



(10) **DE 10 2017 131 465 B4** 2021.01.28

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2017 131 465.2**
(22) Anmeldetag: **29.12.2017**
(43) Offenlegungstag: **04.07.2019**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **28.01.2021**

(51) Int Cl.: **G01B 11/24 (2006.01)**
G01B 11/08 (2006.01)
G01B 21/02 (2006.01)

Innerhalb von neun 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**

(72) Erfinder:
Jacob, Lutz, 07743 Jena, DE

(74) Vertreter:
**GLEIM PETRI OEHMKE Patent- und
Rechtsanwaltspartnerschaft mbB, 07743 Jena, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2011 050 036	B4
DE	10 2012 104 008	B3
DE	10 2015 106 920	A1

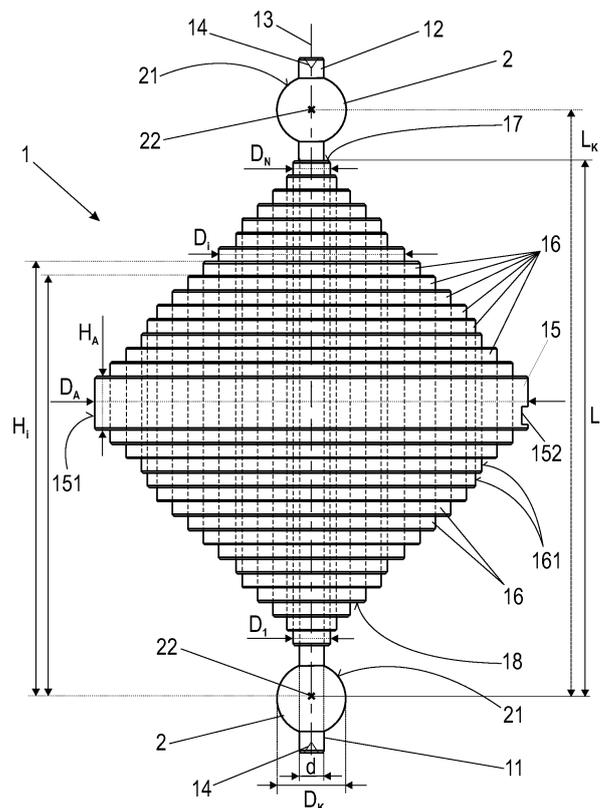
(54) Bezeichnung: **Kalibrierkörper und Verfahren zum Kalibrieren optischer Messeinrichtungen zum Messen rotierbarer Werkstücke**

(57) Hauptanspruch: Kalibrierkörper zum Kalibrieren einer optischen Messeinrichtung (3), insbesondere für rotierbare Objekte mit radialen Stirnflächen, aufweisend
- ein erstes und ein zweites zylinderförmiges Ende (11, 12) mit einem Durchmesser d und kegelförmigen Vertiefungen (14) zum drehbaren Einspannen des Kalibrierkörpers entlang einer Rotationsachse (13) in einer Messeinrichtung (3),
- eine Mehrzahl axial unmittelbar benachbart und koaxial angeordneter Zylinderabschnitte (15, 16) mit verschiedenen vorgewählten Durchmessern D_j und vorgewählten Höhen H_i , die eine Stufenwelle (1) bilden, dadurch gekennzeichnet, dass

.. ein mittlerer Zylinderabschnitt (15) zwischen dem ersten und zweiten Ende (11, 12) der Stufenwelle (1) angeordnet ist, der einen größten Durchmesser D_A aufweist,

.. weitere Zylinderabschnitte (16) mit stufenweise kleiner werdenden Durchmessern D_j zu beiden Seiten des mittleren Zylinderabschnitts (15) die treppenförmig nach außen abfallende Stufenwelle (1) bilden, und

.. ein separater kugelförmiger Abschnitt (2) koaxial mindestens am ersten oder am zweiten Ende (11, 12) der Stufenwelle (1) angeordnet ist, der einen Durchmesser D_K aufweist, für den gilt $d < D_K \leq D_A$.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Kalibrierkörper und ein Verfahren zum Kalibrieren optischer Messeinrichtungen, insbesondere für Präzisionsmessmaschinen zum Messen rotierbarer Werkstücke mit zu messenden Abständen radialem Stirnflächen.

[0002] Messeinrichtungen, mit denen rotierbare Werkstücke vermessen werden können, sind häufig unter der Bezeichnung Wellenmessmaschinen oder Wellenmessgerät bekannt. Im Wesentlichen verwenden diese Messeinrichtungen ein mechanisches und/oder ein optisches Messprinzip. Das optische Messprinzip basiert zumeist auf der Messung eines Schattenbildes des Werkstücks, das mittels einer geeigneten telezentrischen Beleuchtung erzeugt und mittels eines geeigneten Sensors erfasst wird.

[0003] Wie bei jedem anderen Messprinzip ist auch die optische Messung von den Zuständen in der Messumgebung abhängig. Je nach erforderlicher Messgenauigkeit können z. B. unterschiedliche Temperaturen, Lichtverhältnisse oder Unterschiede in der Abbildungsqualität der Optik einen mehr oder weniger starken Einfluss auf das Messergebnis haben. Hinzu kommen Einflüsse, die spezifisch für das Schattenmessprinzip an rotierbaren Werkstücken sind.

[0004] Im Stand der Technik wurden dafür spezielle Kalibrierkörper entwickelt, die zur Feststellung und Justage der Messabweichungen und/oder zur Ermittlung von Korrekturdaten für eine rechenstechnische Nachbereitung der Messdaten Verwendung finden. So ist beispielsweise in der DE 10 2011 050 036 B4 ein Konturnormal beschrieben, das mehrere nichtzylindrische Axialabschnitte, die konkav, konvex, unter Bildung eines definierten Winkels als Radialvorsprung oder -vertiefung ausgebildet sind, und dazwischen jeweils Zylinderabschnitte aufweisen, die zusammen den Kalibrierabschnitt darstellen. Dieses aufwändig anzufertigende Konturnormal eignet sich aufgrund seiner vielfältig gestalteten Axialabschnitte sowohl für taktile als auch optische Messgeräte.

[0005] Beim Schattenmessprinzip gibt es einen grundlegenden Unterschied zwischen dem Messen an zylindrischen Mantelflächen, wie z. B. Durchmessen von Zylindern und dem Messen an axialen Planflächen, wie z. B. Abständen zwischen Stirnflächen von Zylindern.

