

PCTWELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales BüroINTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

(51) Internationale Patentklassifikation⁶ : B23B		A2	(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 97/13603
			(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 17. April 1997 (17.04.97)
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE96/01947		(81) Bestimmungsstaaten: DE, JP, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).	
(22) Internationales Anmeldedatum: 11. Oktober 1996 (11.10.96)		Veröffentlicht <i>Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.</i>	
(30) Prioritätsdaten: 195 38 274.9 14. Oktober 1995 (14.10.95) DE			
(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. [DE/DE]; Leonrodstrasse 68, D-80636 München (DE). CARL ZEISS [DE/DE]; D-73446 Oberkochen (DE).			
(72) Erfinder; und			
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): HOF, Albrecht [DE/DE]; Rohrwangerstrasse 12, D-73430 Aalen (DE). MEHLKOPP, Klaus [DE/DE]; Luisenstrasse 144a, D-52477 Alsdorf (DE).			
(74) Anwalt: KÖNIG, Werner, E.; Habsburgerallee 23-25, D-52064 Aachen (DE).			

(54) Title: PROCESS FOR MANUFACTURING OPTICAL SURFACES AND SHAPING MACHINE FOR CARRYING OUT THIS PROCESS**(54) Bezeichnung:** VERFAHREN ZUM HERSTELLEN VON OPTISCHEN OBERFLÄCHEN SOWIE BEARBEITUNGSMASCHINE
ZUR DURCHFÜHRUNG DES VERFAHRENS**(57) Abstract**

Optical surfaces with complex geometry are produced today by grinding, polishing or casting in a prefabricated negative mould. This has the disadvantage that all geometric moulds required for production must be kept on stock. The object of the invention is to disclose a process that allows these optical surfaces and moulding shells to be directly manufactured in a single step according to individual data. For that purpose, a blank for machining an optical surface or a blank of a moulding shell for manufacturing optical surfaces is held at the workpiece carrier of a spindle axis (Z axis) of a shaping machine and is directly turned into its final form by means of a turning tool which can move relative to the blank (in the X axis). The turning tool can move transversely to the direction of displacement of the tool. During each rotation of the spindle, the turning tool is incrementally adjusted towards or away from the blank depending on the characteristic surface data, which may be predetermined or calculated on-line. This process is particularly suitable for directly manufacturing plastic lenses and moulding shells for producing plastic lenses, for example progressive lenses.

(57) Zusammenfassung

Optische Oberflächen mit komplizierter Geometrie werden heute durch Schleifen und nachfolgendes Polieren bzw. durch Gießen in einer vorher gefertigten Negativform hergestellt. Nachteilig ist, daß für die Fertigung alle benötigten geometrischen Formen vorrätig gehalten werden müssen. Es soll ein Verfahren angegeben werden, mit dem diese optischen Oberflächen und Formschalen nach individueller Datenvorgabe in einem einzigen Prozeßschritt direkt gefertigt werden können. Entsprechend dem vorgeschlagenen Verfahren wird ein Rohling für eine optische Oberflächenbearbeitung oder ein Rohling für eine Formschale zur Herstellung optischer Oberflächen an der Werkstückaufnahme einer Spindelachse (Z-Achse) einer Bearbeitungsmaschine gehalten und mittels eines Drehwerkzeuges, welches eine Relativbewegung zum Rohling ausüben kann (X-Achse), direkt zu seiner endgültigen Form gedreht, wobei das Drehwerkzeug quer zur Werkzeugbewegungsrichtung bewegbar ist und während jeder Spindelumdrehung inkrementale Zustellungen des Drehwerkzeuges in Richtung auf den Rohling bzw. von diesem weg entsprechend vorgegebener oder online-berechneter Daten der Oberfläche erfolgen. Das Verfahren eignet sich insbesondere zur direkten Fertigung von Kunststofflinsen und von Formschalen für die Herstellung von Kunststofflinsen, z.B. Gleitsichtlinsen.

LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AM	Armenien	GB	Vereinigtes Königreich	MX	Mexiko
AT	Österreich	GE	Georgien	NE	Niger
AU	Australien	GN	Guinea	NL	Niederlande
BB	Barbados	GR	Griechenland	NO	Norwegen
BE	Belgien	HU	Ungarn	NZ	Neuseeland
BF	Burkina Faso	IE	Irland	PL	Polen
BG	Bulgarien	IT	Italien	PT	Portugal
BJ	Benin	JP	Japan	RO	Rumänien
BR	Brasilien	KE	Kenya	RU	Russische Föderation
BY	Belarus	KG	Kirgisistan	SD	Sudan
CA	Kanada	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	SE	Schweden
CF	Zentrale Afrikanische Republik	KR	Republik Korea	SG	Singapur
CG	Kongo	KZ	Kasachstan	SI	Slowenien
CH	Schweiz	LJ	Liechtenstein	SK	Slowakei
CI	Côte d'Ivoire	LK	Sri Lanka	SN	Senegal
CM	Kamerun	LR	Liberia	SZ	Swasiland
CN	China	LK	Litauen	TD	Tschad
CS	Tschechoslowakei	LU	Luxemburg	TG	Togo
CZ	Tschechische Republik	LV	Lettland	TJ	Tadschikistan
DE	Deutschland	MC	Monaco	TT	Trinidad und Tobago
DK	Dänemark	MD	Republik Moldau	UA	Ukraine
EE	Estland	MG	Madagaskar	UG	Uganda
ES	Spanien	ML	Mali	US	Vereinigte Staaten von Amerika
FI	Finnland	MN	Mongolei	UZ	Usbekistan
FR	Frankreich	MR	Mauritanien	VN	Vietnam
GA	Gabon	MW	Malawi		

**VERFAHREN ZUM HERSTELLEN VON OPTISCHEN OBERFLÄCHEN SO-
WIE BEARBEITUNGSMASCHINE ZUR DURCHFÜHRUNG DES
VERFAHRENS**

5

Beschreibung

- 10 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen von optischen Oberflächen, insbesondere von ophtalmischen Linsen und Formschalen zur Herstellung von ophtalmischen Linsen (insbesondere asphärischen Kunststofflinsen), sowie eine Bearbeitungsmaschine zur Durchführung des Verfahrens.
- 15 Optische Oberflächen und insbesondere ophtalmische Linsen mit komplizierter Geometrie, z.B. Gleitsichtgläser, können heute aus Silikatglas oder aus Kunststoff hergestellt werden. Als Silikatlinsen werden sie durch Schleifen und nachfolgendes Polieren hergestellt. Kunststofflinsen werden durch Gießen in einer vorher gefertigten Negativform gefertigt. Die Negativformen, sogenannte Formschalen, werden aus 20 Silikatglas mit der gleichen Methode wie bei der Fertigung von ophtalmischen Linsen, also ebenfalls durch Schleifen und Polieren, hergestellt.

Nachteilig bei dieser Vorgehensweise ist, daß insbesondere für die Fertigung von ophtalmischen Linsen alle benötigten geometrischen Formen vorrätig gehalten werden 25 müssen.

Nachteilig ist außerdem, daß sich bei den mehrstufigen Fertigungsprozessen die Toleranzen der einzelnen Schritte ungünstig auf das Endprodukt auswirken können. Korrekturstrategien sind sehr aufwendig und kompliziert. Mit jedem zusätzlichen Prozeßschritt wird die Situation unübersichtlicher, da Fehler meistens erst am Schluß des Prozesses feststellbar sind und so die Ursache möglicherweise nur schwer zu lokalisieren ist.

Durch die US-PS 5 320 006 ist es bereits bekannt, die Grundform von Kunststofflinsen auf einer geeigneten Drehmaschine zu drehen und sie nachfolgend auf einer Poliermaschine fertig zu bearbeiten, wobei die Krümmung des Polierwerkzeuges gemessen und als Regelgröße für das Drehwerkzeug verwendet wird, um einen möglichst ge-

nau an das Polierwerkzeug angepaßten Rohling zu erzeugen und so das Polieren auf ein Minimum zu beschränken. Abgesehen davon, daß immer noch ein aufwendiger Poliervorgang verbleibt, sind mit dieser Methode nur sphärische, allenfalls torisch geformte Brillenlinsen herstellbar. Gleitsichtlinsen weisen komplizierte asphärische 5 Formen auf und können auf diese Weise nicht hergestellt werden.

- Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren anzugeben, mit dem auch geometrisch kompliziert geformte optische Oberflächen und insbesondere opthalmische Linsen und Formschalen zur Herstellung von opthalmischen Linsen nach individueller 10 Datenvorgabe in einem einzigen Prozeßschritt direkt gefertigt werden können, wobei keine oder zumindest nur geringe Nacharbeiten zur Fertigstellung der optischen Oberflächen und insbesondere der opthalmischen Linsen und Formschalen zur Herstellung von opthalmischen Linsen vonnöten sein sollen.
- 15 Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß ein Rohling für eine optische Oberflächenbearbeitung oder ein Rohling einer Formschale an der Werkstückaufnahme einer Spindelachse (Z-Achse) einer Bearbeitungsmaschine gehalten und mittels eines Drehwerkzeuges, welches eine Relativbewegung zum Rohling ausüben kann (X-Achse), direkt zu seiner endgültigen Form gedreht wird, wobei das Drehwerkzeug 20 quer zur Werkzeuggbewegungsrichtung bewegbar ist und während jeder Spindelumdrehung inkrementale Zustellungen des Drehwerkzeuges in Richtung auf den Rohling bzw. von diesem weg entsprechend vorgegebener oder online-berechneter Daten der Oberfläche erfolgen.
- 25 Durch das erfindungsgemäße Verfahren kann ein Werkzeugstichel so schnell verfahren werden, daß die in Umfangsrichtung auftretenden, durch die asphärische Form bedingten Höhenänderungen aus einem Kunststoffrohling herausgearbeitet werden können. Der Stichel kann einen sehr kleinen Radius haben, wodurch der Eingriff nahezu punktförmig wird. Der Stichel kann aber auch einen Radius von mehreren Millimetern aufweisen. Er kann mit einem monokristallinen Diamanten bestückt sein.

