

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(21) Anmeldenummer: **87102822.1**

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

(22) Anmeldetag: **27.02.87**

(30) Priorität: **22.12.86 DE 3643914**

(71) Anmelder: **Firma Carl Zeiss**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
29.06.88 Patentblatt 88/26

D-7920 Heidenheim (Brenz)(DE)

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE FR NL

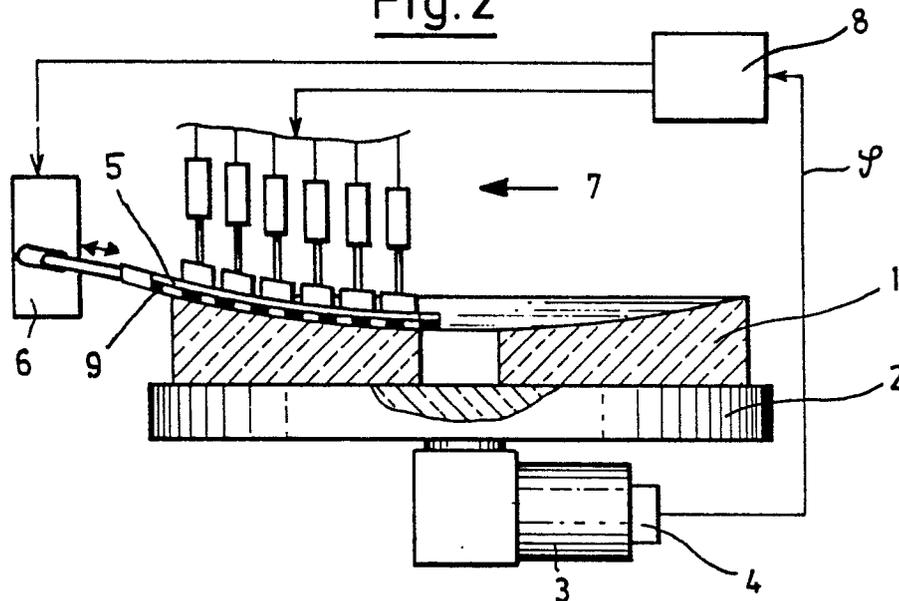
(72) Erfinder: **Heynacher, Erich, Dr.**
Lukas-Cranach-Strasse 26
D-7920 Heidenheim(DE)

(54) **Verfahren und Vorrichtung zum Läppen bzw. Polieren optischer Flächen.**

(57) Das relativ zum Werkzeug bewegte Werkstück (1) wird mit einem Werkzeug in Form einer streifenförmig ausgebildeten flexiblen Membran (5) bearbeitet, auf deren Rückseite Belastungselemente (7) mit einzeln ansteuerbarer Andruckkraft angeordnet sind. Die von den Belastungselementen (7) auf das Werkstück (1) ausgeübte Druckverteilung wird zeitlich, abhängig von der Position des Werkstücks (1) variiert.

Mit Hilfe des Verfahrens lassen sich große optische Elemente wie z.B. Teleskopspiegel und Glanzwinkeloptik für Röntgenteleskope schneller als mit den bisher bekannten Verfahren polieren, wobei auch nicht-rotationssymmetrische Fehler der Oberfläche beseitigt werden können.

Fig.2



EP 0 272 362 A2

Verfahren und Vorrichtung zum Läppen bzw. Polieren optischer Flächen

Das Läppen und Polieren von relativ großen optischen Bauteilen, wie sie z.B. für astronomische Beobachtungen benötigt werden, ist mit konventionellen Techniken eine sehr zeitaufwendige Arbeit, da es äußerst schwierig ist die gewünschte Form mit der erforderlichen Genauigkeit von Bruchteilen der Lichtwellenlänge, typisch etwa 10-50 nm RMS, über die gesamte zu bearbeitende Fläche zu erreichen.

Zur Verkürzung der Bearbeitungszeit wurde bereits ein Verfahren vorgeschlagen, das ein die gesamte zu bearbeitende Fläche des Werkstücks bedeckendes Werkzeug in Form einer flexiblen Membran vorsieht. Das Werkzeug, an dessen Unterseite die Polierelemente befestigt sind, oszilliert dabei tangential über das Werkstück unter einer Reihe von relativ zum Werkstück feststehenden Belastungselementen, von denen eine aus den Abweichungen des Werkstücks von der Sollform berechnete Druckverteilung erzeugt wird.

Mit diesem, aus der DE-A1 34 30 499 bekannten Verfahren ist es jedoch schwierig, sehr große Bauteile wie z.B. Teleskopspiegel mit einem Durchmesser von 4 oder mehr Metern zu bearbeiten, da das entsprechend große Werkzeug dann schwer handhabbar wird. Probleme bereiten unter anderem das Zuführen des Poliermittels, das stets sehr gleichmäßig erfolgen muß, sowie das Präparieren, d.h. das Belegen und Abdrücken des Werkzeugs. Außerdem können die starken lokalen Druckdifferenzen auf der Rückseite des Werkzeuges ein Fließen des Poliermittelträgers verursachen, so daß sich das Werkzeug relativ rasch verformt. Dies führt zu einer Verringerung der nutzbaren Dynamik des Polierverfahrens.