[0006] Zur Lösung dieses Problems ist in der DE 10 2012 104 008 B3 eine Messvorrichtung offenbart worden, bei der zusätzlich zur optischen Messeinheit, die mit Beleuchtungsmodul und gegenüber liegendem Kameramodul ein Schattenbild von rotationssymmetrischen Maschinenelementen aufnimmt, eine mechanische Messeinheit mit taktilem Messer zum Aufnehmen von axialen Messdaten auf-

weist und direkt an der optischen Messeinheit befestigt ist. Die Kalibrierung der gesamten Messeinheit erfolgt dann mittels der mechanischen Messeinheit, die an zwei axial gegenüberliegende Referenzflächen am Reitstock der rotierbaren Halterung des Maschinenelements die Ortsbezüge auch für die optische Messeinheit erfasst. Dadurch wird jedoch noch keine optische Messung von radial ausgerichteten Oberflächen an Rotationskörpern ermöglicht.

[0007] Eine weitere Druckschrift DE10 2015 106 920 A1 beschreibt einen Kalibrierkörper, der für die Anwendung des Schattenprojektionsverfahrens in einer Wellenmessmaschine, die wenigstens drei Kameras aufweist, vorgesehen ist. Dabei ist der Kalibrierkörper als ein scheibenförmiger Grundkörper ausgebildet mit einer Achse, die mit der Rotationssymmetrie einer zu vermessenden Welle zusammenfällt, und wenigstens eine radial ausgerichtete Stufe und einen axialen Antastvorsprung zur Bildung von mindestens je einer radialen und einer axialen Antastkante aufweist, um die relative Position der mindestens drei Kameras zueinander zu kalibrieren. Dabei bleibt die Problematik der begrenzten Schärfentiefe der Kameras für Kantenantastung außerhalb der Axialebene des Kalibrierkörpers ohne Erwähnung.

[0008] Die anzutastende Oberfläche von zylindrischen Mantelflächen befindet sich, zumindest bei rotationssymmetrischen Werkstücken, stets in einer Ebene mit der Rotationsachse des rotierbaren Werkstücks. In diese Ebene ist vorteilhaft auch die Messebene bzw. der die Messebene umgebende Telezentriebereich der Messeinrichtung gelegt, da in der Messebene die genaueste optische Abbildung erreicht werden kann. Innerhalb des Telezentriebereichs verhindert ein konstanter Abbildungsmaßstab der Messeinrichtung, dass bei einer nicht direkt in der Messebene befindlichen anzutastenden Oberfläche oder Kante keine weiteren Messabweichungen auftreten. Zu korrigierende Messabweichungen können erst dann verstärkt auftreten, wenn in der Messebene größere Entfernungen zwischen dem Antastpunkt und der Rotationsachse erreicht werden, da die Abbildungsqualität der Optik in den Randbereichen nachlässt.

[0009] Das optische Antasten von axialen Planflächen kann bei Stirnflächen von Zylindern grundsätzlich nicht in der Messebene erfolgen, da die in der Messebene liegende Kante der axialen Planfläche, aus der Sicht der Messeinrichtung, stets von einer Außenkante am Umfang der Stirnfläche verdeckt ist. Das Antasten muss deshalb an der Außenkante der Stirnflächen erfolgen, wobei der Abstand des dortigen Antastpunktes zur Messebene vom Durchmesser des Zylinders und von der in die Messebene projizierten Entfernung zur Rotationsachse des Werkstücks abhängig ist. Der Abstand zur Messebene ent-

spricht der halben Sehnenlänge der Stirnfläche am Antastpunkt und kann weit außerhalb des Telezentriebereichs liegen.

[0010] Beim Blick über eine Stirnfläche wird die Außenkante am Antastpunkt anders abgebildet als die Mantelfläche an einem Zylinder. In Abhängigkeit von der Sehnenlänge entstehen an der angetasteten Kante optische Verschiebungen. Je größer der Durchmesser der Stirnfläche und je kleiner die Entfernung zur Rotationsachse ist, desto mehr kann die angetastete Kante von der tatsächlichen Kante in der Messebene abweichen. Gegenüber der Messung an Mantelflächen erfordert die Messung an Stirnflächen daher eine Kompensation dieses Fehlers.

[0011] Die Kompensation kann durch Kalibrierung der Messeinrichtung mittels einer aus dem Stand der Technik bekannten Prüf-Normale bzw. spezieller Maßverkörperungen erfolgen. Für die rotierbaren Werkstücke eignen sich insbesondere Stufenwellen. Stufenwellen weisen eine Mehrzahl von Zylinderabschnitten unterschiedlicher Durchmesser auf. Beginnend an einem Ende der Stufenwelle nehmen die Durchmesser der Zylinderabschnitte in der ersten Hälfte bis zur Mitte der Stufenwelle stufenartig zu und ab der Mitte, in der zweiten Hälfte, symmetrisch zur ersten Hälfte wieder ab. Die genauen Durchmesser der Zylinderabschnitte und die Abstandsmaße zwischen deren Stirnflächen sind bekannt, sodass aus einem Vergleich der bekannten Durchmesser und Abstandsmaße mit den gemessenen Durchmessern und Abstandsmaßen Korrekturwerte ermittelt werden können. Die verschiedenen Durchmesser der Stufenwelle decken dafür den gesamten Messbereich der Messeinrichtung ab. Durch den symmetrischen Aufbau der Stufenwelle können die Stirnflächen jedes Durchmessers stets aus beiden Richtungen axial angetastet werden, sodass auch Unterschiede beim optischen Antasten der Kanten aus unterschiedlichen Antastrichtungen, die aus einem Restfehler bei der Justage der Optik entstehen, berücksichtigt werden können. Mittels der Stufenwelle können für jeden möglichen Antastpunkt Korrekturwerte für die zuvor beschriebenen Messfehler ermittelt werden.

[0012] Ein Nachteil der Kalibrierung mit dieser Art der Stufenwelle ist, dass sich die Antastpositionen der Zylinderabschnitte, aufgrund des symmetrischen Aufbaus, an voneinander beabstandeten Positionen befinden. Insbesondere zwischen den axialen Antastpositionen an den Stirnflächen der Zylinderabschnitte mit den kleineren Durchmessern ist ein relativ großer axialer Abstand zu überwinden. Durch diesen Abstand ist das Messergebnis zusätzlich von der Temperatur, bzw. der thermischen Längenänderung der Stufenwelle abhängig. Eine nicht ausreichende oder ungleichmäßige Temperierung der Stufenwelle führt zu einem zusätzlichen systematischen und

durchmesserabhängigen Fehler bei der Korrektur der bisher genannten Fehler.