30 Die erzeugte Oberfläche ist in der Regel bereits gebrauchsfertig. Gegebenenfalls bedarf es zum Herstellen der Gebrauchsfähigkeit noch einer geringen Nacharbeit durch Polieren. Die Form wird dabei vollständig durch den Drehprozeß bestimmt und durch 35 das Polieren nicht mehr verändert.

Alternativ zum Polieren kann die Oberfläche auch z.B. durch Tauchen in Lack gebrauchsfähig gemacht werden.

- Neben ophthalmischen Linsen können mit dem Verfahren auch Formschalen zur Herstellung von ophthalmischen Linsen, z.B. aus Metall oder Keramik, hergestellt werden. Polieren ist auch hier nur in sehr geringem Umfang erforderlich. Des weiteren können optische Oberflächen, z.B. andere Linsen oder Spiegel mit komplizierter, nicht-rotationssymmetrischer Form, hergestellt werden.
- 10 Erfindungsgemäß kann in bevorzugter Weise vorgesehen werden, daß die bei der Zulassung entstehende Reaktionskraft durch einen statischen oder dynamischen Massenausgleich ausgeglichen wird.

Für den Einbau der Linsen oder Spiegel, aber insbesondere der Brillenlinsen in die Brillenfassung, müssen Marken auf der Oberfläche angebracht sein, die eine schnelle Orientierung erlauben. Diese Marken, die bisher zusätzlich mit speziellen Diamant-Werkzeugen oder mit hochenergetischer Laserstrahlung erzeugen werden müssen, können während des Bearbeitungsprozesses nunmehr direkt miterzeugt werden, da es möglich ist, ein punktförmig arbeitendes Werkzeug zu verwenden. Alle Reproduzierbarkeitsprobleme, wie sie bei jedem Maschinenwechsel auftreten, entfallen dadurch. Darüber hinaus können beliebige Zeichen frei programmierbar erzeugt werden. Damit kann jede Linse individuell gekennzeichnet werden.

In analoger Weise betrifft das die Herstellung von Formschalen z.B. zur Herstellung von ophthalmischen Linsen. Auch in den Formschalen können alle Markierungen zur späteren Orientierung der Linse und weitere Zeichen angebracht werden.

Erfindungsgemäß kann in bevorzugter Weise vorgesehen werden, daß das Drehwerkzeug relativ zur Spindel eine Schwenkbewegung ausführt. Dabei kann der Rohling beim Drehen zusätzlich um einen auf der Z-Achse liegenden Mittelpunkt geschwenkt werden. Alternativ dazu kann das Drehwerkzeug beim Drehen auch zusätzlich um einen auf der Z-Achse liegenden Mittelpunkt geschwenkt werden.

Da die Durchbiegung des Linsenmaterials des Materials (Glas oder Kunststoff für Linsen oder Spiegel) keine schnellen Werkzeugbewegungen erfordert, kann man diese Bewegung entweder durch eine langsame Z-Bewegung oder durch eine Schwenkbewe-

gung ersetzen, der der schnelle Z-Antrieb überlagert ist. Die schnelle Z-Bewegung muß dann zur Herstellung von z.B. Gleitsichtlinsen nurmehr einen Hub von ca. 1 mm haben. Diese Vorgehensweise hat insbesondere den Vorteil, daß der zur Formgebung benutzte Bereich des Drehwerkzeuges kleiner wird. Ungleichmäßige Abnutzung des
5 Drehwerkzeuges hat dann kleinere Auswirkungen.

Ein Problem jedes Drehvorganges ist die Singularität in der Mitte des Werkstückes. Es kann deshalb in bevorzugter Weise vorgesehen sein, daß der Rohling in zwei geringfügig vom Drehzentrum abweichenden off-axis-Positionen gedreht wird.

10

Dabei bearbeitet man den Rohling so, daß das jeweilige Drehzentrum gerade nur durch den Prozeß in der jeweils anderen Stellung erreicht wird. Man dreht also nicht bis zur Spindelachse.

15

Bei zu großen radialen Bewegungen kann die Drehbewegung am Rand ins Leere laufen. Man kann dies vermeiden, indem man erfindungsgemäß in X-Richtung die Bahnabstände variiert. Dies erfordert dann auch für diesen Vorschub-Antrieb eine entsprechende Dynamik, die man z.B. durch Anlegen von harmonischen Schwingungen erreichen kann. Auch hierfür ist ein dynamischer Massenausgleich vorteilhaft.

20

Der dynamische Massenausgleich erfordert, daß eine zweite Bewegung einer gleich großen Masse mit entgegengesetzter Bewegungsrichtung ausgeführt werden muß. Man kann diese kollineare Bewegung benutzen, um gleichzeitig die Vorder- und die Rückseite z.B. einer Kunststofflinse oder einer zweiten ophthalmischen Linse bzw. eine zweite Formschale zur Herstellung von ophthalmischen Linsen zu bearbeiten. Je nach Flächendesign und verwendetem Rohling kann der durch gleichzeitige Bearbeitung der Vorder- und Rückseite bewirkte Massenausgleich der beiden gegenläufigen schnellen Werkzeuge ausreichen, um die durch die Beschleunigung der Drehwerkzeuge bewirkte Reaktionskraft aufzunehmen. Wird ein solcher Ausgleich nicht vollständig erreicht, ist
30 gegebenenfalls ein dritter kollinearer Massenausgleich erforderlich.

Diese Arbeitsweise hat zur Folge, daß auf der Vorder- und Rückseite des Rohlings im wesentlichen symmetrisch gearbeitet wird. Man verteilt die gewünschte optische Wirkung gleichmäßig auf beide Flächen. Dies kommt dem in der Feinoptik üblichen Gesichtspunkt gleicher optischer Wirkung beider Flächen nahe und eröffnet völlig neue
35

technische Möglichkeiten, da ophthalmische Linsen bisher auf der Rückseite sphärisch oder torisch gestaltet sind.

Zur Positionsbestimmung und Zustandserfassung von Rohling und Drehwerkzeug sind 5 entsprechende Meßsysteme für die lineare und rotatorische Bewegung erforderlich. Erfindungsgemäß ist in bevorzugter Weise vorgesehen, daß die Positionen von Drehwerkzeug und Rohling optoelektronisch abgetastet werden.

Die Position der Werkzeugbewegung in Z-Richtung sollte bevorzugt auf mindestens 10 0,0005mm genau bestimmt werden.

Meßsysteme mit mindestens 0,0005mm Auflösung und der erforderlichen Länge sind z. B. als optoelektronisch abgetastete Maßstäbe oder Laserinterferometer verfügbar. Zur Positionsbestimmung der Drehbewegung eignen sich optoelektronische Drehgeber. 15 Ebenfalls verfügbar sind Tachometer zur Bestimmung der momentanen Bewegungsgeschwindigkeiten.

Weiter kann in erfindungsgemäß bevorzugter Weise vorgesehen werden, daß alle den Systemzustand beschreibenden Größen einem digitalen Regelkreis zugeführt werden 20 und die Regelung unter Berücksichtigung der berechneten Geometrie der optischen Oberfläche, insbesondere einer ophthalmischen Linse bzw. einer Formschale zur Herstellung von ophthalmischen Linsen, erfolgt. Den Systemzustand beschreiben insbesondere die Position des Drehwerkzeugs und die der Spindel bzw. des Rohlings, die ständig gemessen und mit den zu erreichenden Daten verglichen werden. Daraus werden dann Korrekturdaten für die Zustellung des Drehwerkzeuges bestimmt. 25

Alternativ dazu können auch konventionelle analoge Regler eingesetzt werden.

Weiter kann in erfindungsgemäß bevorzugter Weise vorgesehen werden, daß die 30 Werkzeugbewegung in Z-Richtung mit mindestens einem reibungsarm gelagerten Linearmotor ausgeführt wird.

Weiter kann in erfindungsgemäß bevorzugter Weise vorgesehen werden, daß der Abstand der Spulen und Magnete sowie das Lagerspiel durch thermische Einflüsse nicht 35 verändert werden.

Weiter kann in erfindungsgemäß bevorzugter Weise vorgesehen werden, daß zur Kühlung der Spule bzw. der Spulen des oder der Linearmotoren eine Peltier-Kühlung verwendet wird.

- 5 Ebenso kann in erfindungsgemäß bevorzugter Weise vorgesehen werden, daß in der Luft- oder Flüssigkeitskühlung Peltier-Kühler verwendet werden.

Der Grundaufbau einer geeigneten Bearbeitungsmaschine wird in erfindungsgemäß bevorzugter Weise so realisiert, daß auf einem steifen Maschinenbett eine Spindel gelagert ist, an der ein Rohling für eine optische Oberflächenbehandlung, insbesondere eine opthalmischen Linse oder einer Formschale, gehalten werden kann, ein in Achsrichtung der Spindel (Z-Achse) bewegbares Drehwerkzeug gelagert ist, das Drehwerkzeug oder die Spindel auf einem Schlitten orthogonal zur Achsrichtung der Spindel (X-Achse) bewegbar ist und der Antrieb für das Drehwerkzeug in Richtung der Z-Achse durch einen Linearantrieb realisiert ist.

