



(10) **DE 10 2012 104 008 B3** 2013.11.07

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2012 104 008.7**
(22) Anmeldetag: **08.05.2012**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **07.11.2013**

(51) Int Cl.: **G01B 11/24 (2012.01)**
G01B 5/004 (2012.01)
G01B 5/20 (2012.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**JENOPTIK Industrial Metrology Germany GmbH,
78056, Villingen-Schwenningen, DE**

(74) Vertreter:
**Patentanwälte Oehmke und Kollegen, 07743,
Jena, DE**

(72) Erfinder:
**Neumann, Ernst, 07616, Bürgel, DE; Schubert,
Michael, Dr., 07745, Jena, DE**

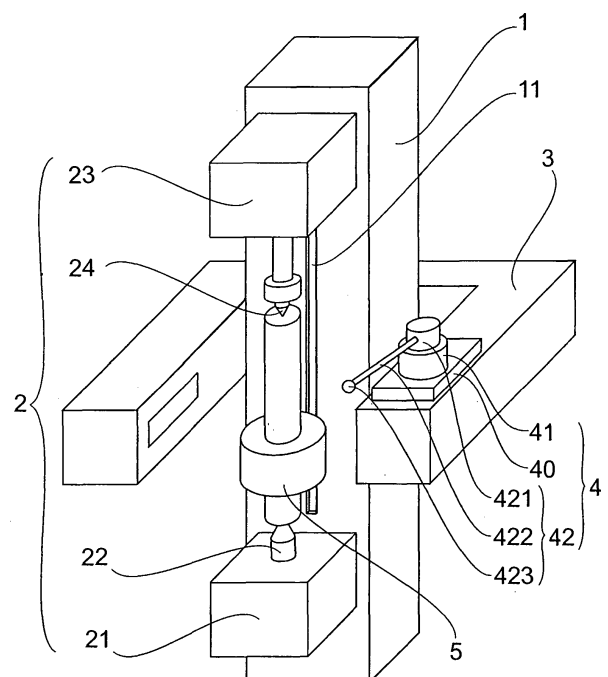
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 103 19 947 B4
DE 40 30 994 A1
DE 60 2005 001 271 T2

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zum Messen von Form-, Lage- und Dimensionsmerkmalen an Maschinenelementen**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Messen von Form-, Lage- und Dimensionsmerkmalen an rotierbaren Maschinenelementen.

Die Aufgabe der Erfindung, eine Möglichkeit zum Messen von Form-, Lage- oder Dimensionsmerkmalen eines rotierbaren Maschinenelements zu finden, die es mit geringem konstruktiven Aufwand gestattet, axial antastbare Flächen auch mit verdeckten Bereichen mit hoher Präzision zu messen, wird erfindungsgemäß gelöst. Indem zusätzlich zu einer optischen Messeinheit (3) mit Beleuchtungsmodul (31) und Kameramodul (33), die ein Schattenbild des Maschinenelements (5) aufnimmt, eine mechanische Messeinheit (4) mit einem taktilen Messtaster (42) zum Messen des Maschinenelements (5) in axialer Richtung vorhanden ist, die an der optischen Messeinheit (3) fixiert ist und eine Schwenkeinrichtung (41) zum Einschwenken des taktilen Messtasters (42) orthogonal zur Rotationsachse (6) des Maschinenelements (5) aufweist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Messen von Form-, Lage- und Dimensionsmerkmalen an rotierbaren Maschinenelementen, wie beispielsweise Motor- und Getriebewellen, Schubstangen, Ventilen, Kolben, Schrauben, Turbinenteilen etc.

[0002] Für eine genaue Messung von Wellen haben sich taktile Messverfahren etabliert, bei denen Flächen mit mechanischen Tastelementen angetastet und sehr genau gemessen werden können. Taktile Messverfahren erfordern jedoch in der Regel einen hohen Umrüstaufwand bei einem Wechsel der Messaufgabe.

[0003] Für diesen Fall bieten sich optische Messverfahren an. Diese erzeugen ein Schattenbild der Welle, an dem der äußere Umriss gemessen werden kann. Aufgrund der berührungslosen Messung kann das Maschinenelement schneller erfasst und hochgenau vermessen werden. Ein Wechsel zwischen verschiedenen Messaufgaben ist einfach und schnell möglich. Ein Nachteil der optischen Messvorrichtungen ist es, dass beispielsweise konkave Teilflächen und Hinterschneidungen, die im Schattenbild nicht sichtbar sind, nicht gemessen werden können.

[0004] Aus diesen Gründen bietet es sich an, ein optisches und ein taktiles Messverfahren in einer Vorrichtung zu kombinieren. In der Patentschrift DE 103 19 947 B4 ist eine Vorrichtung offenbart, bei der eine Erfassung von Umfangsflächen von Wellen mittels einer kombinierten Anwendung von optischen und mechanischen Messeinheiten erfolgt. Die Vorrichtung weist dafür ein Messsystem auf, bei dem zur Messung der Welle eine mechanisch-elektrische Messeinheit in einer optoelektronischen Messeinheit integriert ist und im Bedarfsfall linear ausgefahren werden kann. Dabei wird eine Welle an deren Drehachse in der Vorrichtung eingespannt. Das Messsystem verfügt über eine U-förmige optoelektronische Messeinheit, deren freistehenden Enden in einer ersten Messposition zu beiden Seiten der eingespannten Welle angeordnet sind. In den freistehenden Enden sind lichtschränkenartig Beleuchtungs- und Kameramodule eingebaut. Auf bekannte Weise wird so ein Schattenbild der Welle erzeugt und aufgenommen, an dem die Welle vermessen werden kann. Zur vollständigen Erfassung der Welle wird diese dabei um deren Rotationsachse rotiert und die optoelektronische Messeinheit parallel zur Drehachse entlang der Welle verfahren. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit kann dann noch eine zusätzliche Messung der Umfangsflächen der Welle mit der am Grunde der U-förmigen optoelektronischen Messeinheit befestigten mechanisch-elektrischen Messeinheit erfolgen. Mit der Bewegung der optoelektronischen Messeinheit wird automatisch auch die mechanisch-elektri-

sche Messeinheit an die Welle herangeführt, sodass in dieser zweiten Messposition die Umfangsflächen mechanisch angetastet werden können. Die Messwertaufnahme erfolgt dabei senkrecht zur Drehachse der Welle innerhalb der Axialebene, sodass mit dem Tastelement die Umfangsflächen mit einer hohen Genauigkeit taktil erfasst werden. Sie ermöglicht aber ausschließlich das genaue mechanische Antasten von Umfangsflächen. Flächen die im Wesentlichen orthogonal zur Drehachse der Welle angeordnet sind, lassen sich nur optisch erfassen. Da zur Einhaltung einer hohen Messgenauigkeit der Vorrichtung in der Regel mechanisch stabile, und somit massive Bauteile verwendet werden, ist davon auszugehen, dass zur Realisierung einer präzisen Verstellung des beweglich gelagerten U-förmigen Trägers zwischen den beiden Messpositionen ein erhöhter konstruktiver Aufwand erforderlich ist.

[0005] Aufgabe der Erfindung ist es, eine Möglichkeit zum Messen von Form-, Lage- oder Dimensionsmerkmalen eines rotierbaren Maschinenelements zu finden, die es mit geringem konstruktiven Aufwand und gleichzeitig hoher Präzision ermöglicht, auch Flächen mit einer hohen Messgenauigkeit zu messen, die gegenüber der Rotationsachse eine wesentliche Neigung bis hin zur orthogonalen Ausrichtung zur Rotationsachse aufweisen und verdeckte Bereiche, wie Hinterschneidungen, Steigungen, Unebenheiten usw., aufweisen können.

[0006] Erfindungsgemäß wird die Aufgabe bei einer Vorrichtung zum Messen von Form-, Lage- oder Dimensionsmerkmalen eines rotierbaren Maschinenelements, enthaltend ein mechanisch stabiles Maschinenbett mit einer entlang des Maschinenbetts angeordneten Linearführung und einem parallel dazu angeordneten Linearführungssystem, eine Werkstückhalterung zur drehbaren Aufnahme des Maschinenelements um eine Rotationsachse des Maschinenelements, wobei die Werkstückhalterung mindestens ein in der Linearführung aufgenommenes Spannmittel zur Drehung des Maschinenelements um die Rotationsachse aufweist, eine optische Messeinheit mit einem Beleuchtungsmodul und einem Kameramodul, die an dem Linearführungssystem beweglich angeordnet ist und mit der von dem drehbar zwischen Beleuchtungsmodul und gegenüberliegendem Kameramodul angeordneten Maschinenelement zweidimensionale Schattenbilder des Maschinenelements aufnehmbar sind, dadurch gelöst, dass die optische Messeinheit eine zusätzliche mechanische Messeinheit mit einem taktilen Messtaster zum Messen des Maschinenelements in axialer Richtung aufweist, wobei die mechanische Messeinheit an der optischen Messeinheit fixiert ist und eine Schwenkeinrichtung zum Einschwenken des taktilen Messtasters in einer Orthogonalebene zur Rotationsachse des Maschinenelements aufweist.

[0007] Vorteilhaft weist der taktile Messtaster einen eindimensionalen, in zwei Richtungen parallel zur Rotationsachse des Maschinenelements messenden Messwertaufnehmer mit einem Tastarm und mindestens einem Tastelement auf, wobei der Tastarm so lang ist, dass das mindestens eine Tastelement beim Einschwenken des taktilen Messtasters einen Kreisbogen beschreibt, der mindestens die Rotationsachse des Maschinenelements durchquert.

[0008] Es erweist sich als zweckmäßig, dass der taktile Messtaster einen Tastarm mit zwei in Parallelrichtung zur Rotationsachse des Maschinenelements beabstandeten Tastkugeln aufweist, sodass von umgebendem Material verdeckte Flächen axial messbar sind.

[0009] Vorzugsweise ist die Schwenkeinrichtung zur Positionierung der mindestens einen Tastkugel des taktilen Messtasters in einem auf die Rotationsachse bezogenen Radius stufenlos einstellbar.

