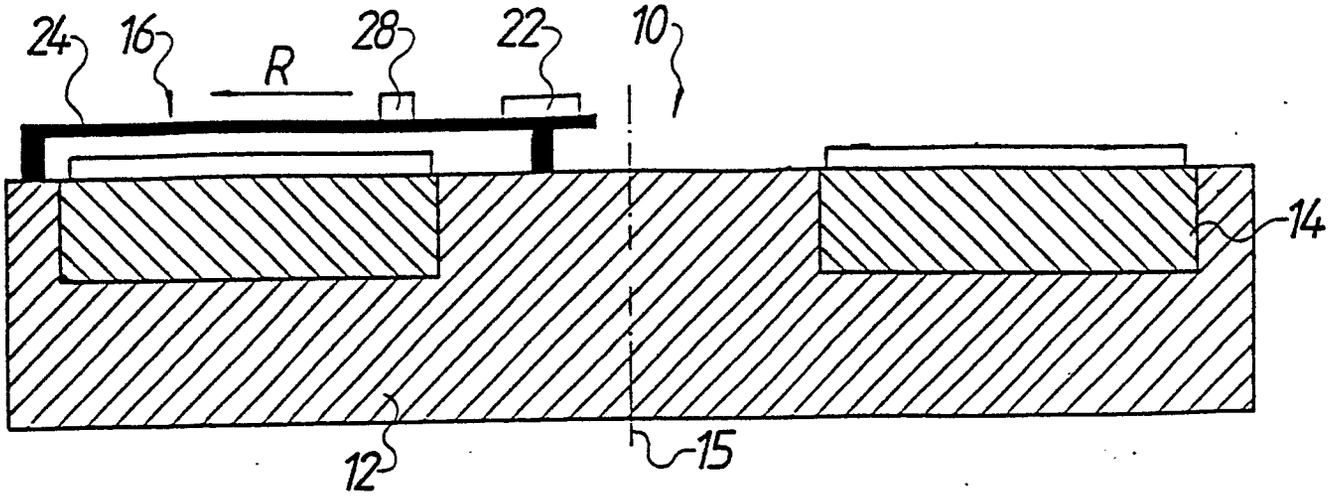


Fig.4

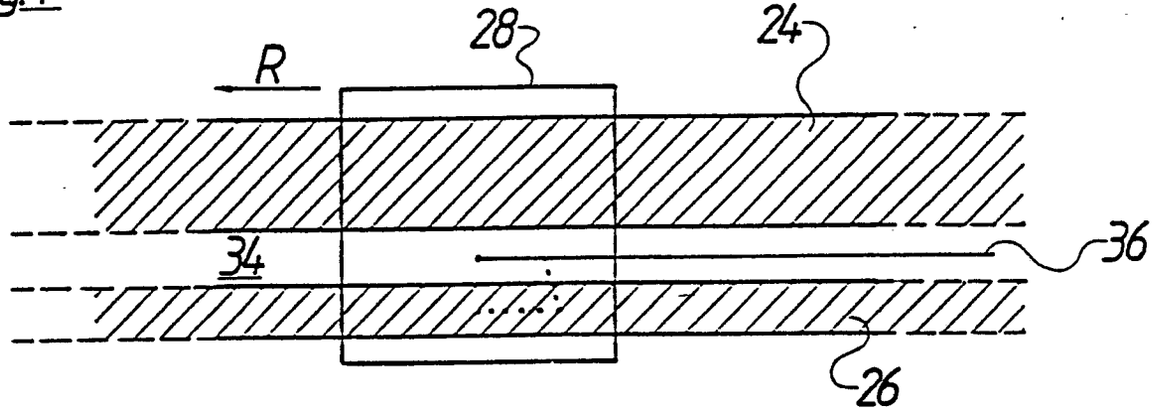


Fig.5

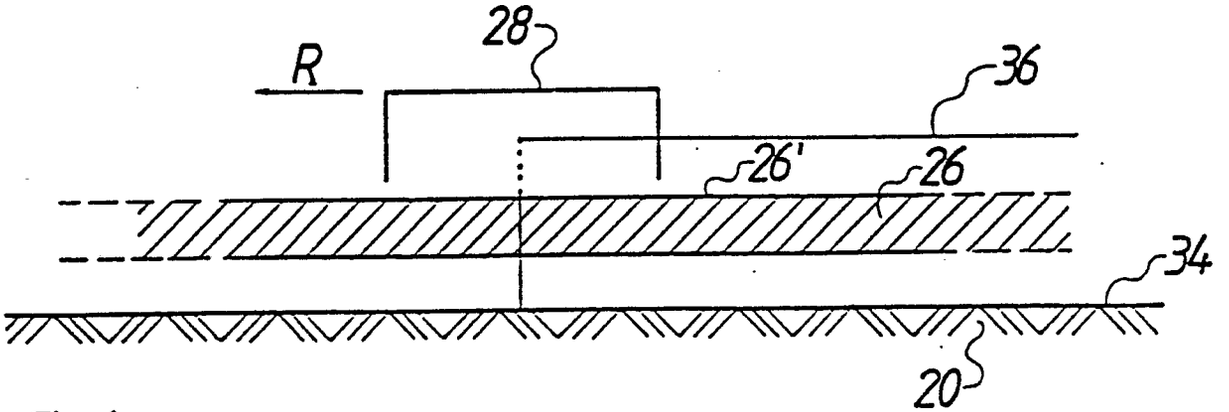