Mit dem bekannten Verfahren ist es außerdem nicht ohne weiteres möglich, Glanzwinkeloptik wie z.B. die konischen Schalen von Wolter-Teleskopen für die Röntgenastronomie zu bearbeiten.

Aus der US-PS 23 99 924 ist ein Polierverfahren bekannt, welches ähnlich wie das vorgenannte eine sich über die gesamte zu bearbeitende Fläche erstreckende, flexible Membran als Werkzeug vorsieht, die mit einer an den vorausberechneten Materialabtrag angepaßten Druckverteilung belastet wird. Gleichzeitig rotiert hier das zu bearbeitende Werkstück.

Mit diesem Verfahren lassen sich aber nur rotationssymmetrische Abweichungen von der Sollform des Werkstücks herauspolieren. Außerdem ist es nicht möglich kurzperiodische Abweichungen zu beseitigen, denn die Druckverteilung auf der Rückseite des Werkzeuges verschiebt sich bei den Polierbewegungen relativ zum Werkstück, da sie durch Gewichte erzeugt wird, die auf der Membran

aufliegen und sich mit der Membran über die zu bearbeitende Fläche bewegen.

Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung ein Verfahren anzugeben, mit dem die vorstehend genannten Nachteile vermieden werden. Das Verfahren sollte möglichst kurze Bearbeitungszeiten ermöglichen und bezüglich der zu beseitigenden Formabweichungen möglichst universell anwendbar sein.

Diese Aufgabe wird ausgehend von dem im Oberbegriff genannten und einleitend beschriebenen Verfahren gemäß dem Kennzeichen des Anspruches 1 dadurch gelöst, daß das Werkzeug (5) streifenförmig ausgebildet ist und nur einen Teilbereich des Werkstückes (1) bedeckt und der zeitliche Verlauf der Druckverteilung abhängig von der momentanen Relativposition zwischen Werkstück (1,21) und Werkzeug (5,25) gesteuert wird.

Die zur Durchführung des Verfahrens benutzte Vorrichtung besitzt deshalb einen Antrieb zur Herbeiführung einer Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück in einer zweiten Richtung mit angeschlossenem Positionsmeßsystem, sowie eine mit dem Positionsmeßsystem und den Belastungseinrichtungen verbundene Steuerung, so daß die von den Belastungselementen ausgeübte Kraft abhängig von der momentanen Position des Werkstücks bzw. des Werkzeugs bezüglich dieser zweiten Bewegungsrichtung variiert werden kann.

Für rotationssymmetrische Werkstücke ist es zweckmäßig, wenn die zweite Bewegung eine Drehbewegung ist und der zeitliche Verlauf der Druckverteilung abhängig von dem über einen Winkelencoder ermittelten Drehwinkel (ϕ) zwischen Werkstück und Werkzeug gesteuert wird.

Es ist jedoch auch möglich, z.B. das Werkstück auf einem Schlitten anzuordnen, der eine oszillierende Linearbewegung ausführt, und die Druckverteilung entsprechend den Meßwerten eines mit den Schlitten verbundenen Längenmeßsystems zu steuern.

Die Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens sind einmal darin zu sehen, daß das verwendete streifenförmige Werkzeug sich aufgrund seiner relativ geringen Größe leichter herstellen und handhaben läßt, als ein das ganze Werkstück bedeckendes Werkzeug.

Außerdem sind die Differenzen der Bearbeitungsdrucke zwischen einzelnen Punkten auf der Rückseite des Werkzeuges im zeitlichen Mittel sehr viel kleiner als bei vollständiger Überdeckung des Werkstücks. Entsprechend geringer ist das Ausmaß, in dem das Material des Poliermittelträgers wegfließen kann. Die nötigen Abdrückvorgänge,

durch die der eigentliche Polierprozess immer wieder unterbrochen wird, können deshalb in größeren Abständen stattfinden.

Aufgrund der Geometrie des Werkzeuges läßt sich auch die Poliermittelzufuhr einfacher lösen.

Schließlich wurde festgestellt, daß die für dem eigentlichen Poliervorgang nötige Zeit sich nicht im gleichen Maße erhöht, wie sich die Fläche des Bearbeitungswerkzeuges vermindert. Vielmehr wird der durch die Teilbedeckung entstehende Zeitverlust dadurch kompensiert, daß die einzelnen, iterativ durchgeführten Bearbeitungsschritte, die aus mehrfachen Polierdurchgängen und dazwischenliegenden Meßvorgängen bestehen, in denen der Erfolg der Bearbeitung kontrolliert und die aus den Abweichungen berechnete Druckverteilung neu einzustellen ist, rascher konvergieren. Dieses bessere Konvergenzverhalten erklärt sich durch ein geringeres Durchprägen der Unvollkommenheiten des Werkzeuges selbst auf die zu bearbeitende Fläche, als Folge der Mittelung dieses Einflusses infolge der großen Bewegung des Werkzeuges relativ zum Werkstück.

Eine zusätzliche Verkürzung der Bearbeitungszeit läßt sich dadurch erzielen, daß gleichzeitig mit mehreren der streifenförmigen Werkzeuge an dem zu polierenden Teil gearbeitet wird.

Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachstehenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Figuren 1 bis 3 der beigefügten Zeichnungen.