[0013] Weiterhin wird bei der axialen Antastung eines Zylinderabschnitts aus entgegengesetzten Richtungen nur ein Korrekturwert für dieses Abstandsmaß ermittelt. Bei der Kalibrierung mit der bisher beschriebenen Stufenwelle wird dieser Korrekturwert zu gleichen Teilen auf die beiden Antastrichtungen aufgeteilt. Das entspricht jedoch nicht der Realität, da, wie zuvor beschrieben, das Antasten für beide Antastrichtungen unterschiedlich ist. Hinzu kommt, dass sich ein reales optisches System niemals absolut symmetrisch für beide Antastrichtungen justieren lässt. Verbleibende Restfehler der Optik verursachen weitere Unterschiede bei der Antastung der Stirnflächen aus entgegengesetzten Antastrichtungen.

[0014] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine neue Möglichkeit zur Kalibrierung einer optischen Messeinrichtung zu finden, die es gestattet, einen thermisch bedingten Fehleranteil des systematischen Fehlers der für axiale Abstandsmessungen üblichen Sehnenkorrektur bei Abständen zwischen Radialflächen (axialen Stirnflächen) von Zylinderabschnitten zu bestimmen und durch eine verbesserte Referenzbasis weitestgehend zu eliminieren. Eine erweiterte Aufgabe besteht darin, den thermisch bedingten Fehleranteil vom systematischen Antastfehler der axialen Abstandsmessung zu trennen.

[0015] Erfindungsgemäß wird die Aufgabe bei einem Kalibrierkörper zum Kalibrieren einer optischen Messeinrichtung, insbesondere für rotierbare Objekte mit axialen Messstirnflächen, aufweisend ein erstes und ein zweites zylinderförmiges Ende mit einem Durchmesser d und kegelförmigen Vertiefungen zum drehbaren Einspannen des Kalibrierkörpers entlang einer Rotationsachse in einer Messeinrichtung und eine Mehrzahl axial unmittelbar benachbart und koaxial angeordneter Zylinderabschnitte mit verschiedenen vorgewählten Durchmessern D_j und vorgewählten Höhen H_j , die eine Stufenwelle bilden, dadurch gelöst, dass ein mittlerer Zylinderabschnitt zwischen dem ersten und zweiten Ende der Stufenwelle angeordnet ist, der einen größten Durchmesser D_A aufweist, dass weitere Zylinderabschnitte mit stufenweise kleiner werdenden Durchmessern D_j zu beiden Seiten des mittleren Zylinderabschnitts die treppenförmig nach außen abfallende Stufenwelle bilden, und dass ein separater kugelförmiger Abschnitt koaxial mindestens am ersten oder am zweiten Ende der Stufenwelle angeordnet ist, der einen Durchmesser D_K aufweist, für den $d < D_K \leq D_A$ gilt.

[0016] Vorteilhaft weist der mittlere Zylinderabschnitt eine definierte Höhe H_A und alle weiteren Zylinderabschnitte davon stufenförmig zu- oder abnehmende Höhen H_j auf.

[0017] Bevorzugt weisen alle weiteren Zylinderabschnitte gleiche Höhen H_j auf. Es kann aber auch zweckmäßig sein, dass alle Zylinderabschnitte unterschiedliche Höhen H_j aufweisen.

[0018] Es zeigt sich als vorteilhaft, dass alle Zylinderabschnitte unterschiedliche Durchmesser D_A und D_j aufweisen. Dabei ist es besonders bevorzugt, dass die weiteren Zylinderabschnitte, abgestuft gegenüber dem mittleren Zylinderabschnitt, paarweise abgestuft unterschiedliche Durchmesser D_j aufweisen.

[0019] In einer besonders vorteilhaften Ausführung der Stufenwelle ist je ein kugelförmiger Abschnitt mit gleichem Durchmesser D_K am ersten und am zweiten Ende der Stufenwelle angebracht.

[0020] Des Weiteren wird die Aufgabe der Erfindung durch ein Verfahren zum Kalibrieren eines von der Sehnenlänge abhängigen Antastfehlers sowie eines überlagerten thermisch bedingten Fehleranteils bei der optischen Antastung an axialen Messstirnflächen gelöst mit den Schritten:

- Einstellen und Halten konstanter Bedingungen für die Temperatur in der Messumgebung und die Reproduzierbarkeit der optischen Antastung,
- Fixieren eines Kalibrierkörpers in Form einer Stufenwelle mit mindestens einem kugelförmigen Referenzpunkt in einer optischen Messeinrichtung,
- optisches Antasten einer an einem kugelförmigen Abschnitt ausgebildeten Kugeloberfläche an einem ersten Ende der Stufenwelle und Errechnen des Kugelzentrums als Referenzpunkt entlang einer Rotationsachse,
- optisches Antasten einer an einem weiteren Zylinderabschnitt vorhandenen Messstirnfläche mit beliebiger Antastrichtung und mit einem Durchmesser D_i , der kleiner ist als der Durchmesser D_K des kugelförmigen Abschnitts mit $D_i \leq D_K$,
- Ermitteln des axialen Abstandes L zwischen dem Kugelzentrum am ersten Ende und der Messstirnfläche der Stufenwelle,
- Bestimmen einer Abweichung ΔL zwischen dem ermittelten Abstand L und einem bekannten Zertifikatswert der Stufenwelle für den Abstand L ,
- Berechnen eines auf jede axiale Position der Messeinrichtung normierten thermischen Korrekturfaktors aus der ermittelten Abweichung ΔL ,
- Bestimmung der Höhen H_i der Zylinderabschnitte, bezogen auf den kugelförmigen Abschnitt am unteren Ende der Stufenwelle,

- Vergleich der korrigierten Höhen H_i mit den Zertifikatswerten und Speichern der verbleibenden Längenabweichungen als durchmesser- und antastrichtungsabhängige Korrekturwerte für die Messung von Höhen H_i an zu messenden Werkstücken.

[0021] In einer besonders vorteilhaften Variante des Verfahrens wird die erweiterte Aufgabenstellung der Bestimmung und separierten Korrektur eines thermisch bedingten Fehleranteils erfüllt durch die weiteren Schritte:

- optisches Antasten einer an einem weiteren kugelförmigen Abschnitt ausgebildeten Kugeloberfläche an einem zweiten Ende der Stufenwelle und Errechnen des Kugelzentrums als einen zweiten Referenzpunkt entlang einer Rotationsachse zur Bestimmung des thermisch bedingten Fehleranteils ohne systematische Antastfehler von Stirnflächen,
- Berechnen eines auf jede axiale Position der Messeinrichtung normierten thermischen Korrekturfaktoranteils aus der ermittelten thermischen Längenänderung der Stufenwelle zwischen den Kugelzentren,
- Anwendung des thermischen Korrekturfaktoranteils auf die Korrekturwerte der Höhen H_i zur separaten Berücksichtigung des thermischen Fehleranteils als von Antastrichtung unabhängigen Fehleranteil an den Korrekturwerten der thermisch bedingten und systematischen Antastfehler der Messstirnflächen.