[0010] Der taktile Messtaster ist vorteilhaft durch Bewegung der optischen Messeinheit entlang dem Linearführungssystem in jeder axialer Position des Maschinenelements positionierbar und dadurch ist eine Antastbewegung an axial antastbaren Flächen realisierbar.

[0011] Es ist vorteilhaft, wenn ein Kalibrierkörper zur Kalibrierung des taktilen Messtasters in axialer Richtung der Rotationsachse mindestens zwei zur Rotationsachse orthogonale und sich axial gegenüberliegende Referenzflächen aufweist und an der Werkstückhalterung befestigt ist, wobei von dessen Referenzflächen jeweils mindestens eine durch die optische Messeinheit und durch die mechanische Messeinheit abtastbar sind.

[0012] Der Kalibrierkörper kann ein U-Profil sein, das zwei parallele Innenflächen aufweist, die als Referenzflächen orthogonal zur Rotationsachse angeordnet sind.

[0013] In einer weiteren vorteilhaften Variante kann der Kalibrierkörper ein zur Rotationsachse konzentrisch angeordneter Rotationskörper mit einer umlaufenden Rechtecknut sein, bei dem die sich parallel gegenüberliegenden Innenflächen der Rechtecknut die orthogonal zur Rotationsachse angeordneten Referenzflächen sind, wobei der Rotationskörper konzentrisch an einem Spannmittel fixiert ist.

[0014] Vorteilhaft kann die Temperatur des Kalibrierkörpers mit Hilfe eines Temperatursensors erfasst und ein gemessenes Längennormal zwischen den Referenzflächen unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Kalibrierkörpers unter Berücksichtigung seines Wärmeausdehnungskoeffizienten auf eine Bezugstemperatur korrigiert werden.

[0015] Des Weiteren wird die Aufgabe bei einem Verfahren zum Messen von Form-, Lage und Dimensionsmerkmalen an rotierbaren Maschinenelementen, gelöst durch die Schritte:

- a) Einspannen eines Maschinenelements in mindestens einem drehbaren Spannmittel einer Werkstückhalterung zur Drehung des Maschinenelements um eine Rotationsachse;
- b) optisches Messen von Abschnitten des Maschinenelements durch Erfassen von Schattenbildern in einem orthogonal zur Rotationsachse gerichteten Strahlengang einer optischen Messeinheit unter Rotation des Maschinenelements um die Rotationsachse zum Ermitteln von Form-, Lage-, und Dimensionsmerkmalen und von Positionen axial antastbarer Flächen aus den Schattenbildern;
- c) Bewegen der optischen Messeinheit zum Positionieren einer an der optischen Messeinheit fixierten mechanischen Messeinheit mit taktilen Messtaster entsprechend den von der optischen Messeinheit optisch ermittelten Positionen von axial antastbaren Flächen des Maschinenelements;
- d) taktilen Messen axialer Abstandswerte von sich axial gegenüberliegenden Flächen des Maschinenelements durch Einschwenken des taktilen Messtasters in Orthogonalebene, die den anzutastenden Flächen jeweils gegenüber liegen, und Antasten dieser Flächen mit dem taktilen Messtaster

[0016] Vorzugsweise erfolgt das taktile Messen sich axial gegenüberliegender und durch Luft voneinander separierter Flächen derart, dass Punkte der sich axial gegenüberliegenden Flächen, welche gleiche radiale Abstände von der Rotationsachse aufweisen mit dem taktilen Messtaster abwechselnd angetastet werden und für jeden gewählten radialen Abstand einen Längenmesswert darstellen, wobei der taktile Messtaster zuvor an einem kalibrierten Längennormal mit zwei sich parallel gegenüberliegenden, orthogonal zur Rotationsachse ausgerichteten Referenzflächen kalibriert wird.

[0017] Des Weiteren ist es möglich, das taktile Messen sich axial gegenüberliegender Flächen derart durchzuführen, dass die axiale Position einer der Flächen mit der optischen Messeinheit erfasst wird und die der anderen Fläche mit dem taktilen Messtaster, wobei zuvor die optische Messeinheit und die mechanische Messeinheit zueinander kalibriert werden, indem an einer Referenzfläche ein Offset-Wert zwischen den Messpositionen der optischen Messeinheit und der mechanischen Messeinheit bestimmt wird.

[0018] Zweckmäßig ist außerdem, dass in einer oder mehreren zur Rotationsachse konzentrischen Spuren Messwerte des taktilen Messtasters aufgenommen und zur Berechnung von Formmerkmalen ver-

wendet werden, wobei das Maschinenelement um die Rotationsachse gedreht wird.

[0019] Vorzugsweise wird das kalibrierte Längennormal für wenigstens einen Kalibrierschritt mindestens vor Beginn des optischen Messens verwendet.

[0020] Nachfolgend soll die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert werden. In den zugehörigen Zeichnungen zeigen:

[0021] [Fig. 1](#) eine Darstellung des prinzipiellen Aufbaus der erfindungsgemäßen Vorrichtung in einer Gesamtansicht der Messmaschine;

[0022] [Fig. 2a](#) eine geschnittenen Vorderansicht der optischen Messeinheit kombiniert mit einer mechanischen Messeinheit in Form eines einschwenkbaren taktilen Messtasters;

[0023] [Fig. 2b](#) die kombinierte Messeinheit in einer Draufsicht mit dem taktilen Messtaster während der Einschwenkbewegung;

[0024] [Fig. 2c](#) die kombinierte Messeinheit mit eingeschwenktem taktilen Messtaster in einer Antastbewegung;

[0025] [Fig. 2d](#) die kombinierte Messeinheit mit eingeschwenktem Messtaster beim Antasten einer axial antastbaren Fläche von oben;

[0026] [Fig. 3a](#) das Antasten einer axial antastbaren Fläche mittels des taktilen Messtasters von unten;

[0027] [Fig. 3b](#) das Antasten einer axial antastbaren Fläche von unten mit einem an anderer Stelle der optischen Messeinheit befestigten taktilen Messtaster;

[0028] [Fig. 4](#) ein erstes Beispiel für das Antasten einer schwer zugänglichen axial antastbaren Fläche mit angepasstem Tastelement des taktilen Messtasters;

[0029] [Fig. 5](#) ein zweites Beispiel für das taktile Messen eines axialen Abstandswerts zwischen zwei axial antastbaren Flächen;

[0030] [Fig. 6](#) eine mögliche Variante für die Bestimmung des Offset-Werts zwischen taktilen Messtaster und optischer Messeinheit (Kalibrierung) in einer Vorderansicht und einer Draufsicht der Vorrichtung;

[0031] [Fig. 7](#) eine weitere Variante für das Einmessen des taktilen Messtasters (Kalibrierung) an einem statischen Längennormal;

[0032] [Fig. 8](#) eine weitere Realisierungsform für das Einmessen des taktilen Messtasters (Kalibrierung) an einem rotierenden Längennormal.

[0033] Die Vorrichtung ist grundsätzlich wie in [Fig. 1](#) gezeigt aufgebaut. Im Wesentlichen umfasst die Vorrichtung ein mechanisch stabiles Maschinenbett **1**, an dem eine Werkstückhalterung **2** und eine optische Messeinheit **3** beweglich angeordnet sind. Die Werkstückhalterung **2** weist, eine Rotationsachse **6** bildend, eine angetriebene Zentrierspitze **22** und eine mitlaufende Zentrierspitze **24** auf, zwischen denen ein Maschinenelement **5** an der Rotationsachse **6** aufnehmbar ist. Dem Maschinenelement **5** beidseitig der Rotationsachse **6** gegenüberliegend ist die optische Messeinheit **3** angeordnet. Zur optischen Messung des Maschinenelements **5** weist die optische Messeinheit **3** auf der einen Seite der Rotationsachse **6** ein Beleuchtungsmodul **31** und auf gegenüberliegender Seite der Rotationsachse **6** ein Kameramodul **33** auf. Einseitig an der optischen Messeinheit **3** ist eine Schwenkeinrichtung **41** fest angeordnet. Die Schwenkeinrichtung **41** weist eine orthogonal zur Rotationsachse **6** schwenkbare mechanische Messeinheit **4** auf.

[0034] Die Werkstückhalterung **2** besteht aus einem fest an einem Ende des Maschinenbetts **1** angeordneten Spindelstock **21** und einem beweglich am Maschinenbett **1** angeordneten Reitstock **23**. Zur Bewegung des Reitstocks **23** ist am Maschinenbett **1** eine entlang des Maschinenbetts **1** verlaufende Linearführung **11** angebracht. An der Linearführung **11** kann der Reitstock **23** relativ zum Spindelstock **21** bewegt und in einer beliebigen Position fest in der Linearführung **11** verspannt werden. Der Spindelstock **21** ist mit einer drehbaren und angetriebenen Zentrierspitze **22** und der Reitstock **23** mit einer drehbaren und mitlaufenden Zentrierspitze **24** versehen. Die Achsen der angetriebenen Zentrierspitze **22** und der mitlaufenden Zentrierspitze **24** sind coaxial zueinander ausgerichtet. Die angetriebene Zentrierspitze **22** und die mitlaufenden Zentrierspitze **24** weisen zueinander, sodass zwischen ihnen das Maschinenelement **5** an entsprechenden Zentrierbohrungen des Maschinenelements **5** drehbar aufgenommen werden kann. Durch die mitlaufende Zentrierspitze **24** wird eine definierte Kraft auf das Maschinenelement **5** ausgeübt, sodass zwischen der angetriebenen Zentrierspitze **22** und der Zentrierbohrung des Maschinenelements **5** ein Kraftschluss entsteht. Durch den Kraftschluss kann das Maschinenelement **5** von der angetriebenen Zentrierspitze **22** in Rotation versetzt werden. Zur genauen Erfassung der Winkelposition des rotierenden Maschinenelements **5**, ist die angetriebene Zentrierspitze **22** mit einem präzisen Winkelmesssystem (nicht dargestellt) verbunden.

[0035] In einer Ausführung der Vorrichtung, kann es auch ausreichend sein, das Maschinenelement **5** nur einseitig am Spindelstock **21** aufzunehmen. Zur Aufnahme ist am Spindelstock **21** wie in [Fig. 7](#) dargestellt ein Backenfutter oder eine Spannzange angebracht, in der das Maschinenelement **5** eingespannt und bei

Bedarf auch um die Rotationsachse **6** rotiert werden kann.