Figur 1 ist eine Prinzipskizze einer für das Läppen bzw. Polieren von astronomischen Teleskopen geeigneten Vorrichtung in Aufsicht;

Figur 2 zeigt die Vorrichtung aus Figur 1 im Schnitt;

Figur 3 skizziert die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens auf Glanzwinkeloptik;

Figur 4 ist die Skizze einer anderen Ausführungsform des in der Vorrichtung nach Figur 1/2 bzw. 3 benutzten, streifenförmigen Werkzeuges;

Figur 5 stellt ein mit dem erfindungsgemäßen Verfahren zu bearbeitendes, nicht rotationssymmetrisches Werkstück dar;

Figur 6 ist eine Prinzipskizze einer für das Läppen bzw. Polieren des Werkstücks aus Figur 5 geeigneten Vorrichtung;

Figur 7 zeigt die Vorrichtung aus Figur 6 im Schnitt längs der Linie VII-VII;

Figur 8 skizziert eine weitere, alternative Ausführungsform für die Werkzeuge der Vorrichtungen aus Figur 1/2 und 6/7;

Figur 9 ist ein Diagramm, das die zur Beseitigung der Restfehler ΔZ der Fläche des Werkstücks (31) aus Figur 8 erforderliche Druckverteilung in Bewegungsrichtung (y) des Werkzeuges (37) zeigt;

Figur 10 stellt den zeitlichen Verlauf des Druckes eines der Belastungselemente (37) aus Figur 8 dar.

Die in Figur 1 und 2 dargestellte Poliervorrichtung besitzt eine drehbar gelagerte Aufnahme (2) für das mit (1) bezeichnete Werkstück. Bei dem Werkstück handelt es sich um den Hauptspiegel eines Teleskops für astronomische Beobachtungen mit einem Durchmesser von 8 Metern. Die Aufnahme (2) wird von einem Motor (3) angetrieben, auf dessen Welle ein Encoder (4) zur Erfassung des Drehwinkels aufgesetzt ist.

Das zur Bearbeitung der Oberfläche verwendete Polierwerkzeug besteht aus einer streifenförmigen, flexiblen Membran (5) von 5 m Länge und ca. 1 m Breite aus Aluminium, an deren Unterseite die Poliermittelträger (9) aus Pech aufgebracht sind. Wenn das Werkzeug (5) als Membran bezeichnet wird, so ist dabei zu berücksichtigen, daß die Membran bei den angegebenen Abmessungen durchaus eine Stärke von 1 cm oder mehr besitzen kann. Dieses streifenförmige Werkzeug (5) wird von einem Antrieb (6) entlang der in den Figuren nicht dargestellten Führungen in radialer Richtung in eine oszillierende Bewegung versetzt, wie dies durch den mit R bezeichneten Pfeil veranschaulicht ist.

Auf der Rückseite der Membran (5) stützen sich mehrere radial hintereinander angeordnete Belastungselemente (7) ab. Diese Belastungselemente sind elektromagnetisch-oder hydraulisch steuerbare Aktuatoren der Art, wie sie z.B. in der eingangs genannten DE-A1 34 30 499 beschrieben sind. Die Belastungselemente (7) stehen relativ zum Werkstück (1) fest und nehmen nicht an der oszillierenden Bewegung der Membran (5) teil.

Die einzelnen Belastungselemente der insgesamt mit (7) bezeichneten Gruppe werden individuell von einer Steuereinheit (8) mit einer aus den gemessenen Abweichungen der Fläche des Spiegels (1) von der Sollform berechneten Kraft beaufschlagt. Die Andruckkraft jedes einzelnen Aktuators (7) kann dabei in ihrem zeitlichen Verlauf abhängig von dem Azimutwinkel variiert werden, den der Encoder (4) an das Steuergerät (8) meldet. Entsprechend werden auch nicht rotationssymmetrische Fehler der Spiegeloberfläche angegriffen. Voraussetzung für dieses Verfahren ist natürlich, daß der azimutale Verlauf der Fehler der Spiegeloberfläche ermittelt und im Speicher eines an das Steuergerät (8) angeschlossenen Rechners abgelegt ist.

Wie dies in Figur 1 mit dem gestrichelt dargestellten Werkzeug (15) angedeutet ist, kann durchaus gleichzeitig mit mehreren Werkzeugen an dem Spiegel (1) gearbeitet werden.

In Figur 3 ist in perspektivischer Darstellung skizziert, wie mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens Glanzwinkeloptik bearbeitet werden kann.

Hier ist mit (11) eine der konischen Schalen eines Wolter-Teleskops bezeichnet, deren Innenfläche poliert werden soll. Dazu wird ein streifenförmiges Werkzeug (12) verwendet das längs Mantellinie des Konus (11) oszilliert. Diese Oszillationsbewegung wird durch den Pfeil M in Figur 3 veranschaulicht. Der Konus (11) selbst rotiert um seine Längsachse.

Im Innern des Konus (11) stützen sich ebenfalls wieder eine Reihe von Aktuatoren (13) mit einzeln einstellbarer und zeitlich, abhängig vom Drehwinkel ϕ des Konus (11) steuerbarer Kraft auf der Rückseite der Membran (12) ab. Die Aktuatoren (13) nehmen an der oszillierenden Bewegung der Membran (12) nicht teil, sondern sind in Richtung der Mantellinie feststehend angeordnet, bzw. führen selbständig eine Seitwärtsbewegung mit im Vergleich zur Bewegung der Membran (12) geringerer Amplitude und Frequenz aus.