Fig.6

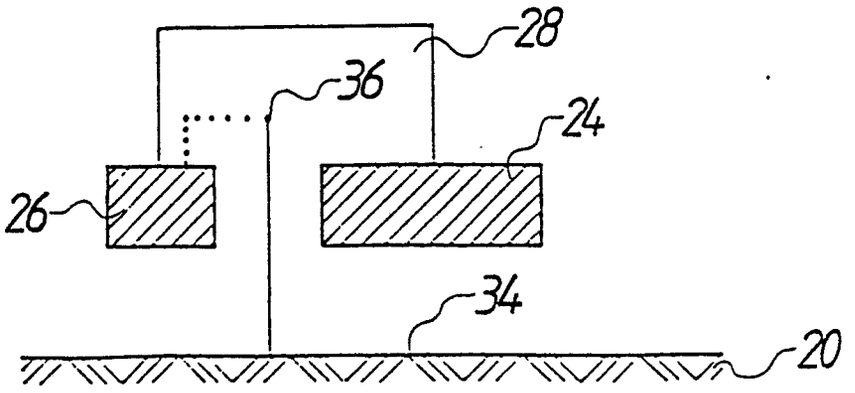


Fig.7

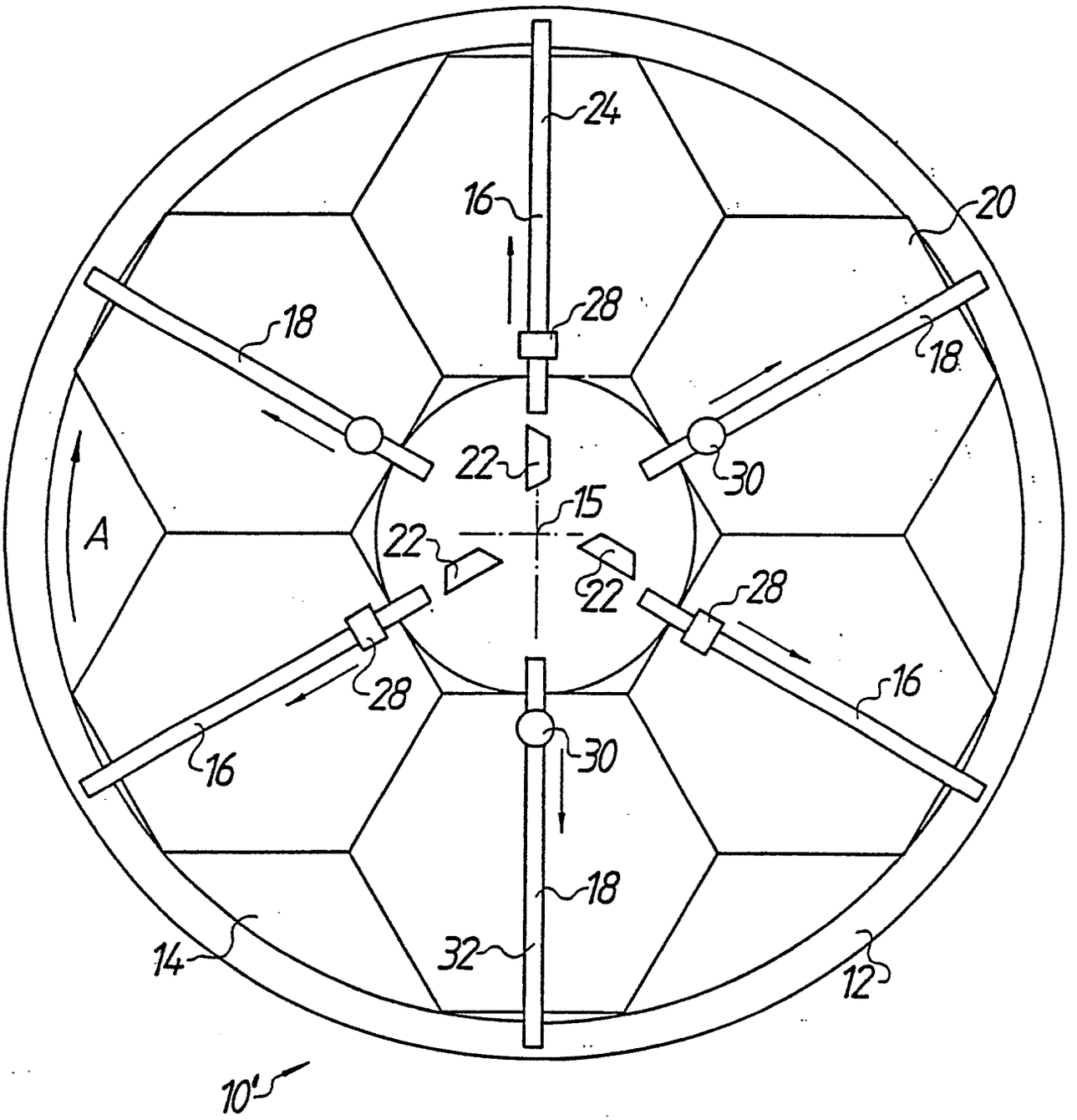
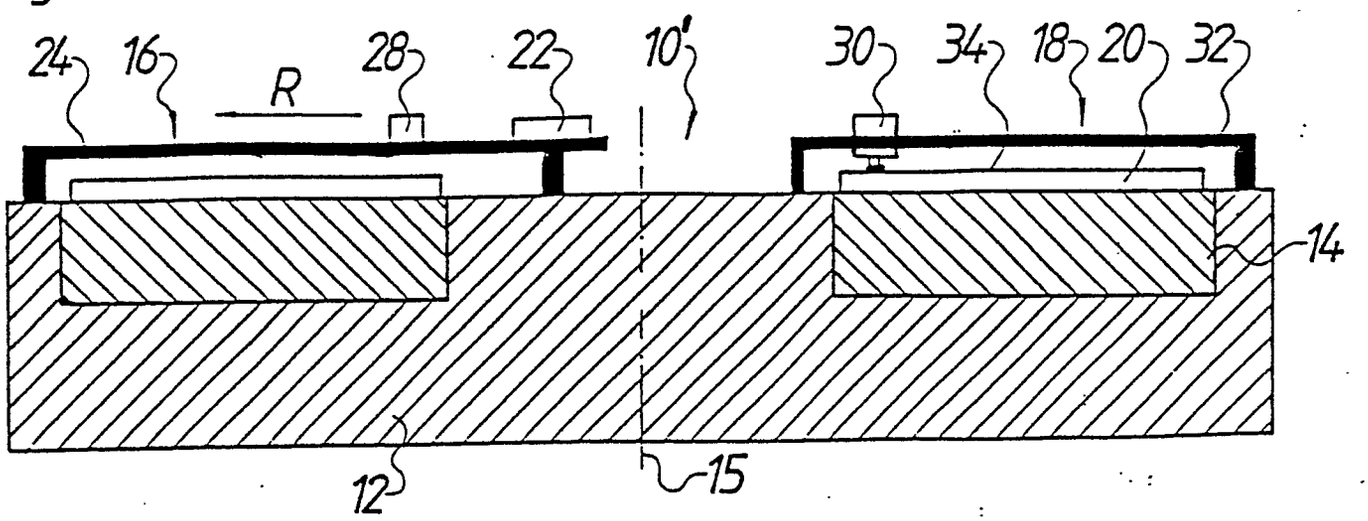

24
16
20
18
28
18
22
30
15
A
22
22
28
28
16
16
30
18
14
32
12
10'

Fig.8


24
16
R
28
22
10'
30
34
18
20
32
14
12
15