10 Die inkrementale Verstellung des Drehwerkzeuges wird durch einen Linearantrieb bewerkstelligt. Hierzu kann ein elektrodynamischer, hydraulischer oder pneumatischer Linearmotor verwendet werden. Der Linearmotor besteht aus einem Läufer und einem 15 Stator.

20 Für den dynamischen Massenausgleich wird in vorteilhafter Weise ein zweiter, gleich aufgebauter Linearmotor eingesetzt, der kollinear mit dem bearbeitenden Motor liegt und mechanisch mit dessen Gehäuse bzw. Stator über eine steife, kraftschlüssige Verbindung gekoppelt ist. Die Motoren werden in entgegengesetzte Richtungen angesteuert. Bei hydraulischen oder pneumatischen Antrieben kann der dynamische Massenausgleich auch über zwei entgegengesetzt laufende Kolben in einem Zylinder hergestellt werden.

25 30 Alternativ können die dynamischen Kräfte des schnellen Werkzeugantriebes in eine große Masse eingeleitet werden (statischer Massenausgleich). Dazu wird der schnelle Werkzeugantrieb direkt auf eine große Masse des Maschinenbettes gesetzt. Der X-Schlitten wird unter der Spindel angeordnet. Die große Masse muß so dimensioniert sein, daß die Reaktionsbewegung aus einer Bewegung des schnellen Werkzeugantriebes deutlich kleiner als einige Mikrometer bleibt.

Die Lagerung des Motorläufers ist zugleich die Lagerung des Werkzeuges. Als Lager können Luflager, Luflager mit unterstützenden Magnetlagern oder hydraulische Lager verwendet werden, die eine reibungsarme Bewegung in Z-Richtung erlauben, Querkräfte aus dem Bearbeitungsprozeß aber aufzunehmen in der Lage sind.

5

Die Antriebskräfte werden bevorzugt durch einen Ein- oder Mehrphasen-Linearmotor erzeugt. Einen derartigen Linearmotor kann man mit bewegter Spule oder alternativ mit bewegtem Magneten aufbauen. Die zweite Variante hat den Vorteil, daß die in der Spule anfallende Verlustleistung leichter abgeführt werden kann.

10

Der besondere Vorteil eines derartigen Werkzeugantriebs liegt auch darin, daß durch die Maschinenelemente Lager und Linearmotor der Hub in z-Richtung nicht begrenzt wird. Man kann Hübe in z-Richtung von einigen 10mm realisieren, wobei die Motorcharakteristik über den gesamten Verstellbereich konstant bleibt. Dies ist insbesondere für die Regelung des Motors von Vorteil.

Es kann entweder direkt eine Wasserkühlung oder bevorzugt eine Peltier-Kühlung mit anschließender Wasserkühlung auf der heißen Seite benutzt werden. Mit der Peltier-Kühlung ist die Spulentemperatur auf einen konstanten Temperaturwert, z. B. auf 20 0,1K genau, regelbar, so daß die Luftspalte auch bei unterschiedlichen Belastungszuständen klein und konstant gehalten werden können.

In der oben bereits angedeuteten Weise kann die Werkzeugbewegung in der X-Achse durch eine Schwenkbewegung ersetzt sein, der der schnelle Z-Antrieb überlagert ist.

25 Die Schwenkachse kann dabei der Spindel oder dem Werkzeugantrieb unterlagert werden.

Alternativ können auch bei dieser Anordnung die dynamischen Kräfte des schnellen Werkzeugantriebes in eine große Masse, z.B. in das Maschinenbett, eingeleitet werden. Dazu muß zunächst der Drehtisch in den passenden Radius zum Werkzeug gebracht und anschließend die Spindel auf dem Drehtisch in den gleichen Radius gestellt werden.

30 Um den Rohling, wie oben ebenfalls angedeutet, in zwei off-axis-Positionen bearbeiten zu können, kann die Spindel in radialer Richtung verschiebbar angeordnet sein. Zum Beispiel könnte der Werkzeughalter nacheinander mit Magnetkraft in zwei um-

schaltbare Positionen gebracht werden. Anstelle einer linearen Bewegung kann hier auch eine rotatorische Bewegung mit langem Schwenkradius vorgesehen sein. Der zusätzliche Hub in Z-Richtung ist unerheblich, weil die off-axis-Verschiebung nur sehr gering ist.

5

Die Bewegung des zweiten Linearmotors, der den dynamischen Massenausgleich bewirken soll, kann dazu ausgenutzt werden, die Rückseite einer optischen Oberfläche, insbesondere einer ophthalmischen Linse, und/oder gegebenenfalls eine zweite optische Oberfläche, insbesondere eine zweite ophthalmische Linse bzw. eine zweite Formschale 10 zur Herstellung von ophthalmischen Linsen, mit den gleichen optischen Daten zu bearbeiten. Dabei werden die Spindel koaxial zum Rohling und zu beiden Seiten des Rohlings je ein Linearantrieb gelagert. Der zweite Linearantrieb weist ein zusätzliches Drehwerkzeug und ein Meßsystem zur Positionsbestimmung dieses Drehwerkzeuges auf und der Schlitten für die Bewegung des Rohlings in der X-Achse ist unter der 15 Spindel gelagert und trägt diese. Die Kopplung der Antriebe erfolgt über eine steife Grundplatte des Maschinenbettes oder besser durch einen Gehäusekäfig, der die Kräfte symmetrisch aufnimmt.

Erfindungsgemäß kann zusätzlich vorgesehen sein, daß in diesem Fall ein weiterer 20 dynamischer Massenausgleich dadurch bewirkt ist, daß kollinear zu beiden Linearantrieben ein dritter Linearantrieb angeordnet ist, dessen Gehäuse bzw. Stator mechanisch mit den Gehäusen bzw. Statoren der beiden anderen Linearantriebe über das Maschinenbett gekoppelt ist und der entgegengesetzt zur Kraftrichtung der aus der Bewegung des ersten und zweiten Linearantriebes resultierenden Kraft angesteuert ist.

25

Neben der Aufnahme der durch die Werkzeugzustellung bewirkten Reaktionskräfte hat diese Variante den weiteren Vorteil, daß auch die Prozeßkräfte am Werkstück weitgehend symmetriert werden.

30 Das Verfahren soll nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert werden. In den zugehörigen Zeichnungen zeigen

Fig. 1 den prinzipiellen Aufbau einer Bearbeitungsmaschine zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens mit linearen Achsen,

35

Fig. 2 eine zweite Variante für eine Bearbeitungsmaschine,

Fig. 3 die Prinzipdarstellung eines geeigneten elektrodynamischen Linearantriebes für das Drehwerkzeug,

5 Fig. 4 einen Linearantrieb für das Drehwerkzeug mit einem dynamischen Massenausgleich,

Fig. 5 die Prinzipdarstellung eines Linearantriebes für das Drehwerkzeug mit Hilfe eines hydraulischen oder pneumatischen Linearmotors,

10

Fig. 6 die Prinzipdarstellung für eine Bearbeitungsmaschine mit einer Schwenkachse,

Fig. 7 die Prinzipdarstellung für das Drehen eines Rohlings in zwei verschiedenen Positionen,

15

Fig. 8 das Prinzip der Werkstückverstellung in zwei verschiedenen Positionen,

Fig. 9 die dynamische Verstellung z.B. des Drehwerkzeuges in X-Richtung beim Drehen in zwei off-axis-Positionen,

20

Fig. 10 eine weitere Variante für den Aufbau einer Bearbeitungsmaschine mit gleichzeitiger Bearbeitung von Vorder- und Rückseite einer ophtalmischen Linse und

Fig. 11 das Blockschaltbild für einen Regleraufbau.

25

Fig. 1 zeigt eine Bearbeitungsmaschine zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Die Bearbeitungsmaschine ist auf einem steifen Maschinenbett 1 aufgebaut. Die Spindel 2 ist auf einem in der Z-Achse bewegbaren Schlitten 3 gelagert. Die Spindel 2 nimmt den hier nicht gezeigten Rohling in einer Werkstückaufnahme 4 auf. Der Schlitten 3 wird zur Voreinstellung in eine geeignete Position gebracht und dann für die Dauer der Bearbeitung festgeklemmt.

Auf einem weiteren, in X-Richtung bewegbaren Schlitten 5 befindet sich der Werkzeugantrieb 6, der durch einen Linearmotor realisiert ist. Der Läufer 7 des Werkzeugantriebes 6 trägt das Drehwerkzeug 8.

35

Fig. 2 zeigt eine Variante der Bearbeitungsmaschine, bei der nicht der Werkzeugantrieb 6, sondern die Spindel 2 auf einem in X-Richtung verfahrbaren Schlitten 5 gelagert ist.

5 Einen möglichen Werkzeugantrieb stellt der elektrodynamische Linearmotor entsprechend Fig. 3 dar. Der Linearmotor besteht aus einem Läufer 7, der mit Permanentmagneten 9 ausgerüstet ist und dem Statorspulensystem 10. Zum Erreichen einer reibungsarmen Bewegung ist der Läufer 7 horizontal und vertikal in Luftlagern 11 gelagert. Zur Positionsbestimmung trägt der Läufer 7 ein Meßsystem 12.

10

Fig. 4 zeigt ein Beispiel für den dynamischen Massenausgleich des Systems. Dazu ist ein kollinear zum Werkzeugantrieb 6 liegender Linearantrieb 13 vorgesehen, der allein dem Ausgleich der bei der schnellen Zustellbewegung entstehenden Reaktionskraft dient. Die Statoren beider Linearantriebe sind durch das Maschinenbett 1 kraftschlüssig miteinander gekoppelt. Die Linearantriebe werden beim Bearbeitungsvorgang 15 gleichzeitig in entgegengesetzte Richtungen angesteuert.