In den beiden Ausführungsbeispielen nach Figur 1/2 und Figur 3 ist auf der Rückseite der streifenförmigen Membranen (5) bzw. (12) jeweils nur eine Reihe von Aktuatoren (7) bzw. (13) angeordnet. Dies ist jedoch nicht unbedingt erforderlich. Es ist durchaus vorteilhaft mehrere Reihen von Aktuatoren hintereinander anzuordnen und gleichzeitig anzusteuern, beispielsweise um bei festgelegter Gesamtfläche des Werkzeugs auch Fehleranteile mit relativ hoher Ortsfrequenz angreifen zu können. Dieser Fall ist in Figur 4 dargestellt. Das dort gezeigte Werkzeug (16) besitzt 45 Aktuatoren, die in drei Reihen zu je 15 Einzelementen (17a) angeordnet sich auf der Rückseite der bewegten Membran abstützen.

Auch ist es nicht erforderlich, daß das Werkzeug bzw. die zu bearbeitende Fläche bei ihrer Rotation über einen geschlossenen Kreis bewegt werden. Insbesondere für die Bearbeitung von Werkstücken, die sich als Segmente oder Teilabschnitte eines Vollspiegels darstellen, ist eher eine an den Rändern des Werkstücks umkehrende, d.h. eine oszillierende Rotationsbewegung vorzusehen, wobei sich selbstverständlich auch der zeitliche Verlauf des für die Steuerung der Druckverteilung dienenden Signals umkehrt.

Wenn es sich bei den vorstehend angesprochenen Segmenten um solche handelt, die wie das in Figur 5 dargestellte Teilstück (21) des Vollspiegels (20) entweder rechteckförmig begrenzt sind, oder deren Abstand zum Kreismittelpunkt relativ groß ist, dann ist es zweckmäßig, anstelle der Rotationsbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug eine Linearbewegung vorzusehen.

Dieser Fall wird nachstehend anhand der Figuren 6 und 7 erläutert. Hier ist das zu läppende Werkstück (21) auf einen bezüglich der Achse (x) längsgeführten Schlitten (22) aufgelegt. Dieser Schlitten (22) wird durch die beiden auf Gewinde-

spindeln arbeitenden Antriebe (23a) und (23b) in eine vor- und zurückgehende Bewegung versetzt, wobei die momentane Position des Schlittens vom Geber (24) eines mit dem Schlitten (21) verbundenen Maßstabs (34) festgestellt wird.

Auf dem Werkstück (21) liegt das Bearbeitungswerkzeug in Form einer streifenförmigen Membran (25) auf, die durch die beiden Antriebe (26a) und (26b) in eine oszillierende Bewegung senkrecht zur Bewegungsrichtung des Schlittens (22) versetzt wird. Wie in dem Ausführungsbeispiel nach Figur 1/2 stützen sich auch hier auf der Rückseite der Membran (25) dicht aneinander gesetzt mehrere Aktuatoren (27) mit einstellbarer Kraft ab. Die Aktuatoren sind beispielsweise in 3 Reihen zu je 12 Stück angeordnet.

Die Druckkraft P_i der einzelnen Aktuatoren (27) wird von einer Steuereinheit (28) abhängig von der Position des Schlittens (22) in x-Richtung gesteuert, die der Geber (24) des Längenmeßsystems an die Steuereinheit (28) meldet. Hierzu sind jeder Position Werte für den Druck P_i zugeordnet, die vorher aus den Fehlerverläufen der Spiegeloberfläche in x-Richtung ermittelt und im Speicher eines an die Steuereinheit (28) angeschlossenen Rechners abgelegt wurden.

In den vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispielen sind die Aktuatoren zur Erzeugung der Druckkraft jeweils feststehend, während das eigentliche Bearbeitungswerkzeug, die streifenförmige Membran (5 bzw. 25), zwischen den Aktuatoren und der Werkstückoberfläche oszilliert.

Aus konstruktiven Gründen kann es jedoch zweckmäßig sein, wenn wie in Figur 8 dargestellt die Membran (35) und die Aktuatoren (37) zu einem gemeinsam in Längsrichtung (y) des Streifens bewegbaren Werkzeug (39) zusammengefaßt sind. In diesem Falle ist der zeitliche Verlauf der Kraft der Aktuatoren jedoch nicht nur entsprechend dem Fehlerverlauf ΔZ der Werkstückoberfläche (31) in einer Koordinate (linear oder rotatorisch) zu steuern, sondern es ist auch der Fehlerverlauf in Bewegungsrichtung (y) des Werkzeugs zu berücksichtigen, d.h. der Druck der Aktuatoren muß zu jedem Zeitpunkt abhängig von der Position jedes einzelnen Aktuators bezüglich beider Koordinaten auf der Werkstückoberfläche gesteuert werden. Nur so ist zu erreichen, daß die entsprechend den Abweichungen des Werkstücks (31) von der Sollform berechnete und in Figur 9 beispielhaft skizzierte Druckverteilung $P(y)$ während des Bearbeitungsvorganges auch bezüglich dieser Bewegungsrichtung relativ zum Werkstück feststeht.