[0022] Die Erfindung geht von der Grundüberlegung aus, dass der systematische Antastfehler von axialen Stirnflächen bei der Kalibrierung, d.h. bei der Bestimmung von Korrekturwerten nach der Methode der Sehnenkorrektur, stets von thermischen Fehleranteilen überlagert ist. Hauptinhalt der Erfindung ist die unabhängige Bestimmung der Korrekturwerte für Messstirnflächen in beiden Antastrichtungen. Die an den Messstirnflächen auftretenden Fehleranteile sind bei einer Antastung einer gekrümmten Fläche nicht vorhanden und können vollständig eliminiert werden, wenn die gekrümmte Fläche eine Punktsymmetrie aufweist. Die Position des Mittelpunkts einer Kugel kann daher ohne diesen Fehleranteil bestimmt werden und dient erfindungsgemäß als Bezugspunkt für alle Längenmaße (Höhen) von Zylinderabschnitten einer Stufenwelle. Ein kugelförmiger Abschnitt wird zu diesem Zweck an mindestens einem Ende der Stufenwelle an deren Schaft - als kleinstem zylindrischen Abschnitt - angebracht. In einer Schattenprojektion der zu kalibrierenden Messeinrichtung wird der kugelförmige Abschnitt als Kreis abgebildet und ein Kugelzentrum durch die Berechnung des Mittelpunkts eines Ausgleichskreises der Konturpunkte der Schattenprojektion bestimmt. Bei der Antastung der axialen Messstirnflächen der Zylinderabschnitte der

Stufenwelle sind dann die systematischen Antastfehler der ober- und unterseitigen Messstirnflächen zusammen mit einem überlagerten thermischen Fehleranteil ermittelbar und können als halbierte Gesamtfehler der gegenüberliegenden Antastungen gegenüber dem Stand der Technik deutlich genauer korrigiert werden.

[0023] Versieht man die Stufenwelle noch mit einem zweiten kugelförmigen Abschnitt an einem zweiten Ende der Stufenwelle, so lässt sich der thermisch bedingte Fehleranteil, der durch die thermische Längenänderung der Stufenwelle ergibt isoliert und sehr genau bestimmen. Die Verwendung von zwei kugelförmigen Abschnitten ermöglicht die Bestimmung dieses thermischen Fehleranteils mit signifikant höherer Genauigkeit, da die Antastung einer Referenzfläche nicht punktuell erfolgt, sondern mittels eines Ausgleichskreises über das Konturabbild des kugelförmigen Abschnitts und die daraus ermittelte Lage der jeweiligen Kugelzentren an zwei gegenüberliegenden Enden der Stufenwelle zwei hochgenaue Referenzpunkte ergeben. Durch diese Maßnahme kann der thermisch bedingte Fehleranteil vom systematischen Antastfehler bei der Antastung von Messstirnflächen separiert und getrennt korrigiert werden.

[0024] Mit der Erfindung wird eine neue Art der Kalibrierung einer optischen Messeinrichtung realisiert, die es gestattet, einen thermisch bedingten Fehleranteil des systematischen Fehlers der für axiale Abstandsmessungen üblichen Sehnenkorrektur bei Abständen zwischen axialen Stirnflächen (Radialflächen) von Zylinderabschnitten zu bestimmen und durch eine verbesserte Referenzbasis weitestgehend zu eliminieren. In einer erweiterten Ausführung der Erfindung ist es möglich, den thermisch bedingten Fehleranteil vom systematischen Antastfehler der axialen Abstandsmessung zu trennen und gezielt separat zu korrigieren.

[0025] Nachfolgend soll die Erfindung anhand eines Ausführungsbeispiels näher erläutert werden. In den zugehörigen Zeichnungen zeigen:

Fig. 1 den prinzipiellen Aufbau eines Kalibrierkörpers als Stufenwelle als Stufenwelle aus definiert gestuften Zylinderabschnitten mit axialen Stirnflächen,

Fig. 2 den prinzipiellen Aufbau einer Messeinrichtung für die Anwendung der Stufenwelle und Ermittlung der Korrekturwerte mittels des Kalibrierverfahrens.

[0026] Der Kalibrierkörper in Form einer Stufenwelle **1** besteht prinzipiell, wie in **Fig. 1** gezeigt, aus einem zylinderförmigen ersten Ende **11** und einem zylinderförmigen zweiten Ende **12** gleichen Durchmessers, zwischen denen sich eine Rotationsachse **13** erstreckt. Zwischen dem ersten und zweiten Ende **11**

und **12** sind eine Mehrzahl unmittelbar benachbarter Zylinderabschnitte **15**, **16** mit bekannten, gegenüber den ersten und zweiten Enden **11**, **12** größeren Durchmessern D_j und mit bekannten axialen Positionen (Höhen H_i) ihrer Messstirnflächen **17**, **18** koaxial zur Rotationsachse **13** angeordnet. Ein mittlerer Zylinderabschnitt **15** ist mittig zwischen dem ersten und zweiten Ende **11** und **12** angeordnet und weist einen größten äußeren Durchmesser D_A auf. Alle weiteren Zylinderabschnitte **16** sind zu beiden Seiten des mittleren Zylinderabschnitts **15** - vorzugsweise symmetrisch - sich stufenweise zu den Enden **11** und **12** hin verkleinernd angeordnet.

[0027] Obwohl für die Grundvariante der Erfindung lediglich ein kugelförmiger Abschnitt **2** erforderlich ist, sind in diesem Beispiel, ohne Beschränkung der Allgemeinheit, am ersten Ende **11** und am zweiten Ende **12** koaxial jeweils kugelförmige Abschnitte **2** angeordnet. Eine Gleichheit der Durchmesser der kugelförmigen Abschnitte **2** ist vorteilhaft, weil damit für beide Antastrichtungen Korrekturwerte an den gleichen Stützstellen (Antastdurchmesser) ermittelt werden können.

[0028] Die Höhen der Stufen der weiteren Zylinderabschnitte **16** sind im Wesentlichen an den Fertigungsmöglichkeiten orientiert, wobei es in der Regel das Ziel ist, einen möglichst kompakten Kalibrierkörper (mit geringem Gewicht, geringer thermischer Trägheit, niedrigen Kosten und universeller Verwendbarkeit) anzufertigen. Die Höhe des mittleren Zylinderabschnitts **15** ist ebenfalls beliebig wählbar. Er wird etwas größer zu halten sein, um dort Hilfselemente, wie beispielsweise Beschriftung und Transportgriff anzubringen.