[0036] Die ebenfalls am Maschinenbett **1** aufgenommene optische Messeinheit **3** ist U-förmig ausgebildet und wird an der Fläche am Grund der U-Form beweglich am Maschinenbett **1** befestigt, sodass die parallelen Schenkel der optischen Messeinheit **3** zu beiden Seiten und senkrecht vom Maschinenbett **1** abstehend orientiert sind. Zur Aufnahme der optischen Messeinheit **3** ist parallel zur Linearführung **11** verlaufend ein Linearführungssystem **12** (in [Fig. 1](#) nicht sichtbar an der Rückseite des Maschinenbetts angeordnet) entlang des Maschinenbetts **1** angebracht. Das Linearführungssystem **12** kann aus zwei parallel verlaufenden, hochgenauen Gleitschienen bestehen. Die Aufnahme der optischen Messeinheit **3** an den Gleitschienen des Linearführungssystems **12** erfolgt über entsprechende Lager, mit denen die optischen Messeinheit **3** entlang des Maschinenbetts **1** bewegt werden kann.

[0037] Wie in der [Fig. 2a](#) in einer Ansicht von vorn dargestellt, ist zum Durchführen einer optischen Messung in einem Schenkelende der optischen Messeinheit **3** ein Beleuchtungsmodul **31** und in dem anderen Schenkelende der optischen Messeinheit **3** ein Kameramodul **33** integriert. Durch den mechanisch stabilen Aufbau der optischen Messeinheit **3** liegen sich das Beleuchtungsmodul **31** und das Kameramodul **33** auf einer statischen optischen Achse **34** gegenüber, sodass ein von dem Beleuchtungsmodul **31** ausgesendetes Lichtbündel **32** mit dem Kameramodul **33** erfasst werden kann. Das Beleuchtungsmodul **31** und das Kameramodul **33** sind orthogonal und zu beiden Seiten der Werkstückhalterung **2** angeordnet, sodass die Rotationsachse **6** der Werkstückhalterung **2**, wie in einer Draufsicht gemäß [Fig. 2b](#) dargestellt, etwa mittig im Lichtbündel **32** positioniert ist.

[0038] Durch die Bewegung der optischen Messeinheit **3** entlang des Linearführungssystems **12** kann das Lichtbündel **32** der optischen Messeinheit **3** entlang der Rotationsachse **6** der Werkstückhalterung **2** bewegt werden. Das in der Werkstückhalterung **2** aufgenommene Maschinenelement **5** kann somit vollständig erfasst werden. Dazu wird das Maschinenelement **5** mit dem Beleuchtungsmodul **31** beleuchtet und ein entstehendes Schattenbild mit dem Kameramodul **33** aufgenommen. Aus dem Schattenbild kann eine zweidimensionale Kontur des Maschinenelements **5** erzeugt werden, die zur Berechnung von messtechnischen Größen des Maschinenelements **5** wie beispielsweise Längen, Durchmesser, Parallelitäten, Geradheiten, Winkeln oder Radien verwendet werden kann.

[0039] Es ist auch möglich die optische Messeinheit **3** unbewegt zu belassen und das Maschinenelement **5** um die Rotationsachse **6** zu bewegen. Un-

ter gleichzeitigem Erfassen der Winkelposition des um die Rotationsachse **6** drehenden Maschinenelements **5** kann eine Kontur des Maschinenelements **5** in einer zur Rotationsachse **6** parallelen Schnittebene erfasst und daraus verschiedenen messtechnischen Größen wie rotationswinkelabhängige Position, Rundlauf und Rundheit berechnet werden. Aus der Kombination mehrerer solcher Konturen können weitere messtechnische Größen wie beispielsweise Zylinderform, Koaxialität und Gesamtrundlauf berechnet werden.

[0040] Zusätzlich zur optischen Messeinheit **3** weist die Vorrichtung die mechanische Messeinheit **4** auf. Wie in [Fig. 1](#) dargestellt, besteht die mechanische Messeinheit **4** aus der Schwenkeinrichtung **41**, die über eine stabile Grundplatte **40** fest mit einem der Schenkel der optischen Messeinheit **3** verbunden ist. An der Schwenkeinrichtung **41** ist ein taktiler Messtaster **42** befestigt, der aus einem Messwertaufnehmer **421** mit einem Tastarm **422** und einem den Tastarm **422** abschließenden Tastelement **423** aufgebaut ist. Wie in der [Fig. 2b](#) in der Ansicht von oben gezeigt, kann die Schwenkeinrichtung **41** zusammen mit dem taktilen Messtaster **42** eine stufenlose Schwenkbewegung um eine parallel zur Rotationsachse **6** angeordnete Schwenkachse **43** ausführen. Der taktiler Messtaster **42** ist dabei mit seinem Tastarm **422** orthogonal zur Schwenkachse **43** angeordnet, sodass dieser zwischen einer außerhalb und einer innerhalb des Maschinenelements **5** befindlichen Position jede Zwischenposition einnehmen kann.

[0041] Wie in den [Fig. 2a](#) bis [Fig. 2d](#) bei der Antastung einer vollständig orthogonal zu Rotationsachse **6** orientierten Fläche des Maschinenelements **5** gezeigt, ist die mechanische Messeinheit **4** ausschließlich zum Messen von axial antastbaren Flächen des Maschinenelements **5** ausgelegt. Der taktiler Messtaster **42** ist deshalb als ein eindimensionaler Messtaster ausgeführt, dessen Tastarm **422** sich parallel zur Rotationsachse **6** in beiden Richtungen auslenken lässt. Somit können axial antastbare Flächen in beiden Richtungen der Rotationsachse **6** angetastet und vermessen werden. Sowohl die Positionierung der mechanischen Messeinheit **4** entlang der Rotationsachse **6** als auch die Antastbewegung der mechanischen Messeinheit **4** an axial antastbare Flächen des Maschinenelements **5** erfolgt durch die Bewegung der optischen Messeinheit **3**. Gegenüber Messungen mit der optischen Messeinheit **3** kann mit der mechanischen Messeinheit **4** besonders bei der Messung von Ebenheit, Planlauf, Rechtwinkligkeit und von Abstandswerten M orthogonal zur Rotationsachse ausgerichteter Flächen des Maschinenelements **5** eine wesentlich höhere Genauigkeit erreicht werden.

[0042] Wie in [Fig. 3a](#) und [Fig. 3b](#) anhand zweier beispielhafter Positionen gezeigt, kann die Anbringung der Schwenkeinrichtung **41** an verschiedenen

Stellen der optischen Messeinheit **3** erfolgen. In den Figuren ist die Messung ein und der selben axial antastbaren Fläche mit zwei unterschiedlich positionierten mechanischen Messeinheiten **4** dargestellt. Die Schwenkeinrichtung **41** kann sowohl an der dem Spindelstock **21**, als auch an der dem Reitstock **23** zugewandten Seite der Schenkel der optischen Messeinheit **3** angebracht werden. In soweit die Länge des Tastarms **422** und die Position der Schwenkachse **43** gegenüber der Rotationsachse **6** so gewählt wird, dass der taktile Messtaster **42** bei einer kreisbogenförmigen Einschwenkbewegung mit dem Tastelement **423** die Rotationsachse **6** tangieren kann ([Fig. 2b](#)), ist die Position der mechanischen Messeinheit **4** für die Durchführung der Messung nicht von Bedeutung. Durch die zuvor genannte Einschränkung ist gewährleistet, dass mit dem taktilen Messtaster **42** jede radiale Position des in die Werkstückhalterung **2** eingespannten Maschinenelements **5** erreicht werden kann.

[0043] Je nach Form und Lage der zu messenden, axial antastbaren Flächen kann die Geometrie der verwendeten Tastelemente **423** angepasst werden. Als ein besonders vorteilhaftes Tastelement **423** kann eine am Ende des Tastarms **422** angebrachte Tastkugel verwendet werden, mit der bereits eine Vielzahl von Messaufgaben an axial antastbaren Flächen durchgeführt werden können. Es können aber auch andere Tastelemente **423** wie beispielsweise Zylinder, Spitzen oder Scheiden verwendet werden, mit denen schwer zugängliche Flächen besser erreichbar sind.

[0044] Für axial antastbare Flächen, die wie in [Fig. 4](#) gezeigt, hinter äußeren Strukturen des Maschinenelements **5** liegen und nicht mit einem geraden Tastarm **422** mit Tastelement **423** erreichbar sind, kann eine spezielle Ausführung des Tastarms **422** verwendet werden. Dieser verfügt über zwei Tastelemente **423** in Form von Tastkugeln die mit einem Abstand zueinander, in Parallelrichtung zur Rotationsachse **6**, am Ende des Tastarms **422** angeordneten sind.

[0045] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Messung von Form-, Lage-, und Dimensionsmerkmalen wird in einem ersten Verfahrensschritt ein entsprechendes Maschinenelement **5** in eine drehbare Werkstückhalterung **2** eingespannt. Als drehbare Werkstückhalterung **2** können neben zwei Zentrierspitzen auch einseitige Spannmittel, wie Drei-, Vier- oder Sechsbakenfutter oder Spannzangen, verwendet werden. Bei den Maschinenelementen **5** kann es sich um Motor- und Getriebewellen, Schubstangen, Ventile, Kolben, Schrauben, Turbinenteile oder Ähnliches handeln, die fest in der Werkstückhalterung **2** aufgenommen werden, sodass sie um ihre Rotationsachse **6** gedreht werden können.

[0046] Im nachfolgenden Verfahrensschritt kann das Maschinenelement **5** optisch gemessen werden. Dazu werden mit einer optischen Messeinheit **3** Schattenbilder des Maschinenelements **5** erfasst. Die Schattenbilder werden in dem orthogonal zur Rotationsachse **6** gerichteten Strahlengang der optischen Messeinheit **3** erzeugt.