Der Druckfunktion $P(x)$ oder $P(\alpha)$, mit der die Aktuatoren (37) entsprechend der Bewegung des Werkstücks (31) in der einen Richtung wie anhand von Figur 1/2 und 5/6 beschrieben beaufschlagt

werden, ist also eine zweite Druckfunktion entsprechend der Variation der Bearbeitungsfehler innerhalb der Amplitude (A) der Bewegung des jeweiligen Aktuators in y-Richtung zu überlagern.

Erfolgt diese letztgenannte oszillierende Bewegung des Werkstücks (39) genügend schnell im Vergleich zu der des Werkstücks (31), so ergibt sich beispielsweise für den Druck des Aktuators (37a) in Figur 8 der in Figur 10 skizzierte zeitliche Verlauf.

Ansprüche

1. Verfahren zum Läppen bzw. Polieren optischer Flächen, wobei die zu bearbeitende Fläche vorher vermessen wird und der Läpp-bzw. Poliervorgang entsprechend den Abweichungen der Istform der Fläche von einer vorbestimmten Sollform gesteuert wird, indem

-auf die Fläche ein Läpp-bzw. Polierwerkzeug aufgelegt wird, welches als flexible Membran ausgebildet ist,

-auf der der Fläche abgewandten Seite der Membran eine Druckverteilung erzeugt wird, die den Abweichungen der Fläche von ihrer Sollform entspricht,

-die Membran durch im wesentlichen tangentialen Kräfte über der zu bearbeitenden Fläche in einer ersten Richtung bewegt wird und

-das Werkzeug und die zu bearbeitende Fläche sich relativ zueinander in einer zweiten Richtung bewegen, dadurch gekennzeichnet, daß

-das Werkzeug (5) streifenförmig ausgebildet ist und nur einen Teilbereich des Werkstückes (1) bedeckt

-und der zeitliche Verlauf der Druckverteilung abhängig von der momentanen Relativposition zwischen Werkstück (1,21) und Werkzeug (5,25) gesteuert wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß gleichzeitig mit mehreren streifenförmigen Werkzeugen (5,15) an der zu läppenden bzw. zu polierenden Fläche (1) gearbeitet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Bewegung in der zweiten Richtung eine Rotationsbewegung ist und der zeitliche Verlauf der Druckverteilung abhängig vom Drehwinkel ϕ zwischen Werkstück (1) und Werkzeug (5) gesteuert wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Bewegung in der zweiten Richtung eine Linearbewegung ist und der zeitliche Verlauf der Druckverteilung abhängig vom Weg (x) des Werkstücks (21) bzw. des Werkzeuges (25) gesteuert wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-4, dadurch gekennzeichnet, daß die Druckverteilung durch Belastungselemente (37) erzeugt wird, die sich mit der Membran (35) in der ersten Richtung bewegen und die Druckverteilung auf dem Werkstück in dieser Bewegungsrichtung dadurch konstant gehalten wird, daß die Kräfte der einzelnen Belastungselemente (37a) zusätzlich abhängig von ihrer momentanen Position bezüglich dieser ersten Bewegungsrichtung (y) gesteuert werden.

6. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1-5, mit

-einem als elastische Membran ausgebildeten Werkzeug, das den Läpp-bzw. Poliergrund trägt,

-einer Vielzahl von Belastungselementen, die sich mit individuell steuerbarer Kraft auf der Rückseite der Membran abstützen und diese gegen die Fläche drücken, sowie

-einem Antrieb, der die Membran unter den Belastungselementen im wesentlichen tangential in einer ersten Richtung (y) bewegt, dadurch gekennzeichnet, daß

-die Membran (5,15,25,35) Streifenform besitzt und nur einen Teil der zu bearbeitenden Fläche des Werkstückes (1,11,21,31) bedeckt,

-ein Antrieb (3,23) zur Herbeiführung einer Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück in einer zweiten Richtung (x) mit angeschlossenem Positionsmesssystem (4,24) vorgesehen ist,

-sowie eine mit dem Positionsmesssystem und den Belastungseinrichtungen (7,27) verbundene Steuerung (8,28).

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Bewegung in der zweiten Richtung eine Rotationsbewegung ist und das Positionsmesssystem ein Winkelencoder (4) ist.

8. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Bewegung in der zweiten Richtung eine Linearbewegung ist und das Positionsmesssystem ein Maßstab (24/34) ist.