[0029] Das zylinderförmige erste und zweite Ende **11** bzw. **12** der in **Fig. 1** dargestellten Stufenwelle **1** weist einen Durchmesser d von 8 mm auf und ist jeweils 20 mm lang, wobei alle hier beschriebenen Abmessungen der Stufenwelle **1** nur die Größenverhältnisse verdeutlichen sollen und nicht erfindungswesentlich sind, da die Größe der Stufenwelle **1** stets auf die Dimension einer zu kalibrierenden Messeinrichtung **3** anzupassen ist.

[0030] Durch das erste und zweite Ende **11** und **12** verläuft die Rotationsachse **13** der Stufenwelle **1**. Am ersten und zweiten Ende **11** und **12** kann die Stufenwelle **1** rotierbar in der Messeinrichtung **3** aufgenommen und fixiert werden. Für eine Aufnahme zwischen Zentrierspitzen der Messeinrichtung **3** ist in den Stirnflächen des ersten und zweiten Endes **11** und **12** jeweils eine kegelförmige Vertiefung **14** eingebracht.

[0031] Die Aufnahme der Stufenwelle **1** in der Messeinrichtung **3** erfolgt vorteilhaft mit senkrecht orientierter Rotationsachse **13**, wie in **Fig. 2** schematisch gezeigt. Zur Vereinfachung wird in der weiteren Be-

schreibung (o.B.d.A.) davon ausgegangen, dass bei einer in der Messeinrichtung **3** aufgenommenen Stufenwelle **1** das erste Ende **11** nach unten und das zweite Ende **12** nach oben zeigt und in einer Werkstückhalterung **32** zwischen Zentrierspitzen **321** zentriert, und falls möglich rotierbar, eingespannt ist. Die Messeinrichtung **3** enthält entlang einer Linearführung **31** eine hier u-förmig gestaltete optische Messeinheit **33** mit links- und rechtsseitigen Armen, die einerseits eine Beleuchtungs- und andererseits eine Kameraeinheit (nicht dargestellt) aufweisen. Eine optische Achse **34** der Messeinheit **33** ist mittels der Linearführung **31** vertikal verfahrbar und schneidet die Rotationsachse **13** orthogonal. Die dazu horizontal zeilenförmig ausgedehnte Beleuchtungs- und Kameraeinheit ermöglicht die Antastung der Zylindermantelflächen **151** und **161**. Die vertikale Verfahrbarkeit der Messeinheit **33** ermöglicht die Erfassung der Höhen H_i der axialen Planflächen der Zylinderabschnitte **15** und **16**.

[0032] In der Mitte der Stufenwelle **1** befindet sich koaxial zur Rotationsachse **13** der mittlere Zylinderabschnitt **15**. Der mittlere Zylinderabschnitt **15** hat einen Durchmesser D_A von 140 mm und eine axiale Länge H_A von 15 mm. Eine in **Fig. 1** rechts sichtbare Vertiefung **152** dient zur Erkennung, ob die Stufenwelle **1** in der korrekten Position in die Messeinrichtung **3** eingesetzt wurde. Auf diese Winkelposition beziehen sich dann die Angaben eines Kalibrierzertifikats der Stufenwelle **1**.

[0033] Zu beiden Seiten des mittleren Zylinderabschnitts **15** sind - ebenfalls koaxial - die weiteren Zylinderabschnitte **16** symmetrisch abgestuft angeordnet. Die weiteren Zylinderabschnitte **16** können - wie in **Fig. 1** durch gestrichelte Linien angedeutet - als „ineinandergeschachtelte Zylinder“ betrachtet werden, deren Durchmesser D_j sich, beginnend am mittleren Zylinderabschnitt **15** und fortgeführt bis zu den Enden **11** und **12** hin, durchschnittlich um jeweils 10 mm verkleinern. Die axiale Höhe H_i jedes weiteren Zylinderabschnitts **16** nimmt in diesem Beispiel um 8 mm symmetrisch zu, sodass zu beiden Seiten des mittleren Zylinderabschnitts **15** jeweils 4 mm breite Stufen mit paarweise gleichen Durchmessern D_j und mit jeweils entgegengesetzt orientierten Messstirnflächen **17** bzw. **18** ausgebildet sind. Die Dimensionierung der Stufen jedes weiteren Zylinderabschnitts **16** ist an die Ausführung **3** der konkreten Messeinrichtung anzupassen, wobei in der Regel eine gleichmäßige, hinreichend dichte Abdeckung des Messbereiches angestrebt wird.

[0034] Der weitere Zylinderabschnitt **16** mit dem kleinsten Durchmesser D_1 bzw. D_N grenzt jeweils an das erste und zweite Ende **11** und **12** der Stufenwelle **1** an, die jeweils einen Durchmesser d von 12 mm aufweisen. Die am ersten und zweiten Ende **11** und **12** angeordneten kugelförmigen Abschnitte **2** ha-

ben in diesem Beispiel einen Durchmesser D_K von 25 mm und weisen zu den Messstirnflächen **17** bzw. **18** des weiteren Zylinderabschnitts **16** mit dem kleinsten Durchmesser D_1 bzw. D_N jeweils eine Lücke auf.

[0035] Die Stufenwelle **1** ist aus Edelstahl hergestellt, kann aber auch aus anderen harten widerstandsfähigen Materialien bestehen, die den Anforderungen an Prüfmittel genügen, also formstabil, korrosions- und verschleißfest sind, wie z. B. einer Keramik.

[0036] Die in diesem Beispiel aus Edelstahl gefertigte Stufenwelle **1** wird einer Wärmebehandlung unterzogen, die eine hohe Formstabilität und eine geringe Korrosionsneigung sichert. Alle Oberflächen der Stufenwelle **1** sind geschliffen und geläppt und besitzen eine entsprechend hohe Oberflächengüte (wie optische Oberflächen).

[0037] Bei dem Verfahren zum Korrigieren von Messfehlern beim optischen Messen an radialen Planflächen rotierbarer Werkstücke (d. h. an axialen Stufen von Zylindern unterschiedlichen Durchmessers) werden in einem ersten Verfahrensschritt zunächst konstante Bedingungen in der Messumgebung eingestellt. Die Messumgebung umfasst vor allem die Stufenwelle **1** (Kalibrierkörper) und die Messeinrichtung **3** selbst. Zu den Bedingungen gehören vor allem geringe zeitliche und örtliche Temperaturgradienten (für maximale Genauigkeit Normtemperatur 20°C), Luftfeuchtigkeit unterhalb 60%, Staubbefreiheit und Erschütterungsfreiheit. Die Temperaturverhältnisse sind vorteilhaft entsprechend den Bedingungen, unter denen ein Prüflabor die Stufenwelle **1** zertifiziert hat, einzustellen.