[0047] Bei der optischen Messung können abschnittsweise sowohl Konturen aufgezeichnet, indem die Rotationsachse **6** still steht und die Messeinheit **3** parallel zur Rotationsachse **6** bewegt wird als auch indem das Maschinenelement **5** um die Rotationsachse **6** rotiert wird, während die Messeinheit **3** an einer Position steht. Auf diese Weise können sehr schnell Form-, Lage- und Dimensionsmerkmale des Maschinenelements erfasst werden.

[0048] Aus der optischen Messung lassen sich auch leicht die Positionen von axial antastbaren Flächen des Maschinenelements **5** ermitteln. Entsprechend diesen optisch erfassten Positionen der axial antastbaren Flächen kann im nächsten Verfahrensschritt eine mechanische Messeinheit **4** mit einem taktilen Messtaster **42** zur Messung dieser Flächen positioniert werden. Die Positionierung erfolgt über eine Bewegung der optischen Messeinheit **3** entlang des Linearführungssystems **12** (nur in [Fig. 6](#) gezeigt). Die optische Messeinheit **3** wird so positioniert, dass der taktile Messtaster **42** der mechanischen Messeinheit **4** kollisionsfrei in einer der zu messenden Fläche gegenüberliegenden Orthogonalebene in das Maschinenelement **5** eingeschwenkt werden kann.

[0049] Im letzten Verfahrensschritt erfolgt die taktile Messung der axial antastbaren Flächen. Dazu wird der taktile Messtaster **42** aus einer außerhalb des Maschinenelements **5** liegenden Ausgangsposition in das Maschinenelement **5** eingeschwenkt (siehe [Fig. 2b](#), [Fig. 2c](#)), bis eine gewünschte radiale Position gegenüber der Rotationsachse **6** erreicht ist in der durch eine Bewegung der optischen Messeinheit **3** die Antastung der zu messenden Fläche mit dem taktilen Messtaster **42** erfolgt.

[0050] Die Besonderheiten des Messens von Abstandswerten **M** zwischen zwei axial antastbaren Flächen eines Maschinenelements **5** sollen anhand von zwei Beispielen erläutert werden.

[0051] In einem ersten Beispiel erfolgt die Messung eines Abstandswerts **M** an zwei gegenüberliegenden Flächen, die durch Material des Maschinenelements **5** voneinander getrennt sind. Die Messung kann anhand der [Fig. 2a](#) bis [Fig. 2d](#) erläutert werden und erfolgt durch eine kombinierte Anwendung des optischen und des taktilen Messverfahrens. Der relevante Abschnitt des Maschinenelements **5** (in [Fig. 2a](#) bis [Fig. 2d](#) der Bereich des Maschinenelements **5** mit dem größeren Durchmesser und den beiden ortho-

gonal zur Rotationsachse **6** orientierten Planflächen dieses Abschnitts) wird zunächst vollständig mit der optischen Messeinheit **3** erfasst. Aus dem aufgenommenen Schattenbild werden die Positionen der beiden axial antastbaren Flächen (**Fig. 2a**) erfasst. Anschließend wird der taktile Messtaster **42** mittels der optischen Messeinheit **3** zunächst in die aus der optischen Messung bekannte Orthogonalebene bewegt, die einer der axial antastbaren Flächen gegenüber liegt (in **Fig. 2a** die Fläche oberhalb des zu messenden Abschnitts des Maschinenelements **5**) und der taktile Messtaster **42**, wie in **Fig. 2b** gezeigt, in den Bereich des Maschinenelements **5** eingeschwenkt. Sobald der taktile Messtaster **42** gegenüber der Rotationsachse **6** eine gewünschte radiale Position erreicht hat, erfolgt, wie in **Fig. 2c** gezeigt, die Antastbewegung des taktilen Messtasters **42** mittels der optischen Messeinheit **3**. Die Antastbewegung wird fortgesetzt, bis der taktile Messtaster **42** auf der axial antastbaren Fläche aufsetzt und wie in **Fig. 2d** gezeigt eine zur Erfassung des Messwerts erforderliche Auslenkung erreicht. Auf diese Weise können axiale Positionen gemessen werden, die aufgrund von verdeckten Flächenbereichen im Schattenbild oder nicht sichtbaren Elementen bzw. nicht ausreichend genau gemessen werden können.

[0052] Die Messung des Abstandswerts M der beiden Flächen aus dem obigen Beispiel kann auch erfolgen, indem die axiale Position einer Fläche taktil erfasst wird und die axiale Position der anderen Fläche optisch.

[0053] Ein zweites Beispiel ist in **Fig. 5** gezeigt. Die zu messenden axial antastbaren Flächen liegen sich hier gegenüber und sind nur durch Luft voneinander getrennt. Zur Ermittlung der Position beider Flächen kann auch hier im Voraus eine schnelle optische Messung erfolgen. Bei der mechanischen Abstandswertmessung kann der taktile Messtaster **42** nun in eine beliebige Orthogonalebene zwischen den beiden Flächen des Maschinenelements **5** eingeschwenkt werden. Die Messung beider Flächen erfolgt durch eine Bewegung der optischen Messeinheit **3** in beide Richtungen parallel zur Rotationsachse **6**, sodass an dieser radialen Position eine Fläche von unten und die andere Fläche von oben angetastet werden kann und für diese radiale Position ein Abstandswert M ermittelt wird. Da der taktile Messtaster **42** bei dieser Messung in einer unveränderten radialen Position verbleibt, können in diesem Fall Messfehler, die durch Schwenkbewegungen des taktilen Messtasters **42** entstehen könnten, ausgeschlossen werden, sodass ein sehr genaues Messergebnis erwartet zu erwarten ist.

[0054] Bei einer kombinierten optischen und mechanischen Messung zur vollständigen Erfassung des Maschinenelements **5** mit mehreren zu messenden Abschnitten mit axial antastbaren Flächen, kann sich

der Ablauf wie nachfolgend beschrieben unterschiedlich gestalten.

[0055] Es besteht entweder die Möglichkeit, zunächst alle Abschnitte des Maschinenelements **5** im ersten Verfahrensschritt optisch zu messen. Das kann mit einer Bewegung der optischen Messeinheit entlang des Maschinenelements **5** erfolgen, bei dem ein sukzessive aufgenommenes Schattenbild des gesamten Maschinenelements **5** erfasst wird. Anschließend werden in weiteren Teilschritten des taktilen Messens alle relevanten Abschnitte nacheinander mit der mechanischen Messeinheit **4** angetastet und gemessen.

[0056] Alternativ besteht die Möglichkeit, das Maschinenelement **5** in nacheinander folgenden Verfahrensschritten abschnittsweise optisch und taktil zu messen. Nachdem ein erster Abschnitt des Maschinenelements **5** optisch und taktil erfasst wurde, werden die Messeinheiten **3** und **4** zum nachfolgenden Abschnitt bewegt und dieser Abschnitt vermessen, bis das Maschinenelement **5** vollständig erfasst ist.

[0057] Um eine sehr genaue Messung zu ermöglichen, ist es erforderlich vor oder auch während der Messung eines Maschinenelements **5** eine Kalibrierung der Messeinheiten erforderlich. Die Einmessschritte müssen bei den beiden in den Beispielen genannten Verfahrensabläufen und auch bei allen anderen Variationen des Verfahrens durchgeführt werden. Der Ablauf des Einmessens richtet sich nach der Kombination der für die Messung der axial antastbaren Flächen verwendeten Messeinheiten.

[0058] In einer ersten Variante des Messverfahrens zur Messung axial antastbarer Flächen bei der die optische Messeinheit **3** und die mechanische Messeinheit **4** kombiniert verwendet werden, ist mindestens vor Beginn und gegebenenfalls auch noch während der Messung ein genauer Offset-Wert O zu ermitteln, der dem Abstandswert zwischen der optischen Achse **34** der optischen Messeinheit **3** und dem Tastelement **423** des taktilen Messtasters **42** entspricht. Wie in **Fig. 6** gezeigt ist dazu eine Referenzfläche R erforderlich, die mit beiden Messeinheiten **3** und **4** angetastet werden kann. In **Fig. 6** ist die Referenzfläche R in den Spindelstock **21** integriert. Die Abstandswertmessung soll erfolgen, indem die Referenzfläche R sowohl optisch als auch taktil erfasst wird. Aus der Differenz der beiden Messwerte kann dann der Offset-Wert O ermittelt werden. Insofern die Referenzfläche R sowohl mit der optischen Messeinheit **3** als auch mit der mechanischen Messeinheit **4** angetastet werden kann, ist die Position der Referenzfläche R nicht von Bedeutung. Deshalb kann sie, wie in **Fig. 6** in einer gestrichelten Darstellung am Reitstock **23** gezeigt, alternativ auch an anderen Positionen der Werkstückhalterung **2** oder an fest dazu in Beziehung stehenden Flächen angeordnet sein.

[0059] In einer zweiten Variante des Messverfahrens zur Messung axial antastbarer Flächen, bei der gegenüberliegende axial antastbare Flächen die durch Luft voneinander beabstandet sind aus entgegengesetzten Richtungen angetastet werden sollen, ist die mindestens vor der Messung erforderliche Kalibrierung auf andere Weise vorzunehmen. Da bei dieser Abstandswertmessung die Antastung der beiden gegenüberliegenden axial antastbaren Flächen ausschließlich taktil erfolgen kann, ist ein Längennormal erforderlich das zwei Referenzflächen aufweist, die sich ebenfalls nur durch Luft getrennt gegenüberliegen.

[0060] Eine Ausführungsform des Längennormals ist, wie in **Fig. 7** dargestellt, einseitig am Reitstock **23** ein U-Profil **7** angebracht, dessen innenliegende parallele Flächen die Referenzflächen R1 und R2 verkörpern. Durch zusätzliche optische Messung der beiden Referenzflächen R1 und R2 können Offset-Werte O (nur in **Fig. 6** eingezeichnet) zwischen der optischen Messeinheit **3** und der mechanischen Messeinheit **4** für beide Antastrichtungen bestimmt werden.

[0061] Die beiden Referenzflächen R1 und R2 werden nacheinander mit dem taktilen Messtaster **42** angetastet und die ermittelten Messwerte als Längennormal gespeichert und zur Normierung der axialen Abstandsmesswerte des vom taktilen Messtaster **42** angetasteten Maschinenelements **5** verwendet. Unmittelbar danach kann die Abstandsmessung mit einer maximalen Genauigkeit durchgeführt werden. Die Normierung kann, falls erforderlich, auch beliebig oft während der Messung wiederholt werden.