Fig.1

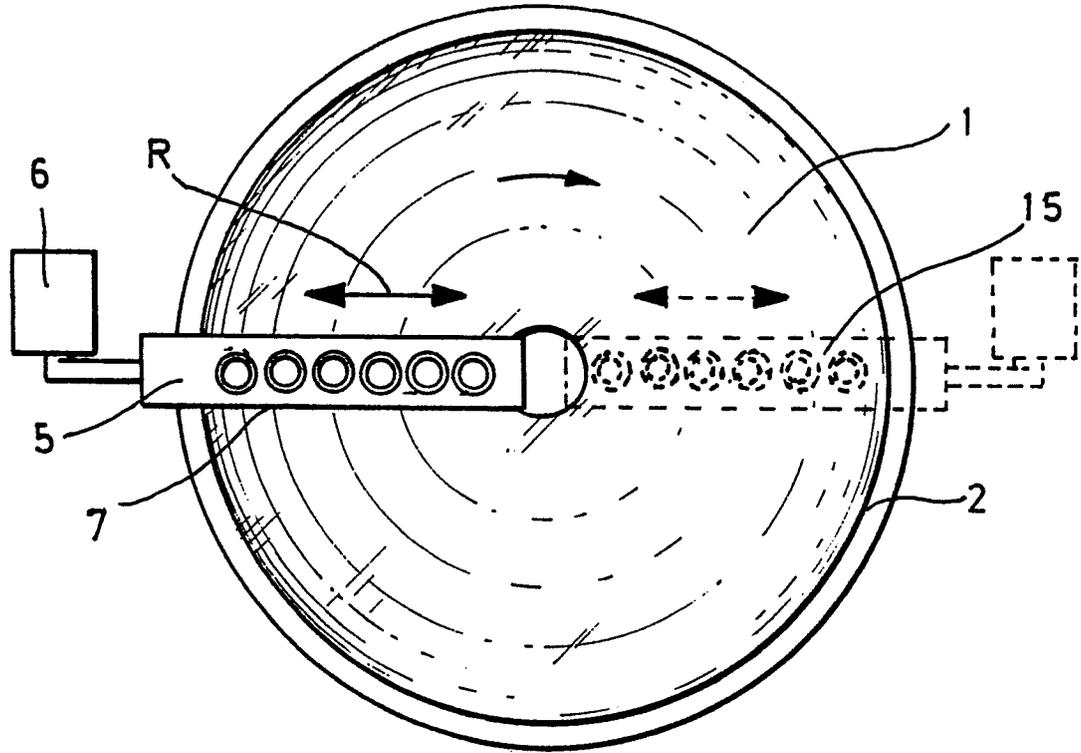


Fig.2

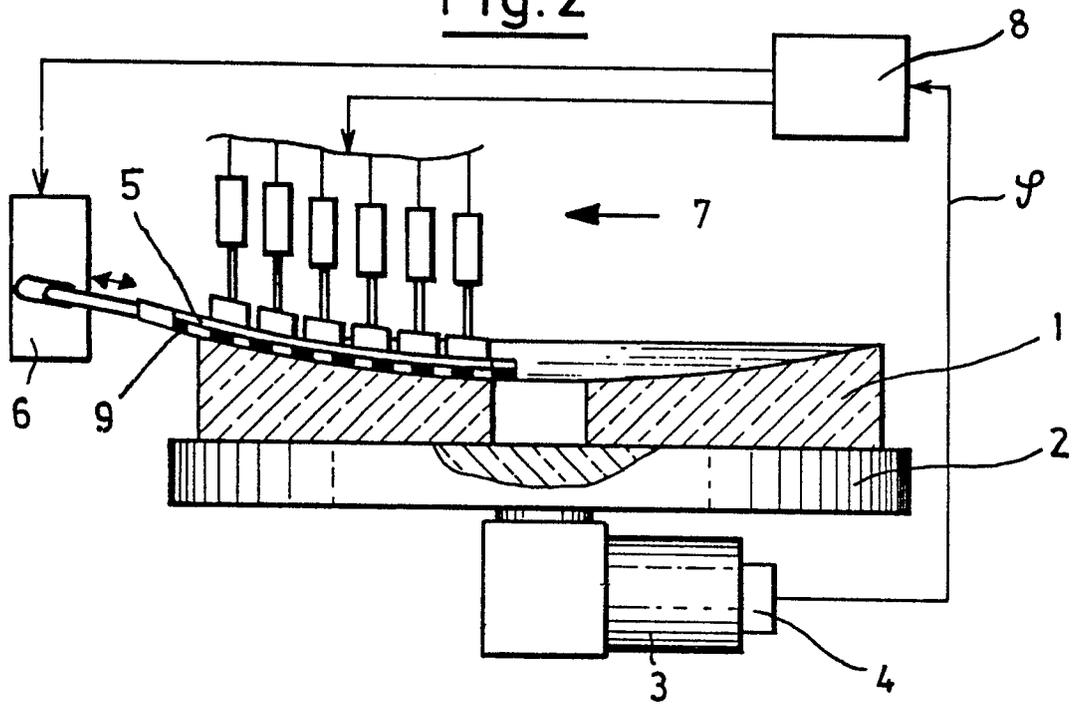


Fig. 3

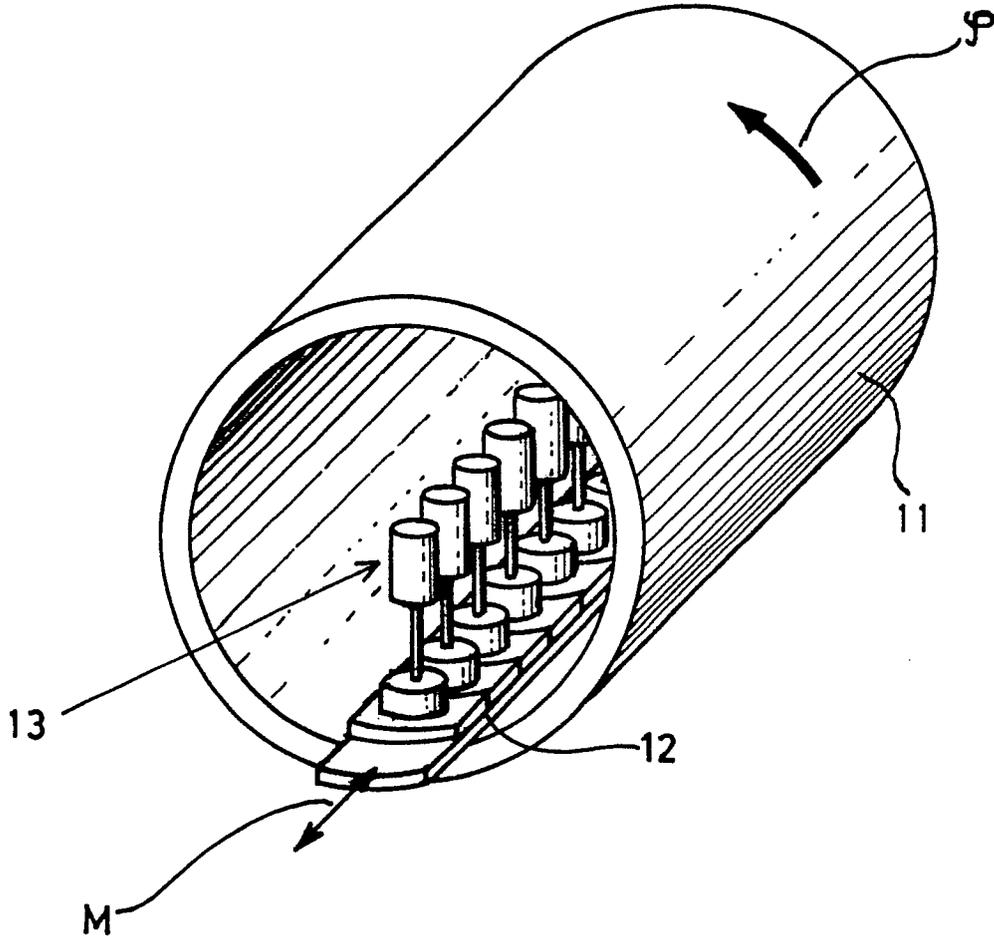


Fig. 4