[0038] Nach dem Einstellen der Bedingungen kann die Messeinrichtung **3** entsprechend diesen Bedingungen kalibriert werden. Dazu wird im nächsten Verfahrensschritt die Stufenwelle **1**, wie in **Fig. 2** gezeigt, in der optischen Messeinrichtung **3** aufgenommen und fixiert. Im Normalfall genügt das zentrierte Einspannen der Stufenwelle **1** mit den Vertiefungen **14** zwischen den Zentrierspitzen **321** der Messeinrichtung **3**, wobei eine Drehbarkeit vorteilhaft ist, um Mehrfachmessungen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit der ermittelten Korrekturwerte zu ermöglichen. In der Standardvariante des erfindungsgemäßen Verfahrens ist eine Drehung aber nicht erforderlich.

[0039] In den folgenden Verfahrensschritten wird die durch die temperaturabhängige thermische Ausdehnung entstandene Längenänderung der Stufenwelle **1** (d. h. die Änderungen der Höhen H_i der Zylinderabschnitte **15** und **16**) unter den eingestellten Bedingungen ermittelt. Dazu wird zunächst der kugelförmige Abschnitt **2** am ersten Ende **11** an mehreren Positionen der Kugeloberfläche **21** optisch angetastet. Aus

den Antastpunkten an der Kugeloberfläche **21** wird im Schattenabbild ein Ausgleichskreis errechnet, aus dem dann der Kreismittelpunkt als Kugelzentrum **22** ermittelt werden. Da sich die Antastpunkte der Kugeloberfläche **21** genau in einer durch die Rotationsachse **13** und einer orthogonal zur optischen Achse **34** aufgespannten Messebene befinden, kann das Antasten des kugelförmigen Abschnitts **2** mit größter Genauigkeit bzw. unter minimalem Einfluss von Messfehlern erfolgen.

[0040] Auf die gleiche Weise wird auch das Kugelzentrum **22** des kugelförmigen Abschnitts **2** am zweiten Ende **12** der Stufenwelle **1** ermittelt. Nach der Feststellung der Kugelzentren **22** beider kugelförmiger Abschnitte **2** wird der Abstand **L** zwischen den beiden Kugelzentren **22** ermittelt.

[0041] Als Bezugssystem für die Kalibrierwerte der Stufenwelle **1** genügt ein kugelförmiger Abschnitt **21** am ersten Ende **11** der Stufenwelle **1**, wenn man voraussetzt, dass kein thermisch bedingter Fehler auftritt oder man die thermisch bedingten Abweichungen als Anteil im systematischen Antastfehler in Kauf nimmt. Das Kugelzentrum **22** kann ohne den systematischen Fehler von etwaigen Stirnflächen ermittelt werden, Abstandsmaße vom Kugelmittelpunkt zu den Stirnflächen weichen dann genau um den Antastfehler an der jeweiligen Messstirnfläche **17** bzw. **18** vom wahren Wert ab. Diese Abweichung wird als Korrekturwert dem jeweiligen Antastdurchmesser der Zylinderabschnitte **15** bzw. **16** zugeordnet.

[0042] Der zweite kugelförmige Abschnitt **21** am zweiten Ende **12** der Stufenwelle **1** dient der Bestimmung und Korrektur des thermisch bedingten Fehlers. Er wird in gleicher Weise und somit mit den gleichen geringen Restfehlern angetastet, wie der erste kugelförmige Abschnitt **21**. Der Abstand der beiden Kugelzentren **22** ist also frei von systematischen Fehlern. Durch die Verwendung einer großen Zahl von Antastpunkten an jedem kugelförmigen Abschnitt **21** ist die Position der Kugelzentren **22** außerdem mit einer höheren Genauigkeit zu ermitteln, als die Antastpunkte an den Messstirnflächen **17** bzw. **18**.

[0043] Der mit der Messeinrichtung **3** ermittelte Abstand **L** des Kugelzentrums **22** zur Messstirnfläche **17** und den Messstirnflächen der weiteren Zylinderabschnitte **16** wird mit dem vom Prüflabor ermittelten Zertifikatswert der Stufenwelle **1** für den Abstand **L** verglichen. Eine sich aus beiden Abständen ergebende Differenz ΔL stellt die thermische Längenänderung der Stufenwelle **1** über den Abstand **L** dar und wird zum Berechnen eines thermischen Korrekturfaktors verwendet. Der thermische Korrekturfaktor ist positionsabhängig und wird für folgende Messung an der Stufenwelle **1** auf alle zwischen den kugelförmigen Abschnitten **2** liegenden Abstände **L** normiert, sodass für jede axiale Position der Stufenwelle

1 ein thermisch korrigierter Messwert bestimmt werden kann. Alle Maßangaben im Kalibrierzertifikat der Stufenwelle beziehen sich auf ein und dieselbe Kugel. Die zweite Kugel dient nur der Korrektur der thermisch bedingten Ausdehnung.

[0044] Der Korrekturfaktor ($\Delta L/L$) ist ein Faktor, der die Ausdehnung des Werkstücks beschreibt. Die Korrekturfaktoren ($\Delta L_i/L$) der einzelnen Längenmaße (Höhen H_i) sind längenabhängig. Bei der Messung werden zunächst Abstandsmesswerte (Höhen H_i) ohne die separierte Korrektur des thermischen Fehleranteils bestimmt und diese dann mit dem Korrekturfaktor beaufschlagt.

[0045] Das Kugelzentrum **22** wird als Bezugspunkt für die axialen Positionen der Messstirnflächen **17** bzw. **18** der weiteren Zylinderabschnitte **16** verwendet. Ausgehend vom Kugelzentrum **22** des kugelförmigen Abschnitts **2** am ersten Ende **11** der Stufenwelle **1** werden alle Höhen H_i der nach oben gerichteten Messstirnflächen **17** ermittelt. Das Antasten der Messstirnflächen **17** erfolgt entsprechend von oben.

[0046] Ausgehend vom Kugelzentrum **22** des kugelförmigen Abschnitts **2** am ersten Ende **11** der Stufenwelle **1** erfolgt das gleiche für die nach oben gerichteten Messstirnflächen **18** durch ein Antasten von unten.