[0062] Eine weitere Ausführungsform des Längennormals ist in **Fig. 8** dargestellt. Hier liegt das gleiche Prinzip zu Grunde wie bei dem in **Fig. 7** beschriebenen U-Profil **7**. In diesem Fall ist es als ein Rotationskörper **8** ausgeführt, der konzentrisch zur Rotationsachse **6** am Spindelstock **21** oder am Reitstock **23** umlaufend angebracht ist. Die beiden sich parallel gegenüberliegenden Referenzflächen R1 und R2 der Rechtecknut bilden dabei das Längennormal.

[0063] Eine weitere Steigerung der Genauigkeit kann erreicht werden, indem das gemessene Längennormal zwischen den Referenzflächen R1 und R2 in Abhängigkeit einer ermittelten Temperaturdifferenz des U-Profiles **7** oder des Rotationskörpers **8** angepasst werden. Dazu wird die Temperatur von U-Profil **7** bzw. Rotationskörper **8** mit Hilfe eines Temperatursensors (nicht gezeichnet) kontinuierlich erfasst und das gemessene Längennormal zwischen den Referenzflächen R1 und R2 mit einem Faktor korrigiert wird der dem der Temperaturänderung entsprechenden Wärmeausdehnungskoeffizienten berücksichtigt.

Bezugszeichenliste

1	Maschinenbett
11	Linearführung
12	Linearführungssystem
2	Werkstückhalterung
21	Spindelstock
22	angetriebene Zentrierspitze
23	Reitstock
24	mitlaufende Zentrierspitze
25	Backenfutter
3	optische Messeinheit
31	Beleuchtungsmodul
32	Lichtbündel
33	Kameramodul
34	optische Achse
4	mechanische Messeinheit
40	Grundplatte
41	Schwenkeinrichtung
42	taktiler Messtaster
421	Messwertaufnehmer
422	Tastarm
423	Tastelement
43	Schwenkachse
5	Maschinenelement
6	Rotationsachse
7	kalibriertes Längennormal
8	Rotationskörper
M	Abstandswert
O	Offset-Wert zwischen optischer und mechanischer Messeinheit
R/R1/R2	Referenzfläche

Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Messen von Form-, Lage- oder Dimensionsmerkmalen eines rotierbaren Maschinenelements, enthaltend
 - ein mechanisch stabiles Maschinenbett mit einer entlang des Maschinenbetts angeordneten Linearführung (**11**) und einem parallel dazu angeordneten Linearführungssystem (**12**),
 - eine Werkstückhalterung (**2**) zur drehbaren Aufnahme des Maschinenelements (**5**) um eine Rotationsachse (**6**) des Maschinenelements (**5**), wobei die Werkstückhalterung (**2**) mindestens ein in der Linearführung (**11**) aufgenommenes Spannmittel (**22**, **24**; **25**) zur Drehung des Maschinenelements (**5**) um die Rotationsachse (**6**) aufweist,
 - eine optische Messeinheit (**3**) mit einem Beleuchtungsmodul (**31**) und einem Kameramodul (**33**), die an dem Linearführungssystem (**12**) beweglich angeordnet ist und mit der von dem drehbar zwischen Beleuchtungsmodul (**31**) und gegenüberliegendem Kameramodul (**33**) angeordneten Maschinenelement (**5**) zweidimensionale Schattenbilder des Maschinenelements (**5**) aufnehmbar sind, dadurch gekennzeichnet, dass
 - die optische Messeinheit (**3**) eine zusätzliche mechanische Messeinheit (**4**) mit einem taktilen Mess-

taster (42) zum Messen des Maschinenelements (5) in axialer Richtung aufweist, wobei

- die mechanische Messeinheit (4) an der optischen Messeinheit (3) fixiert ist und eine Schwenkeinrichtung (41) zum Einschwenken des taktilen Messtasters (42) in einer Orthogonalebene zur Rotationsachse (6) des Maschinenelements (5) aufweist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der taktile Messtaster (42) einen ein-dimensionalen, in zwei Richtungen parallel zur Rotationsachse (6) des Maschinenelements (5) messenden Messwertaufnehmer (421) mit einem Tastarm (422) und mindestens einem Tastelement (423) aufweist, wobei der Tastarm (422) so lang ist, dass das mindestens eine Tastelement (423) beim Einschwenken des taktilen Messtasters (42) einen Kreisbogen beschreibt, der mindestens die Rotationsachse (6) des Maschinenelements (5) durchquert.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der taktile Messtaster (42) einen Tastarm (422) mit zwei in Parallelrichtung zur Rotationsachse (6) des Maschinenelements (5) beabstandeten Tastkugeln (423) aufweist, sodass von umgebendem Material verdeckte Flächen axial messbar sind.

4. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Schwenkeinrichtung (41) zur Positionierung der mindestens einen Tastkugel (423) des taktilen Messtasters (42) in einem auf die Rotationsachse (6) bezogenen Radius stufenlos einstellbar ist.

5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der taktile Messtaster (42) durch Bewegung der optischen Messeinheit (3) entlang dem Linearführungssystem (12) in jeder axialer Position des Maschinenelements (5) positionierbar ist und eine Antastbewegung an axial antastbaren Flächen realisierbar ist.

6. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein Kalibrierkörper (7; 8) zur Kalibrierung des taktilen Messtasters (42) in axialer Richtung der Rotationsachse (6) mindestens zwei zur Rotationsachse (6) orthogonale und sich axial gegenüberliegende Referenzflächen (R1, R2) aufweist und an der Werkstückhalterung (2) befestigt ist, wobei von dessen Referenzflächen (R1; R2) jeweils mindestens eine durch die optische Messeinheit (3) und durch die mechanische Messeinheit (4) abtastbar sind.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Kalibrierkörper ein U-Profil (7) ist, das zwei parallele Innenflächen aufweist, die als Referenzflächen (R1; R2) orthogonal zur Rotationsachse (6) angeordnet sind.

8. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Kalibrierkörper ein zur Rotationsachse (6) konzentrisch angeordneter Rotationskörper (8) mit einer umlaufenden Rechtecknut ist, bei dem die sich parallel gegenüberliegenden Innenflächen der Rechtecknut die orthogonal zur Rotationsachse (6) angeordneten Referenzflächen (R1; R2) sind, wobei der Rotationskörper (8) konzentrisch an einem Spannmittel fixiert ist.

9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur des Kalibrierkörpers (7; 8) mit Hilfe eines Temperatursensors erfasst und ein gemessenes Längennormal zwischen den Referenzflächen R1 und R2 unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Kalibrierkörpers (7; 8) unter Berücksichtigung seines Wärmeausdehnungskoeffizienten auf eine Bezugstemperatur korrigiert wird.

10. Verfahren zum Messen von Form-, Lage und Dimensionsmerkmalen an rotierbaren Maschinenelementen, mit den Schritten:

- a) Einspannen eines Maschinenelements (5) in mindestens einem drehbaren Spannmittel einer Werkstückhalterung (2) zur Drehung des Maschinenelements (5) um eine Rotationsachse (6);
- b) optisches Messen von Abschnitten des Maschinenelements (5) durch Erfassen von Schattenbildern in einem orthogonal zur Rotationsachse (6) gerichteten Strahlengang einer optischen Messeinheit (3) unter Rotation des Maschinenelements (5) um die Rotationsachse (6) zum Ermitteln von Form-, Lage-, und Dimensionsmerkmalen und von Positionen axial antastbarer Flächen aus den Schattenbildern;
- c) Bewegen der optischen Messeinheit (3) zum Positionieren einer an der optischen Messeinheit (3) fixierten mechanischen Messeinheit (4) mit taktilen Messtaster (42) entsprechend den von der optischen Messeinheit (3) optisch ermittelten Positionen von axial antastbaren Flächen des Maschinenelements (5);
- d) taktilen Messen axialer Abstandswerte (M) von sich axial gegenüberliegenden Flächen des Maschinenelements (5) durch Einschwenken des taktilen Messtasters (42) in Orthogonalebene, die den anzutastenden Flächen jeweils gegenüber liegen, und Antasten dieser Flächen mit dem taktilen Messtaster (42).

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass das taktilen Messen sich axial gegenüberliegender und durch Luft voneinander separierter Flächen derart erfolgt, dass Punkte der sich axial gegenüberliegenden Flächen, welche gleiche radiale Abstände von der Rotationsachse (6) aufweisen mit dem taktilen Messtaster (42) abwechselnd antastet werden und für jeden gewählten radialen Abstand einen Längenmesswert darstellen, wobei der taktilen Messtaster (42) zuvor an einem kalibrierten Längennormal (7) mit zwei sich parallel gegenüber-

liegenden, orthogonal zur Rotationsachse (6) ausgerichteten Referenzflächen (R) kalibriert wird.

12. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass das taktile Messen sich axial gegenüberliegender Flächen derart erfolgt, dass die axiale Position einer der Flächen mit der optischen Messeinheit (3) erfasst wird und die der anderen Fläche mit dem taktilen Messtaster (42), wobei zuvor die optische Messeinheit (3) und die mechanische Messeinheit (4) zueinander kalibriert werden, indem an einer Referenzfläche (R) ein Offset-Wert (O) zwischen den Messpositionen der optischen Messeinheit (3) und der mechanischen Messeinheit (4) bestimmt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 10 dadurch gekennzeichnet, dass in einer oder mehreren zur Rotationsachse (6) konzentrischen Spuren Messwerte des taktilen Messtasters (42) aufgenommen und zur Berechnung von Formmerkmalen verwendet werden, wobei das Maschinenelement (5) um die Rotationsachse (6) gedreht wird.

14. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass das kalibrierte Längennormal (7) für wenigstens einen Kalibrierschritt mindestens vor Beginn des optischen Messens verwendet wird.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

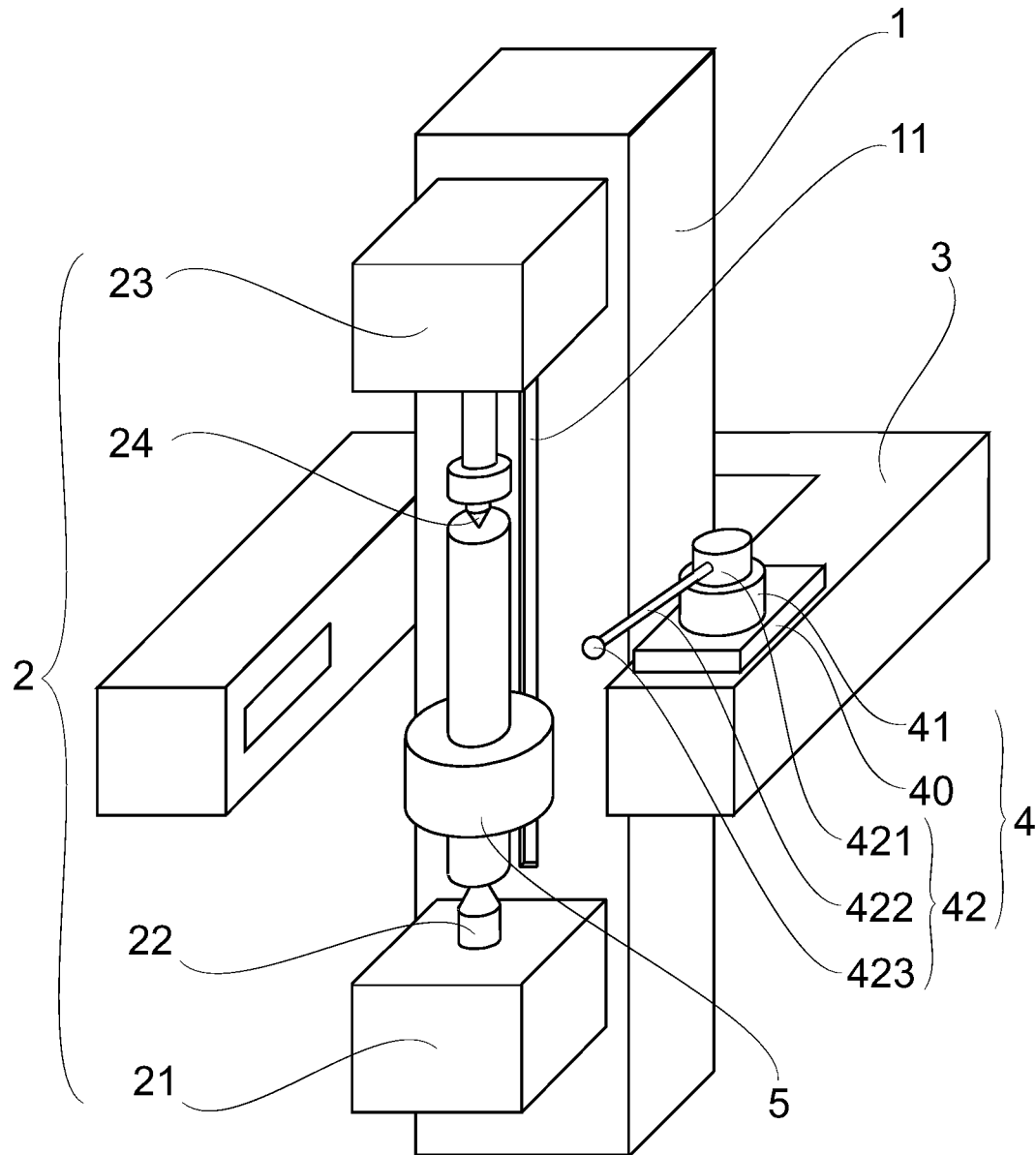