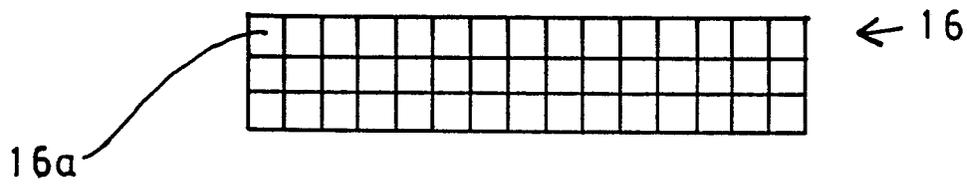


Fig. 5

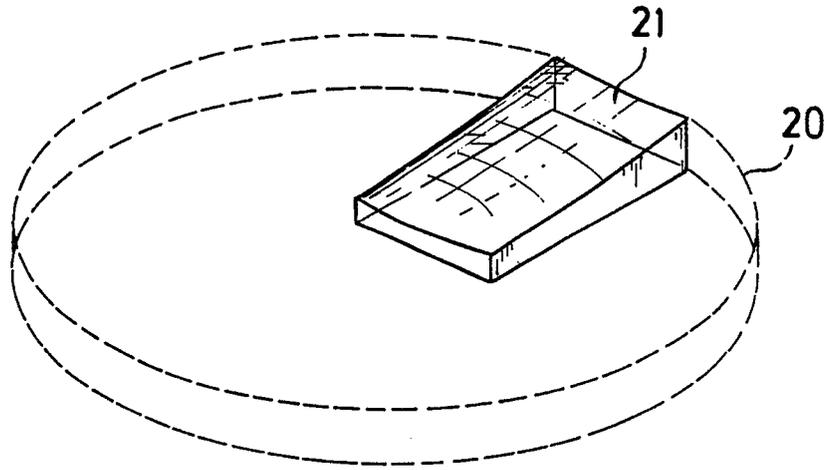


Fig. 6

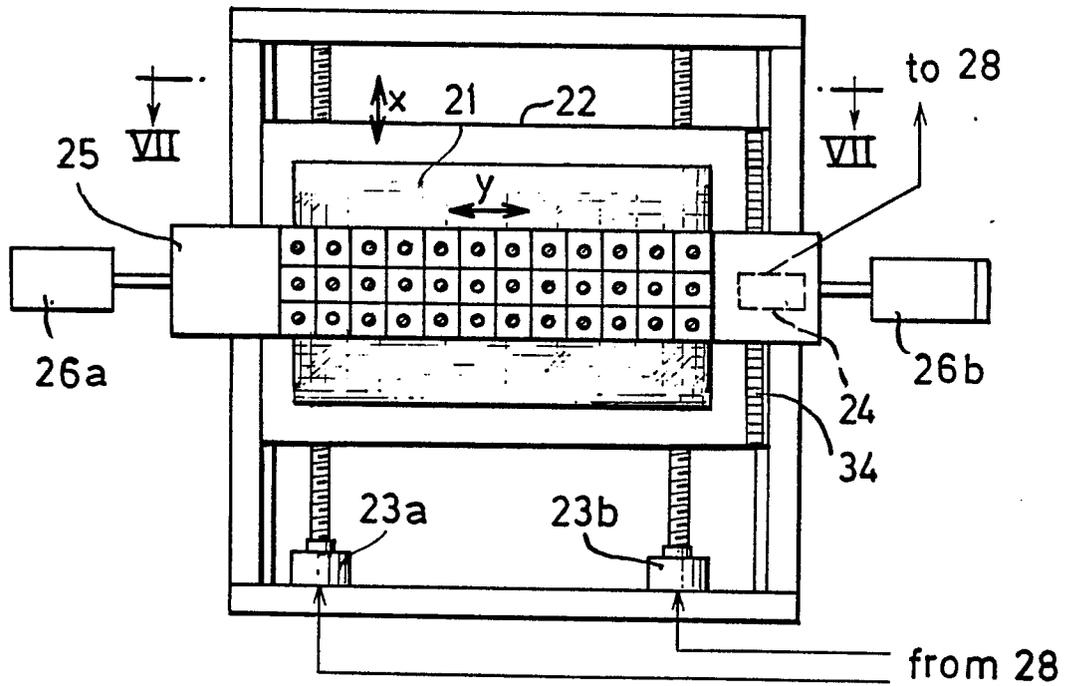


Fig. 7