Durch den dynamischen Massenausgleich werden Reaktionskräfte, verursacht durch die nötige schnelle Bewegung des Drehwerkzeuges 8, ausgeglichen und so jegliche 20 unbeabsichtigte Bewegung des Drehwerkzeuges vermieden, wodurch die hohe Oberflächengüte des bearbeiteten Brillenglases und die Genauigkeit seiner optischen Geometrie ermöglicht wird.

25 Eine analoge Einrichtung mit hydraulisch oder mit pneumatisch arbeitenden Antrieben zeigt Fig. 5. Die Läufer sind dabei durch entgegengesetzte laufende Kolben 14 realisiert.

Alternativ dazu kann der Massenausgleich durch Krafteinleitung in eine große Masse 30 bewirkt werden. Dazu wird das Maschinenbett 1, wie es in Fig. 2 gezeigt ist, als große Masse ausgeführt. Die Masse wird so dimensioniert, daß ihre resultierende Bewegung eine Amplitude von weniger als 0,005 mm aufweist.

35 Fig. 6 zeigt einen Maschinenaufbau, bei dem statt einer Schlittenbewegung in X-Richtung eine Schwenkbewegung des Rohlings vorgesehen ist. Die Spindel 2 ist zu diesem Zweck auf einem Drehtisch 15 gelagert. Der Schwenkmittelpunkt 16 befindet sich auf der Z-Achse. Die Schwenkbewegung muß mit einem passenden Radius r aus-

geführt werden, der so gewählt werden kann, daß die zusätzliche, der Schwenkbewegung überlagerte Bewegung des Drehwerkzeuges 8 in Richtung der Z-Achse ein Minimum wird.

- 5 Die Beherrschung der Mittensingularität zeigt Fig. 7. Der Rohling wird in zwei geringfügig voneinander abweichenden außermittigen Positionen gedreht, wobei nicht bis zur Spindelachse gedreht wird. In der Darstellung sind die außermittigen Positionen schematisch übertrieben gezeigt. Die in Fig. 7 unterbrochene Linie wird nicht ausgeführt, der jeweils nicht bearbeitete Bereich wird dann von der anderen Position überdeckt.

Die Werkstückaufnahme 4 der Spindel 2 wird zu diesem Zweck geringfügig schwenkbar aufgeführt. Mittels magnetischer Kraft, bewirkt durch schaltbare Elektromagneten 17, kann, wie in Fig. 8 gezeigt ist, die Verschiebung der Werkstückaufnahme 4 in zwei verschiedene Positionen nach oben und unten durch Verdrehen um einen Drehpunkt 18 erreicht werden.

Um in diesem Falle die Drehbewegung am Rand des Rohlings nicht ins Leere laufen zu lassen, ist gemäß Fig. 9 vorgesehen, die Zustellbewegung in X-Richtung zu variieren.

Fig. 10 zeigt eine Variante einer Bearbeitungsmaschine, bei der der erfindungsgemäße dynamische Massenausgleich ausgenutzt wird, um gleichzeitig die zweite Seite des Rohlings zu bearbeiten. Die Spindel 2 ist in diesem Fall auf einem Schlitten 5 gelagert. Die Werkstückaufnahme 4 ist so ausgebildet, daß der Rohling von beiden Seiten bearbeitet werden kann. Auf beiden Seiten der Spindel 2 sind Werkzeugantriebe 6, 13 vorgesehen, die entgegengesetzt gerichtet arbeiten. So kann die gewünschte optische Wirkung gleichermaßen auf beide Seiten der ophthalmischen Linse verteilt werden.

- 30 Fig. 11 zeigt schließlich ein Blockschaltbild eines Regelkreises zur Steuerung und Regelung der Bewegungen der Spindel 2 und des Drehwerkzeuges 8. Es wird mit einem digitalen Regler z.B. einem Signalprozessor gearbeitet, der eine optimale Anpassung an die Regelstrecke erlaubt. Struktur und Parameteroptimierung können als Funktion der Werkstückgeometrie erfolgen. Alle den Systemzustand beschreibenden Größen (mechanisches System, Tachos, Wegmeßsysteme) werden dem digitalen Regler zugeführt. Die langsame Bewegung in X-Richtung kann ebenfalls von dem Regler bedient

werden. Diese Regelstrecke ist in Fig. 11 nicht ausgeführt. Unter Berücksichtigung des Sollwertes werden die Leistungsverstärker für die Motoren angesteuert. Die erforderliche Dynamik der Verstärker sollte bei 100dB liegen. Zur Modulation von feinen Strukturen ist eine entsprechende Bandbreite vorzusehen. Die Solldaten für die Bewegungen können vor der Bearbeitung erzeugt und in einem Speicher abgelegt werden. Vorzugsweise werden die Solldaten aber mit der die Fläche beschreibenden Funktion $Z(r,\phi)$ online berechnet.

Unter einer ophtalmischen Linse in dieser Beschreibung sind Brillenlinsen, Kontaktlinsen und intraokulare Linsen zu verstehen. Optische Oberflächen sind optisch wirksame Oberflächen von Linsen, Spiegeln oder sonstigen optischen Bauteilen, welche sich durch ihr Verhalten bei Transmission oder Reflexion elektromagnetischer Strahlung auszeichnen (insbesondere im infraroten, sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich).

Ansprüche

1. Verfahren zum Herstellen von optischen Oberflächen, insbesondere von
5 optischen Linsen und Formschalen zur Herstellung von optischen Linsen
(insbesondere asphärischen Kunststofflinsen) **dadurch gekennzeichnet**, daß ein Rohling für eine optische Oberflächenbearbeitung oder ein Rohling einer Formschale zur Herstellung von optischen Oberflächen an der Werkstückaufnahme einer Spindelachse (Z-Achse) einer Bearbeitungsmaschine gehalten und mittels eines Drehwerkzeuges,
10 welches eine Relativbewegung zum Rohling ausüben kann (X-Achse), direkt zu seiner endgültigen Form gedreht wird, wobei das Drehwerkzeug quer zur Werkzeugbewegungsrichtung bewegbar ist und während jeder Spindelumdrehung inkrementale Zustellungen des Drehwerkzeuges in Richtung auf den Rohling bzw. von diesem weg entsprechend vorgegebener oder online-berechneter Daten der Oberfläche erfolgen.
15
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß beim Drehen mittels des Drehwerkzeuges Markierungen auf der optischen Oberfläche aufgebracht werden.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß
20 das Drehwerkzeug in Achsrichtung der Spindel bewegbar ist (Z-Achse) und in orthogonaler Richtung zur Achsrichtung der Spindel eine Relativbewegung ausübt (X-Achse).
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß
25 das Drehwerkzeug relativ zur Spindel eine Schwenkbewegung ausführt.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,
30 daß der Rohling in zwei geringfügig vom Drehzentrum abweichenden off-axis-Positionen gedreht wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Zustellung der Bewegung in X-Richtung in Abhängigkeit vom aktuellen Umfangspunkt der Spindel variiert wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die bei der Zustellung entstehende Reaktionskraft durch einen statischen oder dynamischen Massenausgleich ausgeglichen wird.
- 5 8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der dynamische Massenausgleich ganz oder teilweise durch ein zweites Drehwerkzeug realisiert wird, das mittels eines eigenen Antriebes in Z-Richtung bewegbar ist und auf die zweite Seite des Rohlings oder auf einen zweiten Rohling einwirkt.
- 10 9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der fertiggedrehte Rohling durch Polieren gebrauchsfähig gemacht wird.
- 15 10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der fertiggedrehte Rohling durch Tauchen in Lack gebrauchsfähig gemacht wird.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Positionen von Drehwerkzeug und Rohling optoelektronisch abgetastet werden.
- 20 12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß alle den Systemzustand beschreibenden Größen einem digitalen Regelkreis zugeführt werden und die Regelung unter Berücksichtigung der berechneten Geometrie der optischen Oberfläche erfolgt.
- 25 13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Position des Drehwerkzeugs und der Spindel bzw. des Rohlings ständig gemessen und mit den zu erreichenden Daten verglichen werden und daraus Korrekturdaten für die Zustellung des Drehwerkzeuges bestimmt werden.
- 30 14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Werkzeuggbewegung in Z-Richtung mit mindestens einem reibungsarm gelagerten Linearmotor ausgeführt wird.

15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Position der Werkzeugbewegung in Z-Richtung auf mindestens 0,0005mm genau bestimmt wird.
- 5 16. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand der Spulen und Magnete sowie das Lagerspiel durch thermische Einflüsse nicht verändert werden.
- 10 17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß zur Kühlung der Spule bzw. der Spulen des oder der Linearmotoren eine Peltier-Kühlung verwendet wird.
18. Verfahren nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, daß in der Luft- oder Flüssigkeitskühlung Peltier-Kühler verwendet werden.
- 15 19. Bearbeitungsmaschine zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß auf einem steifen Maschinenbett (1) eine Spindel (2) gelagert ist, an der ein Rohling für eine optische Oberflächenbearbeitung oder ein Rohling einer Formschale gehalten werden kann, ein in Achsrichtung der Spindel (2) (Z-Achse) bewegbares Drehwerkzeug (8) gelagert ist, das Drehwerkzeug (8) oder die Spindel (2) auf einem Schlitten (5) orthogonal zur Achsrichtung der Spindel (8) (X-Achse) bewegbar ist und der Antrieb (6) für das Drehwerkzeug (8) in Richtung der Z-Achse durch einen Linearantrieb realisiert ist.
- 25 20. Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß die durch die Beschleunigung des Linearantriebes (6) bewirkte Reaktionskraft durch einen zweiten Linearantrieb (13), der kollinear zu dem ersten Linearantrieb (6) angeordnet ist und dessen Gehäuse bzw. Stator mechanisch mit dem Gehäuse bzw. Stator des ersten Linearantriebes (6) über das Maschinenbett (1) gekoppelt ist und der in entgegengesetzter Richtung zum ersten Linearantrieb (6) angesteuert ist, dynamisch ausgeglichen ist.
- 30 35 21. Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß die durch die Beschleunigung des Linearantriebes (6) bewirkte Reaktionskraft durch Krafteinleitung in die Masse des Maschinenbettes (1) dynamisch ausgeglichen ist.

22. Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß der Schlitten (5) für die Bewegung in der X-Achse unter der Spindel (2) gelagert ist und die Spindel (2) trägt.
- 5 23. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß der Linearantrieb (6,13) ein Hydraulikmotor ist.
24. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß der Linearantrieb (6,13) ein Pneumatikmotor ist.
- 10 25. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß der Linearantrieb (6,13) ein elektrodynamischer Linearmotor ist.
- 15 26. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 25, dadurch gekennzeichnet, daß das Drehwerkzeug (8) ein mit einem monokristallinen Diamanten be- stückter Stichel ist.
27. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 26, dadurch gekennzeichnet, daß der Läufer des Linearmotors luftgelagert ist.
- 20 28. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 26, dadurch gekennzeichnet, daß der Läufer des Linearmotors mittels Luft und unterstützenden Magnetla- gern gelagert ist.
- 25 29. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 26, dadurch gekennzeichnet, daß der Läufer des Linearmotors hydraulisch gelagert ist.
30. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 29, dadurch gekennzeichnet, daß die Spulen des Linearmotors mit einer Wasserkühlung versehen sind.
- 30 31. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 29, dadurch gekennzeichnet, daß die Spulen des Linearmotors mit einer Peltier-Kühlung und einer Was- serkühlung auf der heißen Seite der Peltier-Elemente versehen sind.

32. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 31, dadurch gekennzeichnet, daß als Meßsystem für die lineare Bewegung des Drehwerkzeuges (8) optoelektronisch abgetastete Maßstäbe dienen.
- 5 33. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 31, dadurch gekennzeichnet, daß als Meßsystem für die lineare Bewegung des Drehwerkzeuges (8) Laserinterferometer dienen.
- 10 34. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 33, dadurch gekennzeichnet, daß als Meßsystem für die rotatorische Bewegung des Rohlings ein optoelektronischer Drehgeber dient.
- 15 35. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 33, dadurch gekennzeichnet, daß als Meßsystem für die rotatorische Bewegung des Rohlings ein Tachometer dient.
- 20 36. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 35, dadurch gekennzeichnet, daß die Bewegung in Richtung der X-Achse dadurch realisiert ist, daß die Spindel (2) um einen auf der Z-Achse gelegenen Mittelpunkt (16) schwenkbar gelagert ist.
- 25 37. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 35, dadurch gekennzeichnet, daß der in der Z-Achse bewegbare und das Drehwerkzeug (8) tragende Schlitten (5) um einen auf der Z-Achse gelegenen Mittelpunkt schwenkbar gelagert ist.
- 30 38. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 37, dadurch gekennzeichnet, daß die Spindel (2) durch eine Verschiebeeinrichtung in radialer Richtung in zwei Positionen geringfügig verschiebbar gehalten ist.
- 35 39. Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß die Verschiebeeinrichtung mit zwei auf gegenüberliegenden Seiten der Spindel (2) angeordneten Magnetspulen (17) ausgerüstet ist.
40. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 39, dadurch gekennzeichnet, daß die Spindel (2) koaxial zum Rohlings gelagert ist, zu beiden Seiten des Rohlings je ein Linearantrieb (6,13) gelagert ist, der zweite Linearantrieb (13) ein zu-

sätzliches Drehwerkzeug und ein Meßsystem zur Positionsbestimmung dieses Drehwerkzeuges aufweist und der Schlitten (5) für die Bewegung des Rohlings in der X-Achse unter der Spindel (2) gelagert ist und diese trägt.

- 5 41. Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, daß ein zusätzlicher dynamischer Massenausgleich dadurch bewirkt ist, daß kollinear zu beiden Linearantrieben (6,13) ein dritter Linearantrieb angeordnet ist, dessen Gehäuse bzw. Stator mechanisch mit den Gehäusen bzw. Statoren der beiden anderen Linearantriebe (6,13) über das Maschinenbett (1) gekoppelt ist und der entgegengesetzt zur Kraftrichtung der aus der Bewegung des ersten und zweiten Lineartriebes resultierenden Kraft angesteuert ist.
- 10
- 15 42. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 19 bis 41, dadurch gekennzeichnet, daß zur Steuerung aller Antriebe und zur Verarbeitung der Positionsdaten des Rohlings und des oder der Drehwerkzeuge mindestens ein digitaler Regler eingesetzt ist.