Fig. 1

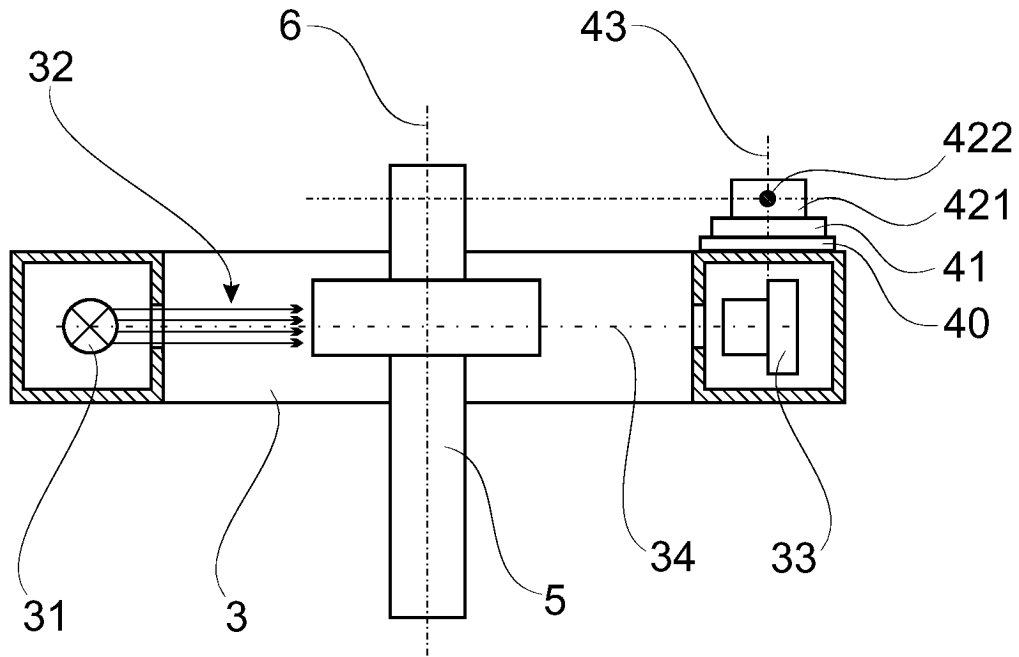


Fig. 2a

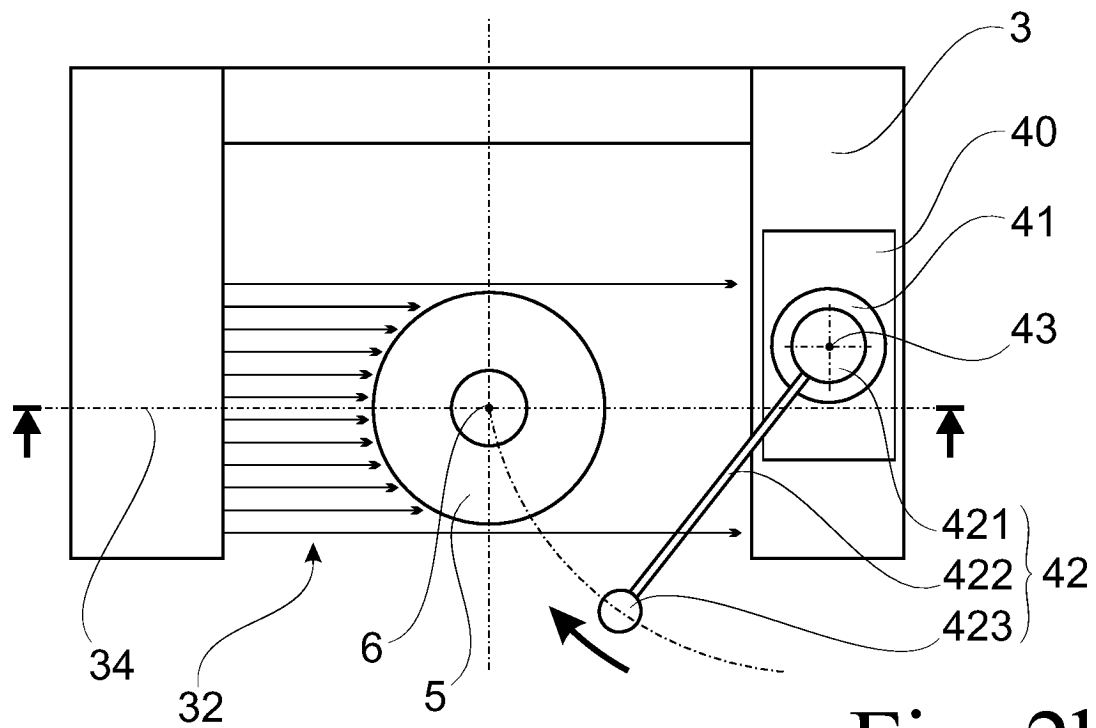


Fig. 2b

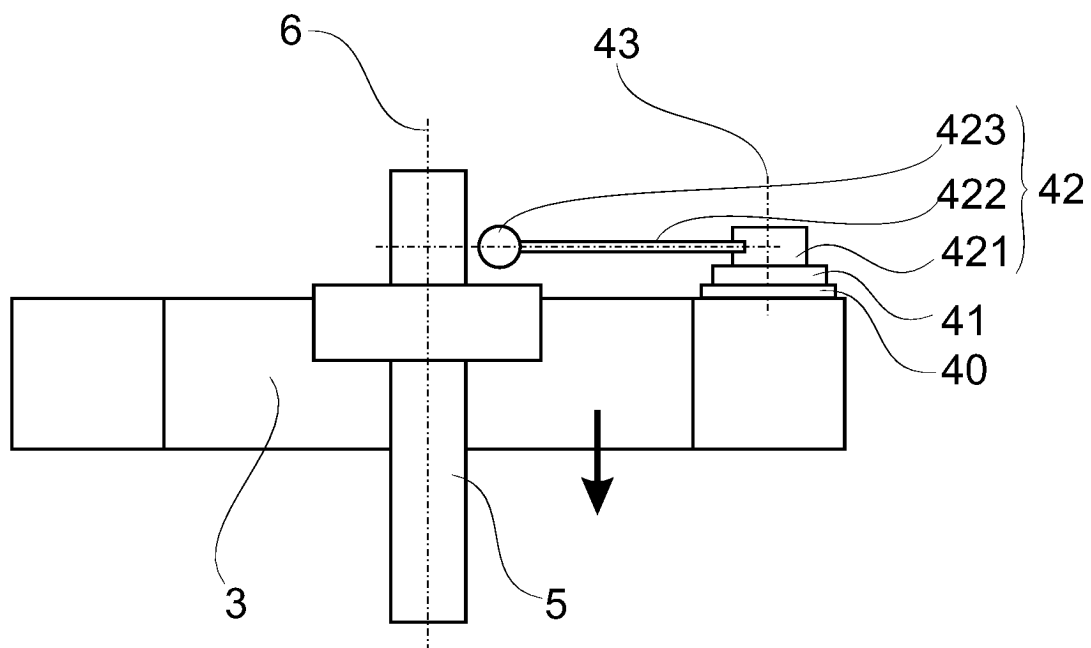


Fig. 2c

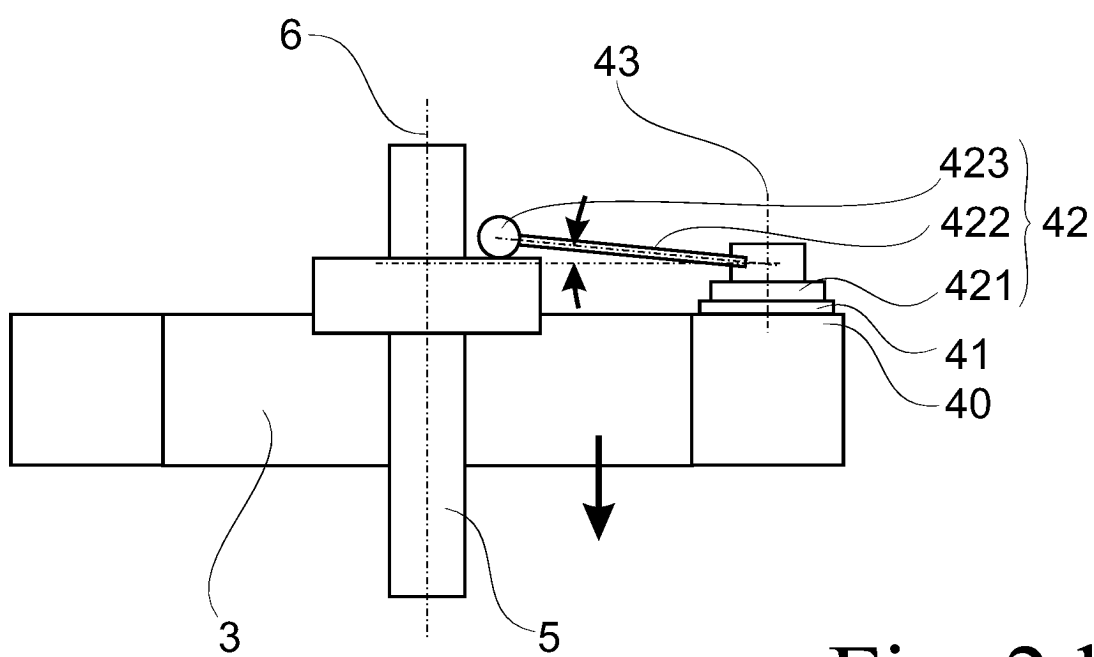


Fig. 2d

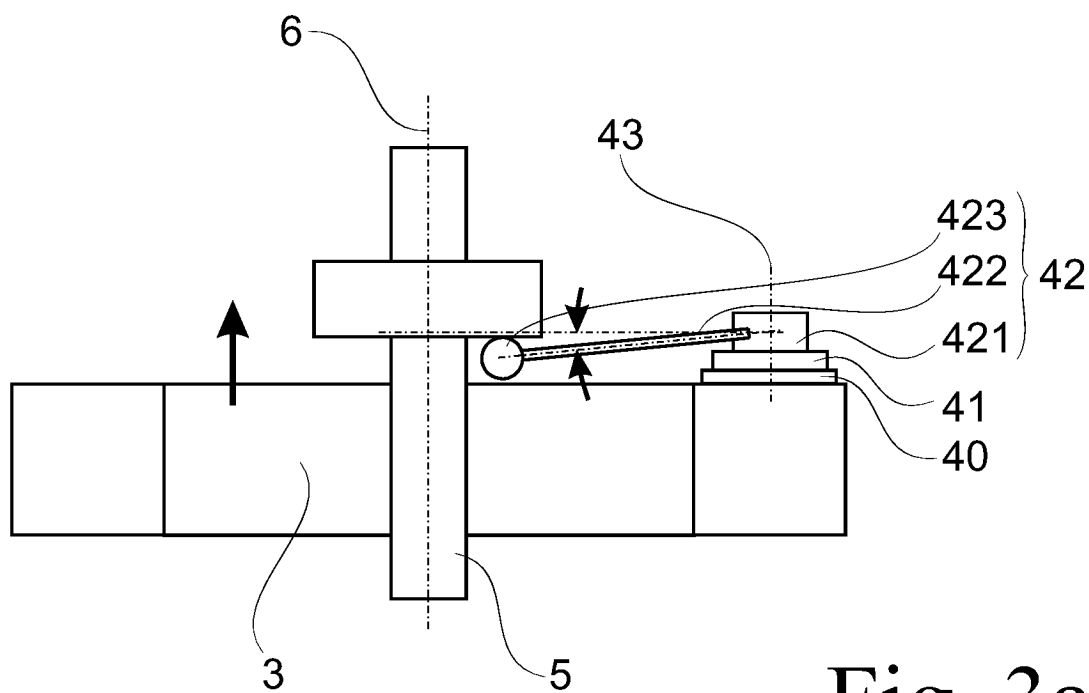