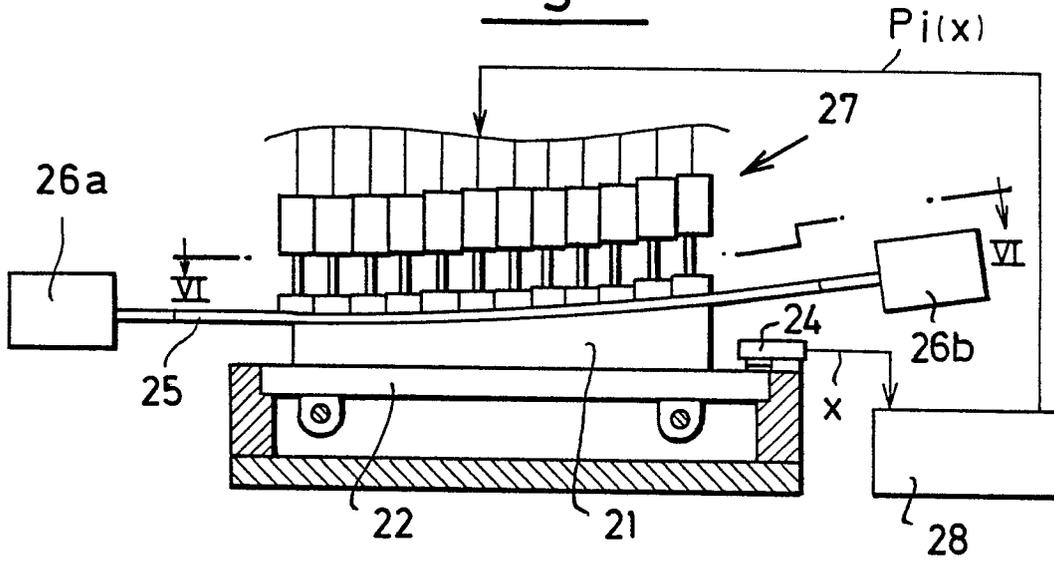


Fig. 8

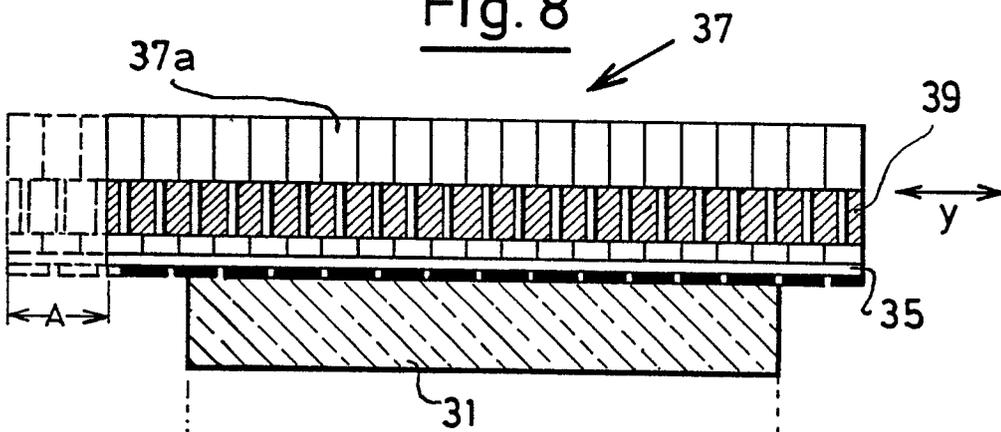


Fig. 9

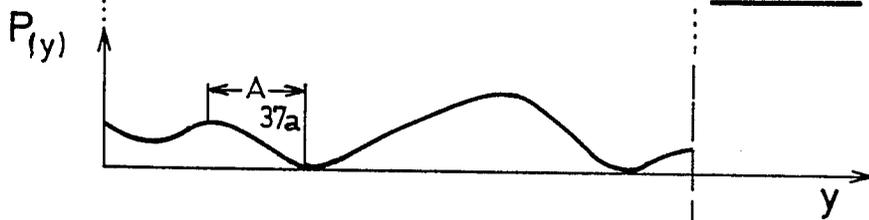


Fig. 10