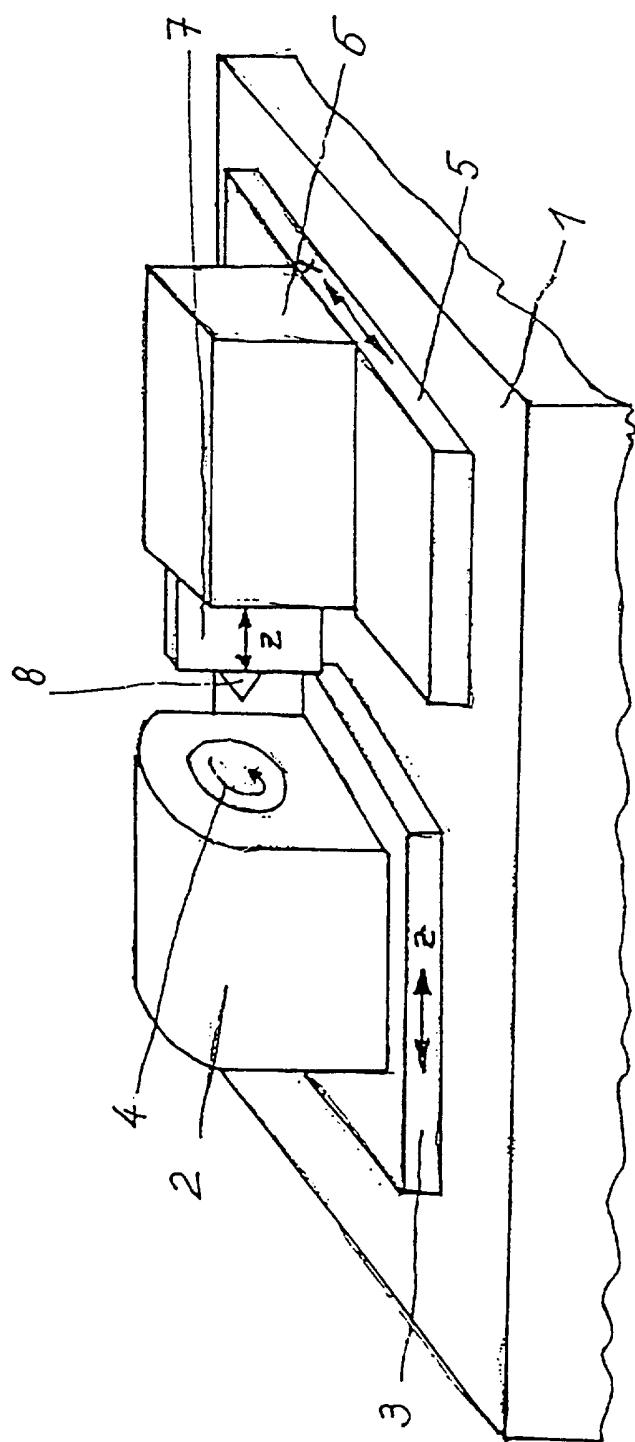


Fig. 1

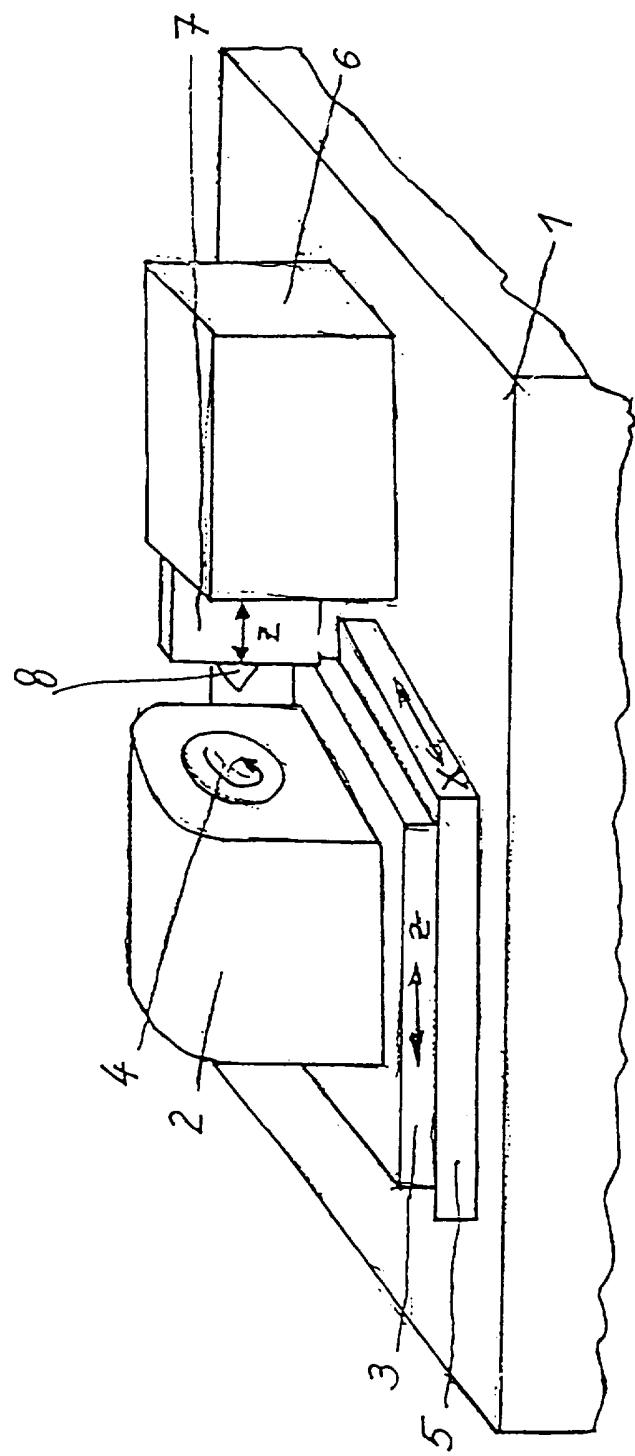
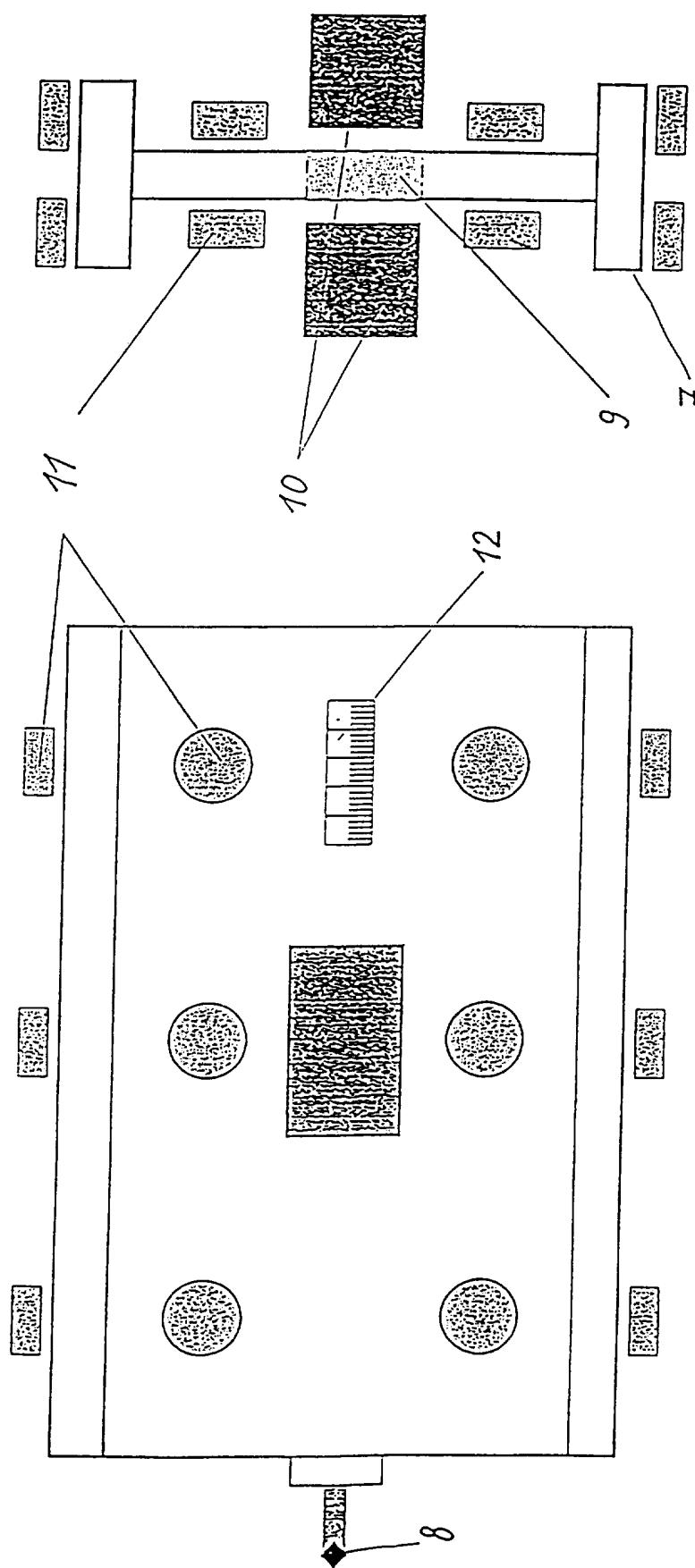