Fig. 3a

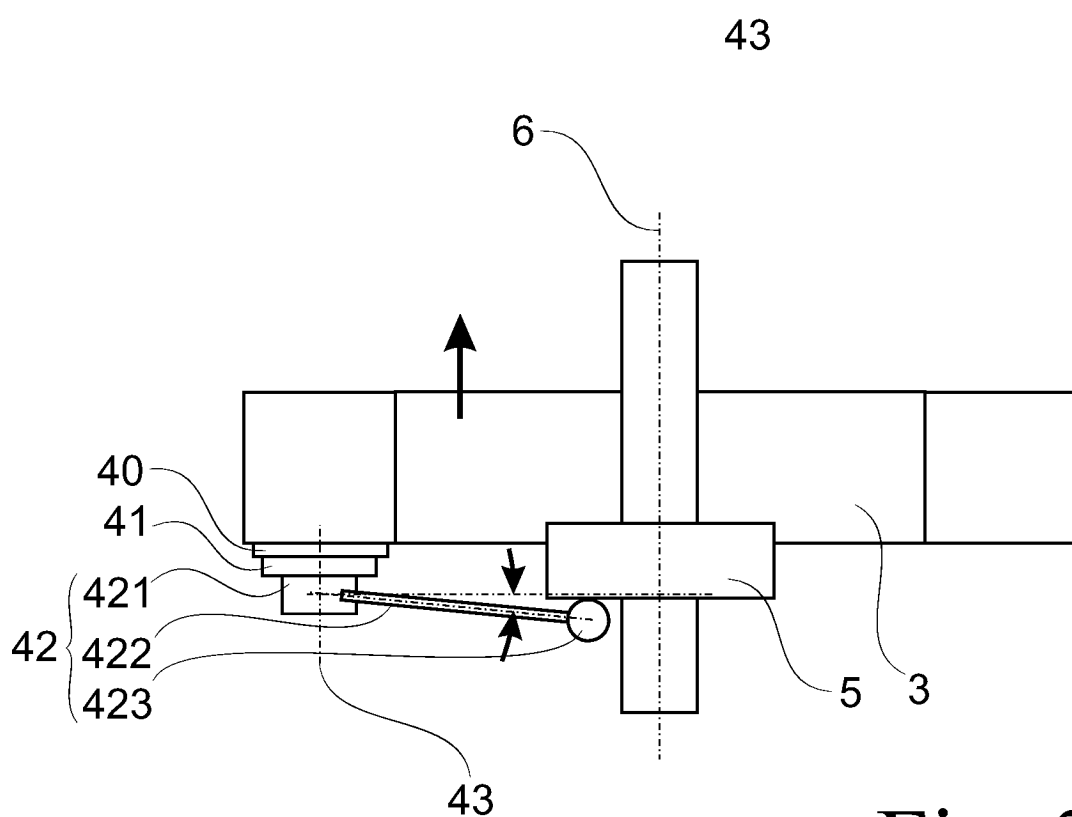


Fig. 3b

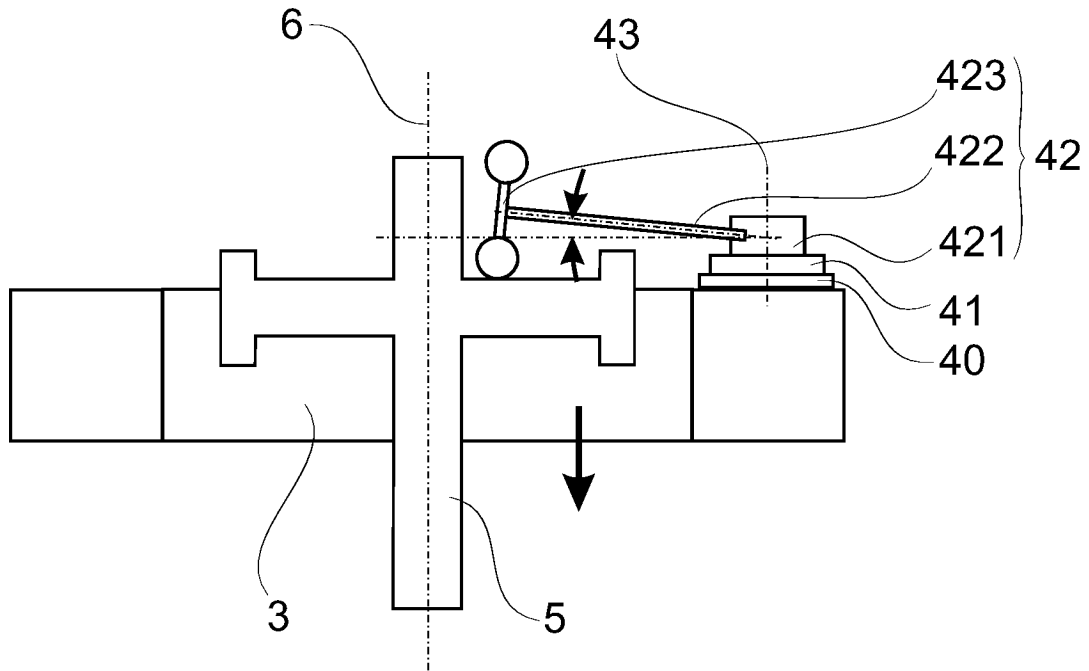


Fig. 4

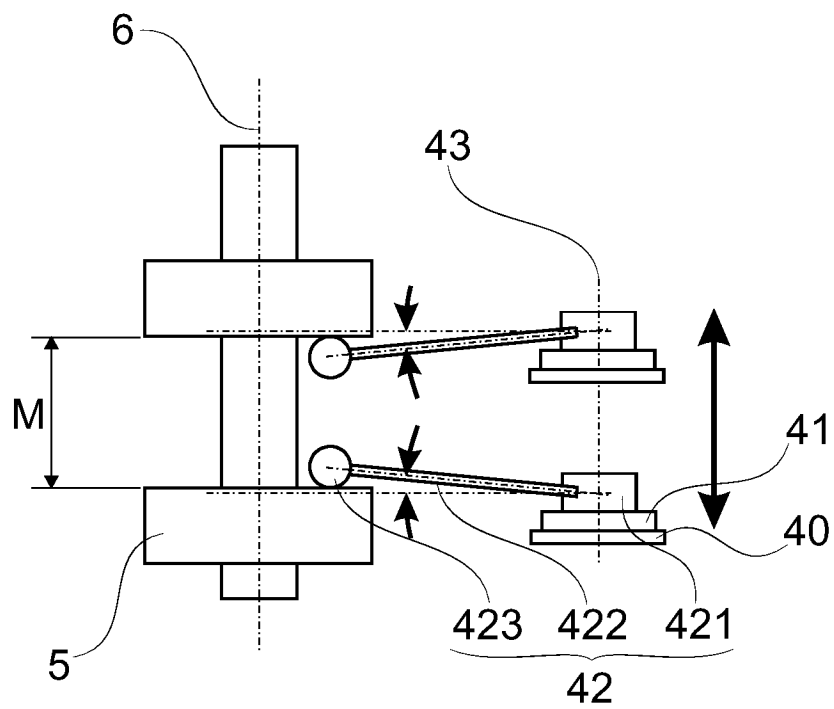


Fig. 5



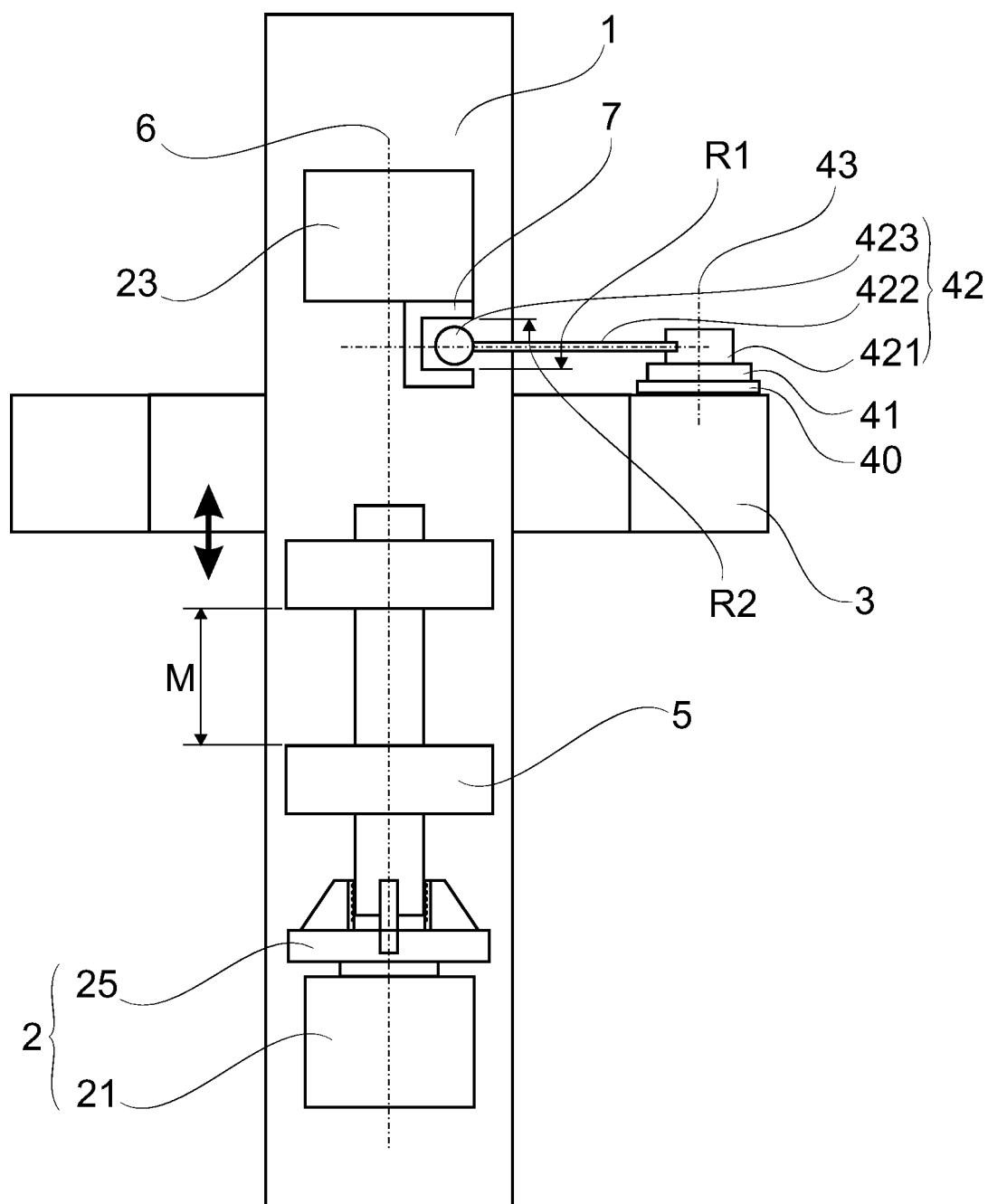


Fig. 7

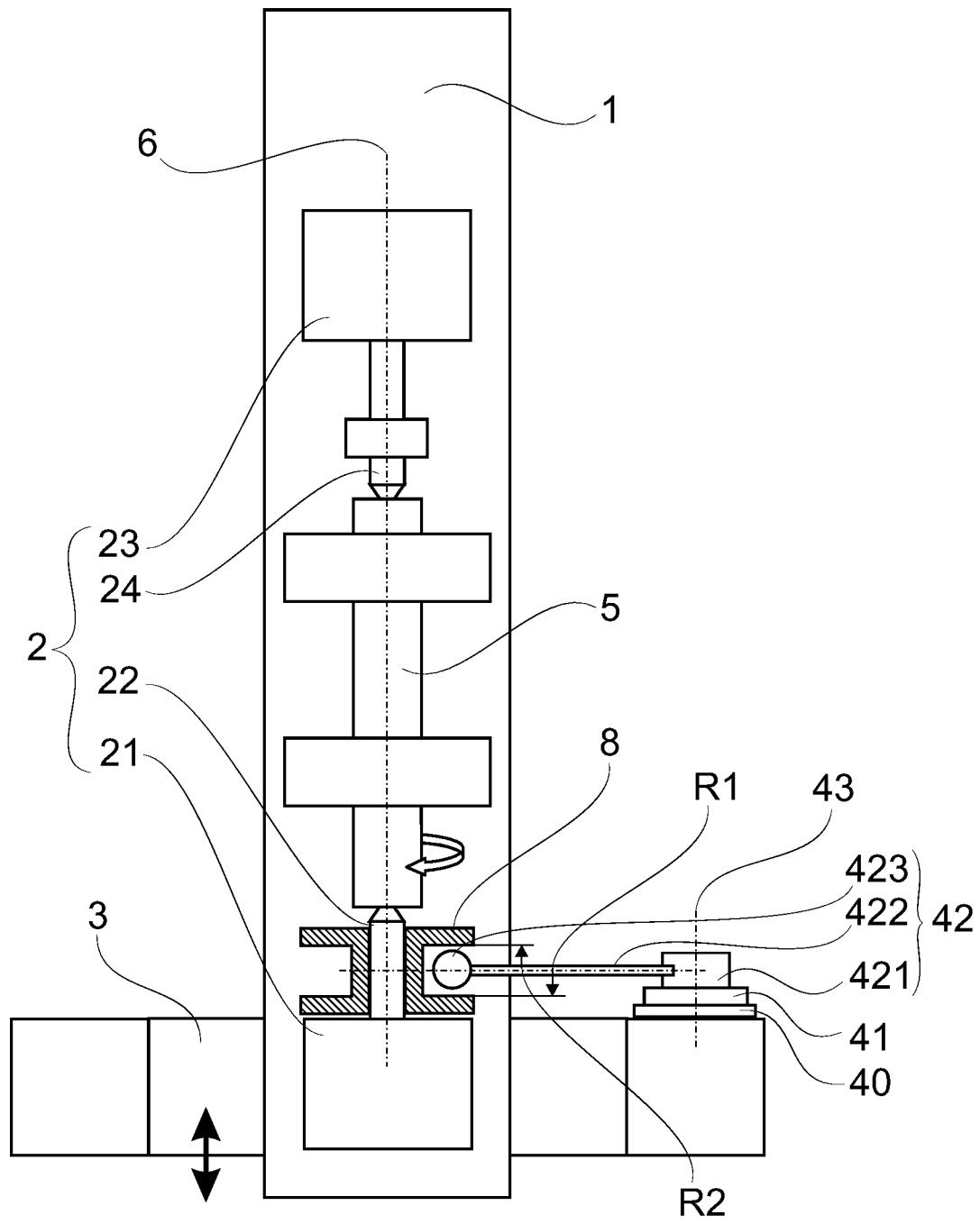


Fig. 8