[0047] Auf die mit der Messeinrichtung **3** ermittelten Höhen H_i kann nun der thermische Korrekturfaktor noch separat ermittelt werden. Dazu erfolgt die Ermittlung der Kugelzentren **22** des kugelförmigen Abschnitts **2** am ersten und am zweiten Ende **11** und **12** der Stufenwelle **1**. Der Abstand L_K der beiden Kugelzentren **22** wird ermittelt und mit einem zertifizierten Wert verglichen. Die dabei festgestellte Differenz kann daraufhin für jede Höhe D_j der Zylinderabschnitte **15** und **16** errechnet und normiert werden.

[0048] Anschließend können die um die thermische Längenausdehnung korrigierten Messwerte mit den vom Prüflabor ermittelten Zertifikatswerten der Höhen H_i der Zylinderabschnitte **15**, **16** verglichen werden. Die sich ergebenden Differenzen sind Abweichungen, die aufgrund des Restfehlers der justierten Optik entstehen, die für beide Antastrichtungen getrennt ermittelt werden. Aus den jeweiligen Differenzen wird für jede Antastrichtung ein optischer Korrekturfaktor ermittelt, mit dem die Messwerte entsprechend der Antastrichtung korrigiert werden.

[0049] Die Differenzen der Antastung für den entsprechenden Durchmesser der Zylinderabschnitte **15** und **16** in der entsprechenden Antastrichtung werden (je Zylinderdurchmesser und Richtung) werden als Korrekturwerte gespeichert, um sie dann bei der Messung von Werkstücken anzuwenden. Da bei der Messung an Werkstücken gewöhnlich nicht nur die

an der Stufenwelle **1** verwendeten Antastdurchmesser auftreten, müssen für andere Antastdurchmesser zwischen den an der Stufenwelle **1** ermittelten Korrekturwerten weitere Korrekturwerte interpoliert werden.

L Abstand (zwischen Kugelzentrum **22** und Messstirnfläche)

L_K Abstand zwischen den Kugelzentren **22**

Bezugszeichenliste

1	Stufenwelle
11	erstes Ende
12	zweites Ende
13	Rotationsachse
14	kegelförmige Vertiefung
15	mittlerer Zylinderabschnitt
151	Zylindermantelfläche
152	Vertiefung (im mittleren Zylinderabschnitt 15)
16	weiterer Zylinderabschnitt
161	Zylindermantelfläche
17	(obere) Messstirnfläche
18	(untere) Messstirnfläche
2	kugelförmiger Abschnitt
21	Kugeloberfläche
22	Kugelzentrum
3	Messeinrichtung
31	Linearführung
32	Werkstückhalterung
321	Zentrierspitze
33	optische Messeinheit
34	optische Achse (der optischen Messeinheit)
d	Durchmesser (des ersten und zweiten Endes 11 , 12)
D_A	Durchmesser (des mittleren Zylinderabschnitts 15)
D_i	Durchmesser (verschiedener Zylinderabschnitte)
D₁, D_N	Durchmesser (des jeweils kleinsten Zylinderabschnitts)
D_K	Durchmesser (des kugelförmigen Abschnitts 2)
H_A	Höhe (des mittleren Zylinderabschnitts 15)
H_i	Höhen (unterschiedlicher Zylinderabschnitte bezogen auf Kugelzentrum)

Patentansprüche

1. Kalibrierkörper zum Kalibrieren einer optischen Messeinrichtung (3), insbesondere für rotierbare Objekte mit radialen Stirnflächen, aufweisend
- ein erstes und ein zweites zylinderförmiges Ende (11, 12) mit einem Durchmesser d und kegelförmigen Vertiefungen (14) zum drehbaren Einspannen des Kalibrierkörpers entlang einer Rotationsachse (13) in einer Messeinrichtung (3),

- eine Mehrzahl axial unmittelbar benachbart und koaxial angeordneter Zylinderabschnitte (15, 16) mit verschiedenen vorgewählten Durchmessern D_i und vorgewählten Höhen H_i , die eine Stufenwelle (1) bilden, **dadurch gekennzeichnet**, dass

.. ein mittlerer Zylinderabschnitt (15) zwischen dem ersten und zweiten Ende (11, 12) der Stufenwelle (1) angeordnet ist, der einen größten Durchmesser D_A aufweist,

.. weitere Zylinderabschnitte (16) mit stufenweise kleiner werdenden Durchmessern D_i zu beiden Seiten des mittleren Zylinderabschnitts (15) die treppenförmig nach außen abfallende Stufenwelle (1) bilden, und

.. ein separater kugelförmiger Abschnitt (2) koaxial mindestens am ersten oder am zweiten Ende (11, 12) der Stufenwelle (1) angeordnet ist, der einen Durchmesser D_K aufweist, für den gilt $d < D_K \leq D_A$.

2. Kalibrierkörper nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass alle Zylinderabschnitte (15, 16) unterschiedliche Höhen H_i aufweisen.

3. Kalibrierkörper nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der mittlere Zylinderabschnitt (15) eine definierte Höhe H_A und alle weiteren Zylinderabschnitte (16) davon stufenförmig zu- oder abnehmende Höhen H_i aufweisen.

4. Kalibrierkörper nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass alle Zylinderabschnitte (15, 16) gleiche Höhen H_i aufweisen.

5. Kalibrierkörper nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass alle Zylinderabschnitte (15, 16) unterschiedliche Durchmesser D_A und D_i aufweisen.

6. Kalibrierkörper nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die weiteren Zylinderabschnitte (16), abgestuft gegenüber dem mittleren Zylinderabschnitt (15), paarweise unterschiedliche Durchmesser D_i aufweisen.

7. Kalibrierkörper nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass je ein kugelförmiger Abschnitt

(2) mit gleichem Durchmesser D_K am ersten und am zweiten Ende (11, 12) der Stufenwelle (1) angebracht ist.