Fig. 2



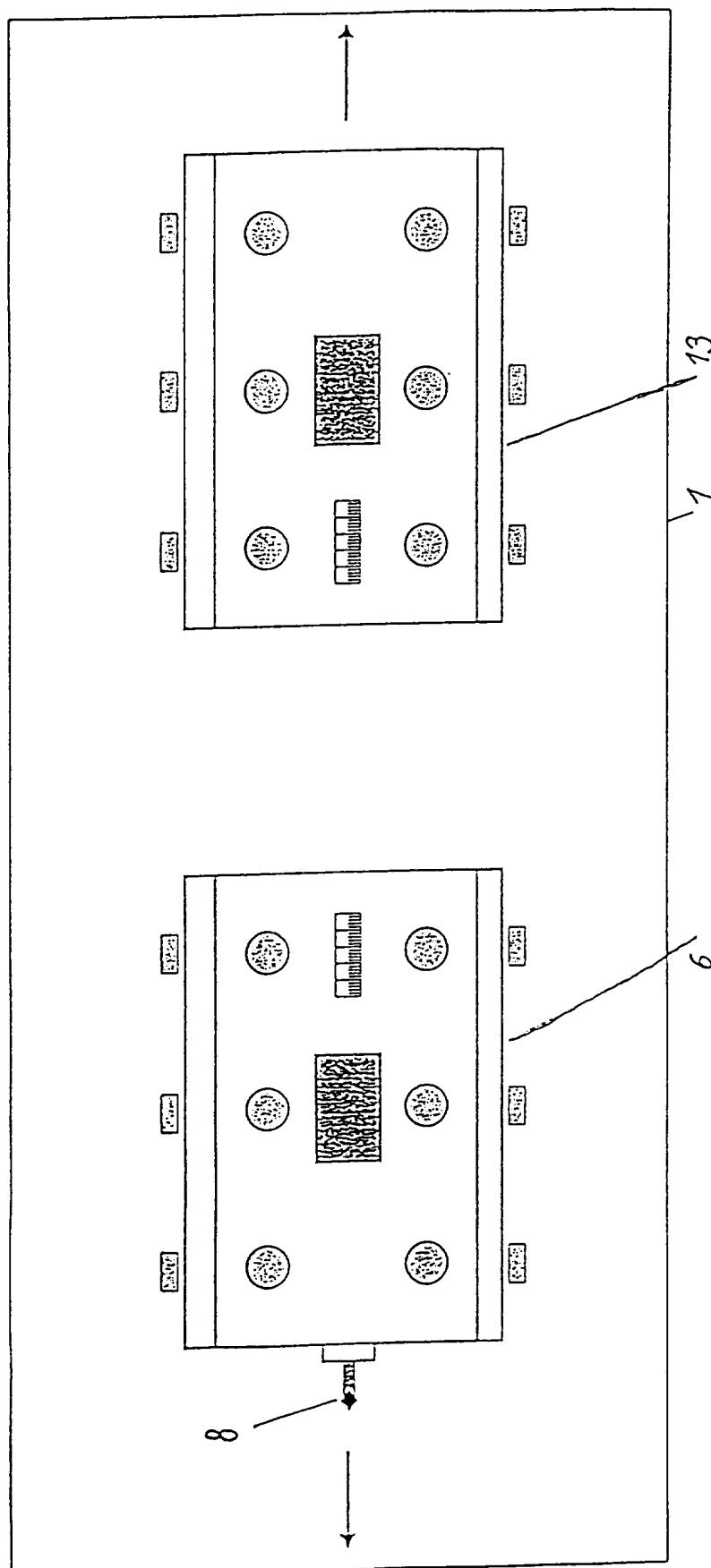


Fig. 4

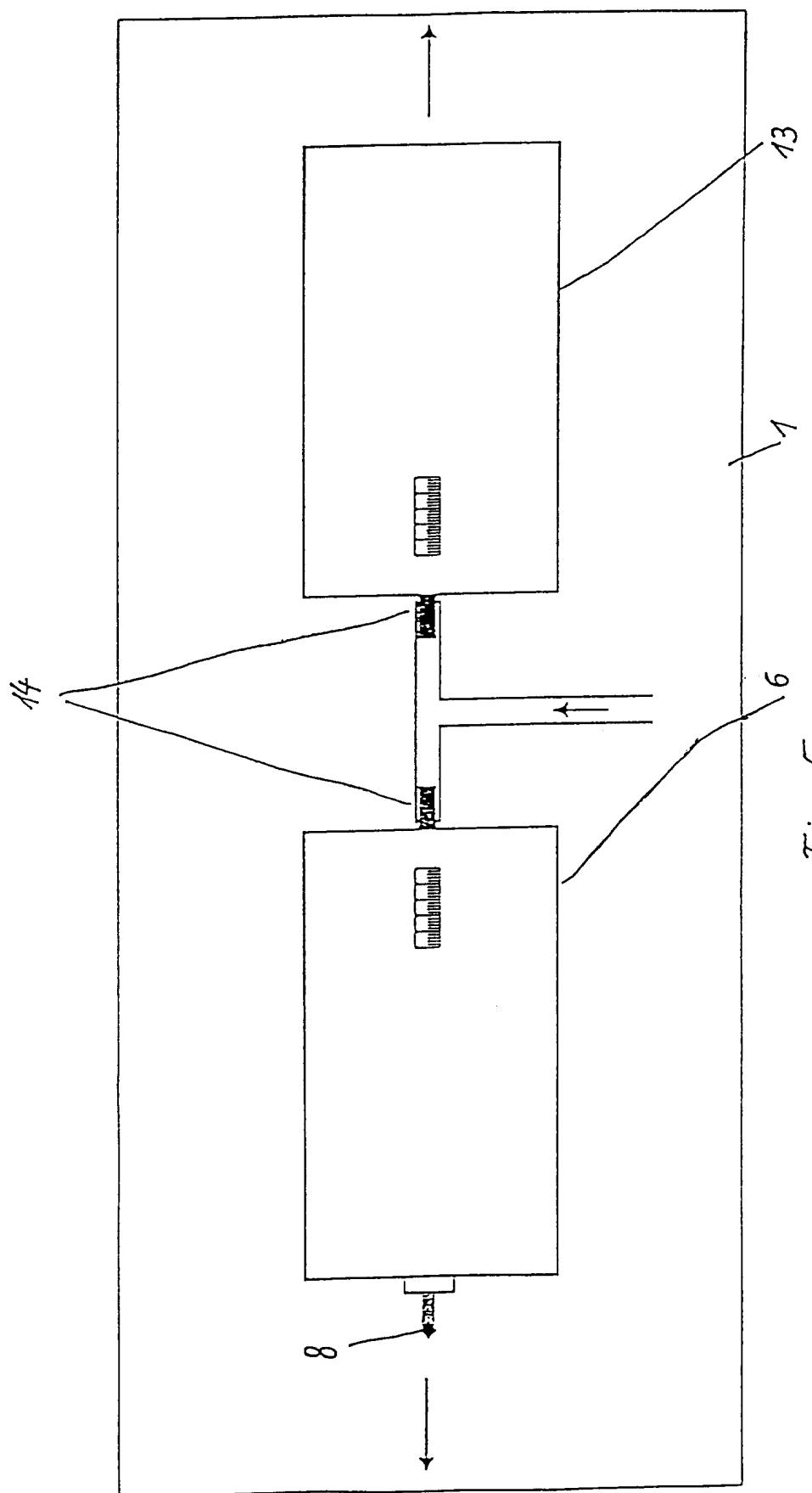


Fig. 5

6/10

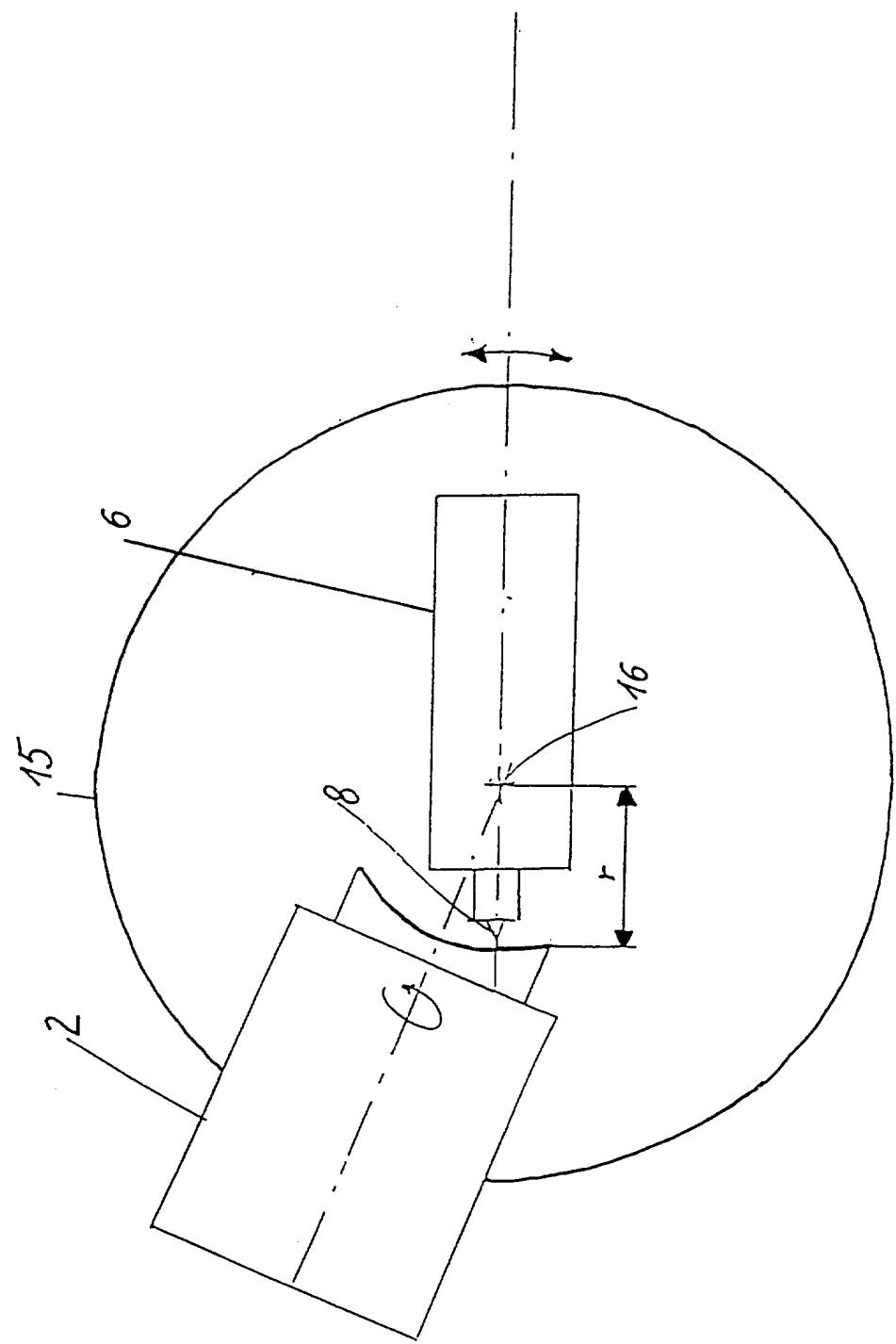


Fig 6

7/10

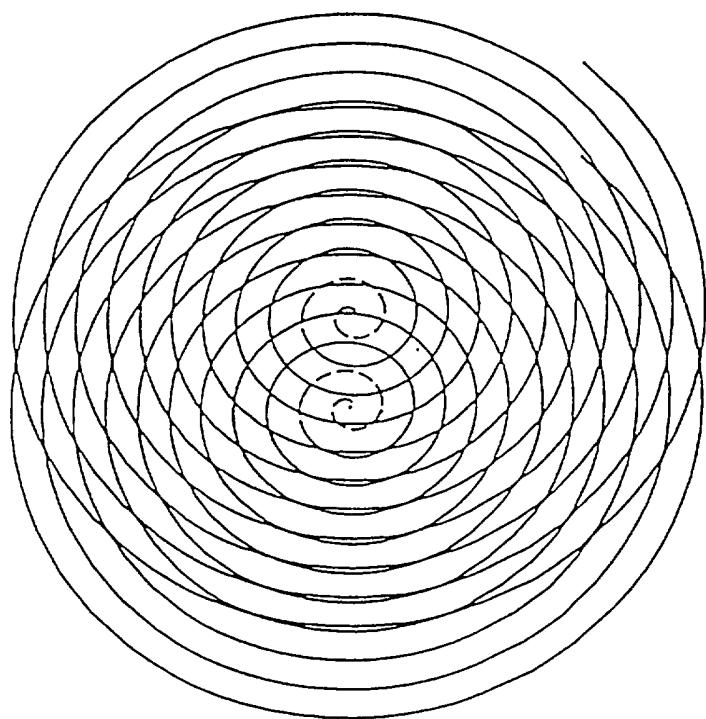


Fig. 7

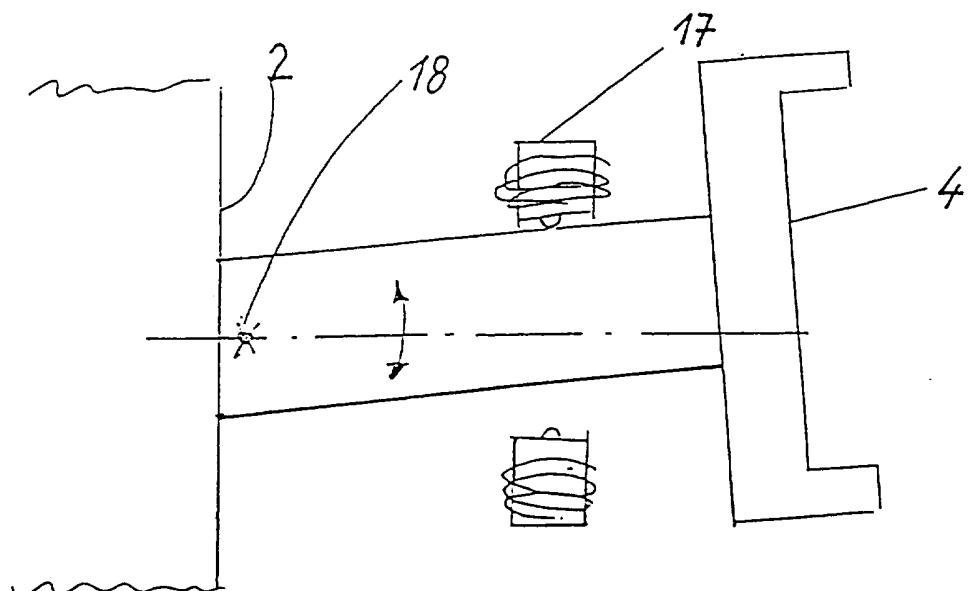


Fig. 8

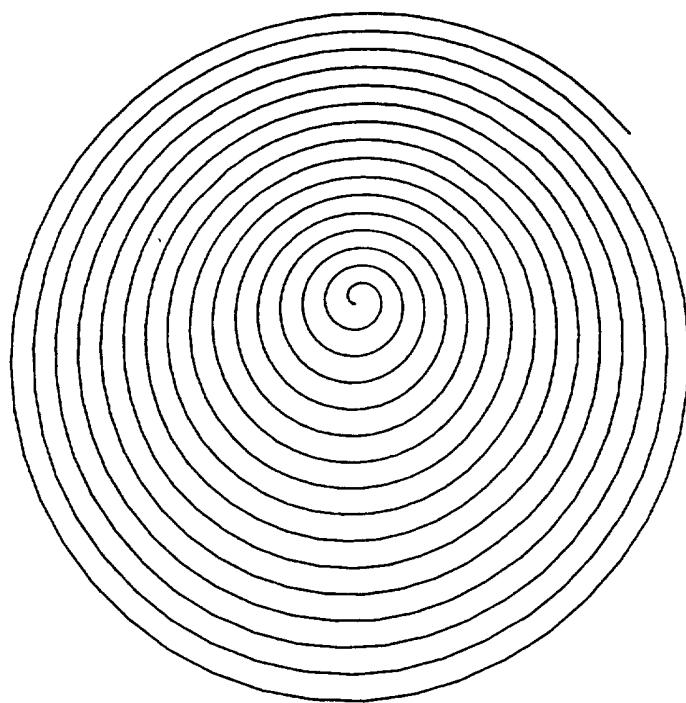


Fig. 9

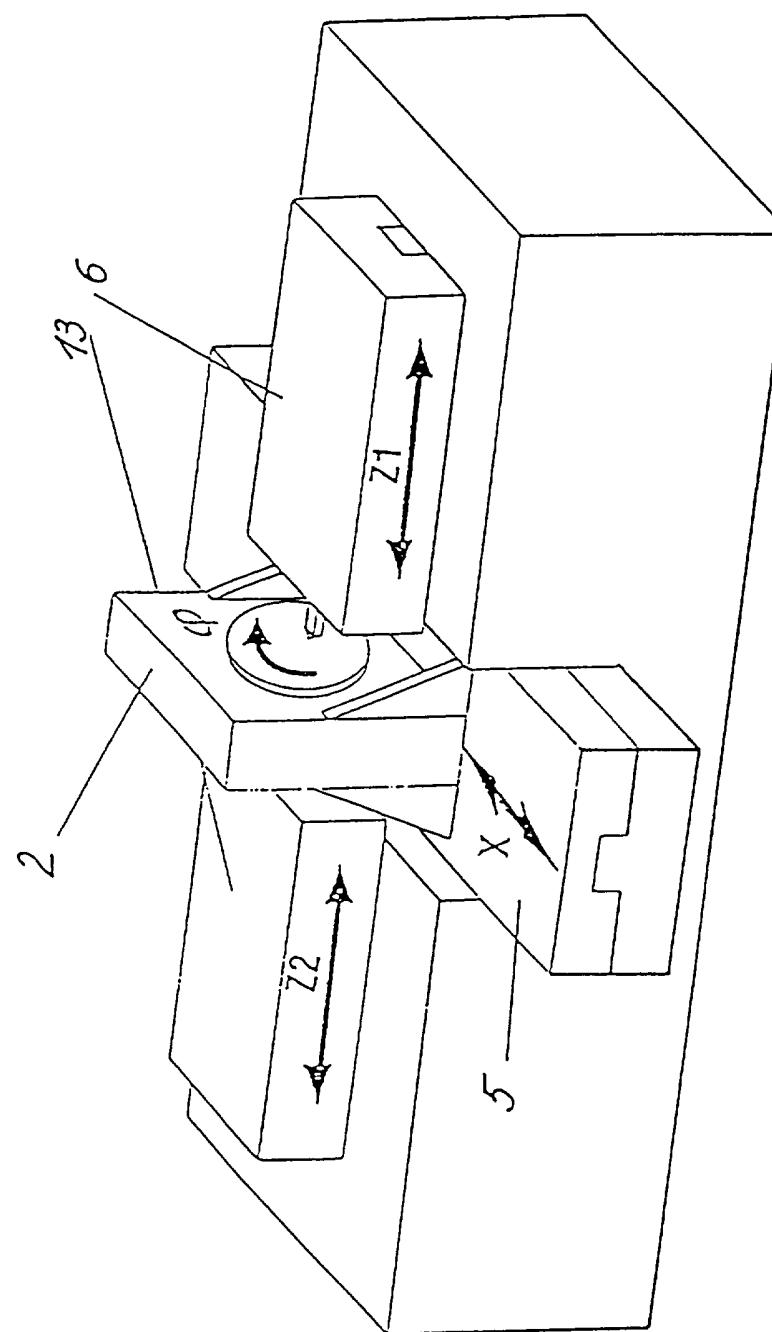


Fig. 10

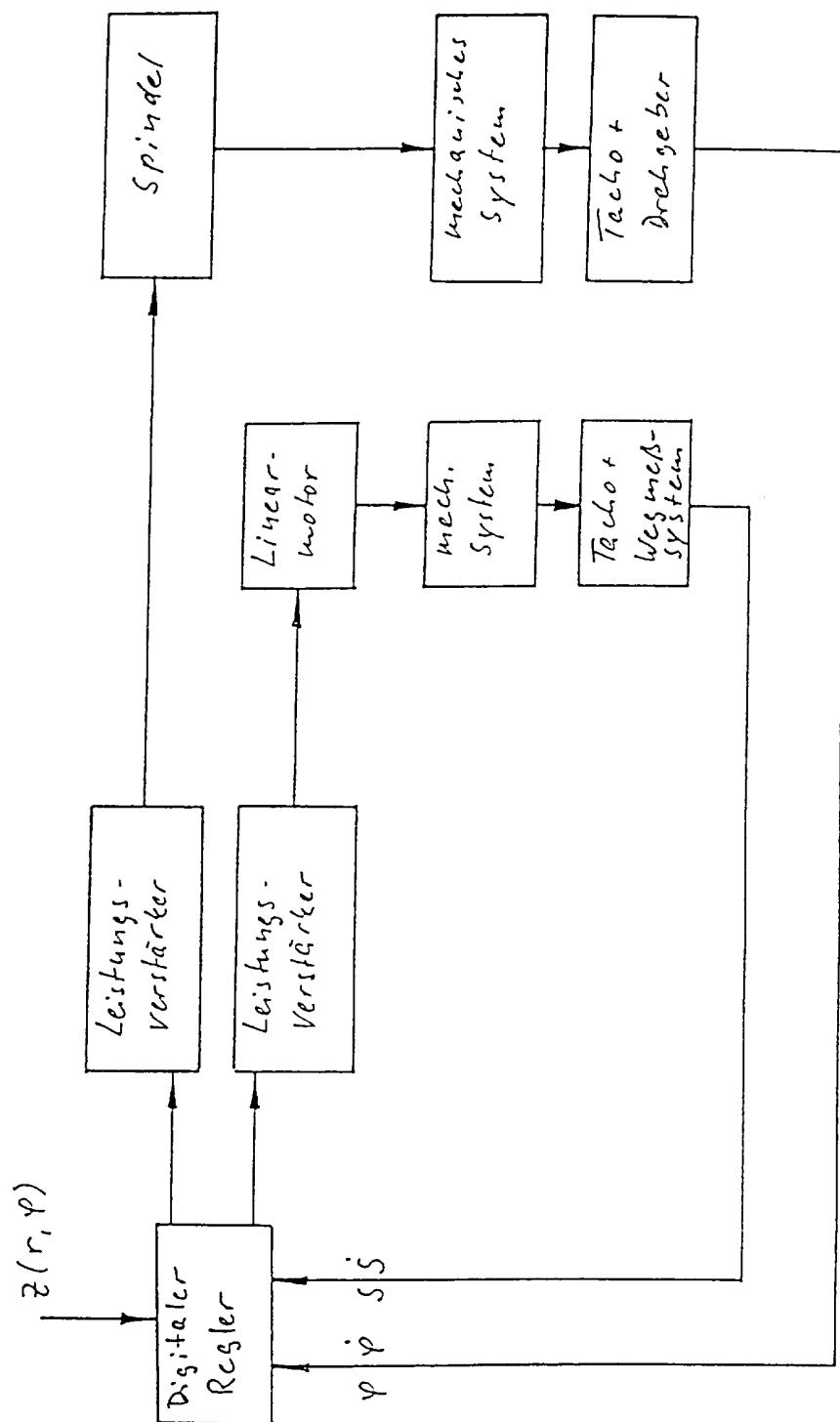


Fig. 11