8. Verfahren zum Kalibrieren eines von der Sehenlänge abhängigen Antastfehlers bei der optischen Antastung an axialen Planflächen rotierbarer Werkstücke mit den Schritten:

- Einstellen und Halten konstanter Bedingungen für die Temperatur in der Messumgebung und die Reproduzierbarkeit der optischen Antastung,
- Fixieren eines Kalibrierkörpers in Form einer Stufenwelle (1) mit mindestens einem kugelförmigen Referenzpunkt in einer optischen Messeinrichtung (3),
- optisches Antasten einer an einem kugelförmigen Abschnitt (2) ausgebildeten Kugeloberfläche (21) an einem ersten Ende (11) der Stufenwelle (1) und Errechnen des Kugelzentrums (22) als Referenzpunkt entlang einer Rotationsachse (13),
- optisches Antasten einer an einem weiteren Zylinderabschnitt (16) vorhandenen Messstirnfläche (17) mit beliebiger Antastrichtung und mit einem Durchmesser D_i , der kleiner ist als der Durchmesser D_K des kugelförmigen Abschnitts (2) mit $D_i \leq D_K$,
- Ermitteln des axialen Abstandes L zwischen dem Kugelzentrum (22) am ersten Ende (11) und der Messstirnfläche (17) der Stufenwelle (1),
- Bestimmen einer Abweichung ΔL zwischen dem ermittelten Abstand L und einem bekannten Zertifikatswert der Stufenwelle (1) für den Abstand L ,
- Berechnen eines auf jede axiale Position der Messeinrichtung (3) normierten thermischen Korrekturfaktors aus der ermittelten Abweichung ΔL ,
- Bestimmung der Höhen H_i der Zylinderabschnitte (15, 16), bezogen auf den kugelförmigen Abschnitt (2) am unteren Ende (11) der Stufenwelle (1),
- Vergleich der korrigierten Höhen H_i mit den Zertifikatswerten und Speichern der verbleibenden Längenabweichungen als durchmesser- und antastrichtungsabhängige Korrekturwerte für die Messung von Höhen H_i an zu messenden Werkstücken.

9. Verfahren nach Anspruch 8 mit den weiteren Schritten zur Bestimmung und Korrektur eines thermisch bedingten Fehleranteils:

- optisches Antasten einer an einem weiteren kugelförmigen Abschnitt (2) ausgebildeten Kugeloberfläche (21) an einem zweiten Ende (12) der Stufenwelle (1) und Errechnen des Kugelzentrums (22) als einen zweiten Referenzpunkt entlang einer Rotationsachse (13) zur Bestimmung des thermisch bedingten Fehleranteils ohne systematische Antastfehler von Stirnflächen,
- Berechnen eines auf jede axiale Position der Messeinrichtung (3) normierten thermischen Korrekturfaktoranteils aus der ermittelten thermischen Längenänderung der Stufenwelle (1) zwischen den Kugelzentren (22),
- Anwendung des thermischen Korrekturfaktoranteils auf die Korrekturwerte der Höhen H_i zur separaten Berücksichtigung des thermischen Fehleranteils als von Antastrichtung unabhängigen Fehleranteil an den Korrekturwerten der thermisch bedingten und systematischen Antastfehler der Messstirnflächen (17, 18).

raten Berücksichtigung des thermischen Fehleranteils als von Antastrichtung unabhängigen Fehleranteil an den Korrekturwerten der thermisch bedingten und systematischen Antastfehler der Messstirnflächen (17, 18).

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

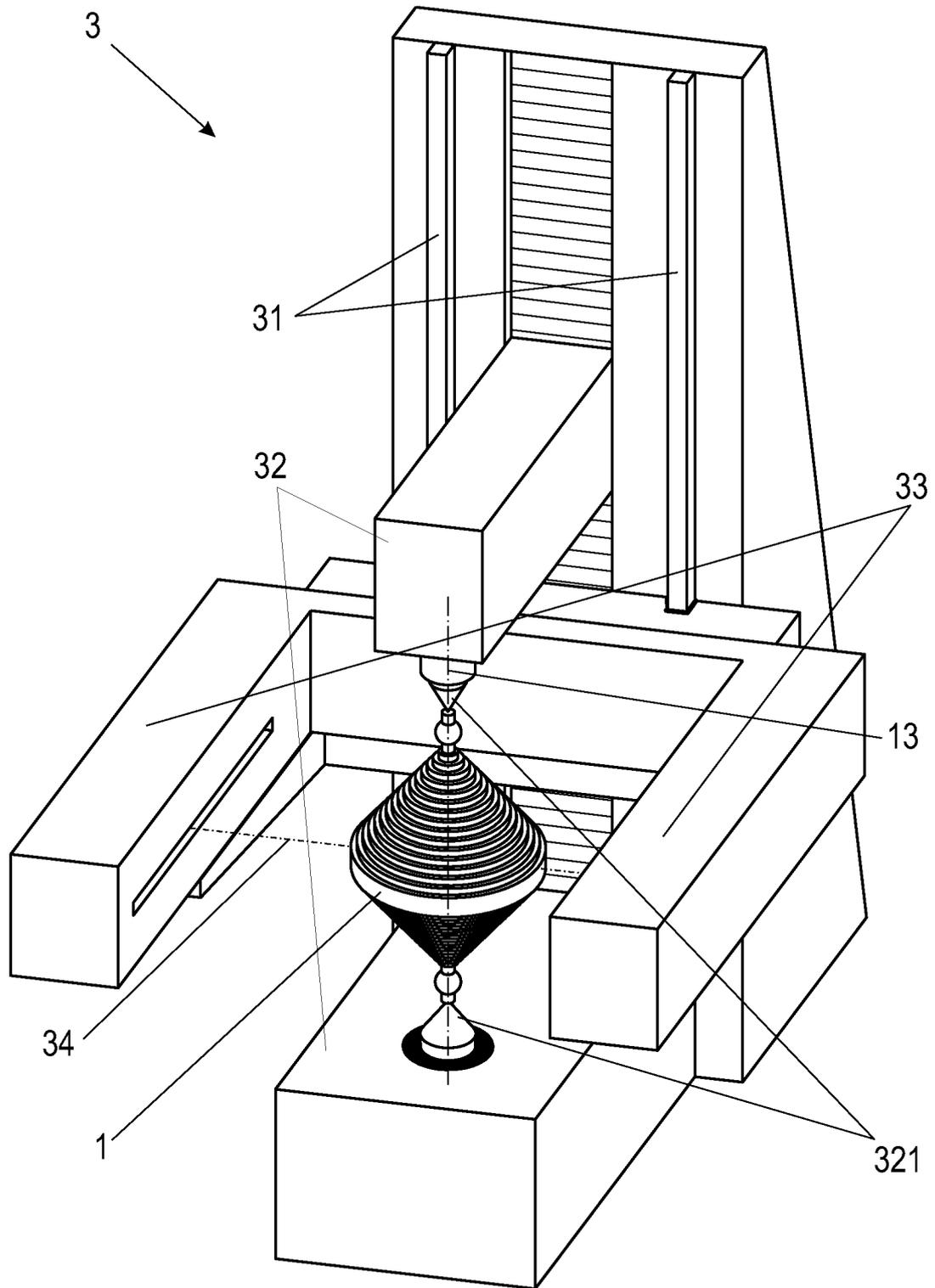


Fig. 2