



(10) **DE 10 2017 131 466 B4 2020.12.31**

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2017 131 466.0**
 (22) Anmeldetag: **29.12.2017**
 (43) Offenlegungstag: **04.07.2019**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **31.12.2020**

(51) Int Cl.: **G01B 11/24 (2006.01)**
G01B 21/20 (2006.01)
G01B 3/42 (2006.01)
G01B 11/08 (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; Kratsch, Nora,
07749 Jena, DE

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

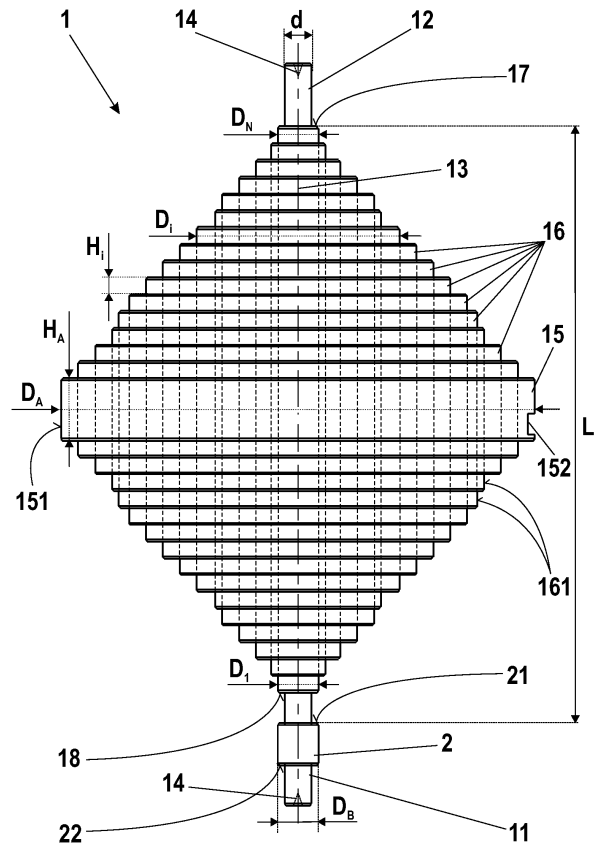
(56) Ermittelter Stand der Technik:

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

(54) Bezeichnung: **Etalon-Stufenwelle und Verfahren zum Kalibrieren optischer Messeinrichtungen**

(57) Hauptanspruch: Etalon-Stufenwelle zur Kalibrierung einer optischen Messeinrichtung, insbesondere einer Präzisionsmessmaschine für rotierbare Objekte, mit abgestuften radialen Stirnflächen, aufweisend

- ein erstes und ein zweites zylinderförmiges Ende (11, 12) mit einem Durchmesser d und kegelförmige Vertiefungen (14) zum Einspannen der Etalon-Stufenwelle entlang einer Rotationsachse (13) in der 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_j zu beiden Seiten des mittleren Zylinderabschnitts (15) die treppenförmig nach außen abfallende Stufenwelle (1) bilden, und
- ein separater Zylinderabschnitt als zylinderförmiger Bund (2) mit wenigstens einer freistehenden Referenzstirnflächen (21) am ersten oder zweiten Ende (11, 12) der Stufenwelle (1) angeordnet ist, der einen Durchmesser D_B aufweist, der mit einem Durchmesser D_N eines der entlang der Rotationsachse (13) außen liegenden weiteren Zylinderabschnitts (16) der treppenförmig nach außen abfallenden Stufenwelle (1) übereinstimmt.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Etalon-Stufenwelle mit radial abgestuften Stirnflächen und ein Verfahren zum Kalibrieren optischer Messeinrichtungen zum Messen rotierbarer Werkstücke, insbesondere für optische Präzisionsmessmaschinen.

[0002] Messeinrichtungen, mit denen rotierbare Werkstücke vermessen werden können, werden häufig auch unter den Bezeichnungen Wellenmessmaschine oder Wellenmessgerät geführt. Im Wesentlichen verwenden diese Präzisionsmessmaschinen ein mechanisches und/oder ein optisches Konturmessprinzip. Das optische Messprinzip basiert zu meist auf der Messung von Schatten des Werkstücks, die mittels einer geeigneten Beleuchtung erzeugt und mittels eines geeigneten Sensors erfasst werden.

[0003] Wie bei jedem anderen Messprinzip, ist auch die optische Präzisionsmessung 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 rechen-technische 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. Durchmessern von Zylindern, und dem Messen von Zylinderhöhen an radialen Planflächen, wie z. B. axialen 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 Mess-

taster zum Aufnehmen von axialen Messdaten aufweist 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. ein die Messebene umgebender Telezentriebereich der Messeinrichtung gelegt, da in der Messebene die genaueste optische Abbildung erreicht werden kann. Innerhalb des Telezentriebereichs garantiert 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 treten aber an zylindrischen Körpern häufig im Randbereich der Abbildung auf, wobei diese nicht per se vom Durchmesser des Werkstücks, sondern von der Verzeichnung des Objektivs, d. h. von der Lage einer Kante im Bild abhängig sind.

[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 Werk-

stücks abhängig ist. Der Abstand zur Messebene entspricht der halben Sehnenlänge der Stirnfläche am Antastpunkt und kann weit außerhalb des Telezentriebereichs liegen.

[0010] Beim Blick über eine axiale Stirnfläche des Prüfkörpers (z. B. eine Zylinderdeckfläche) wird die Außenkante am Antastpunkt anders abgebildet als die angetastete Seitenlinie der Mantelfläche an einem Zylinder. In Abhängigkeit von der Länge der Sehne, entlang der die optische Achse der Messeinrichtung (Visierlinie des Antastpunktes) die Stirnfläche überstreicht, entstehen an der angetasteten Kante optische Verschiebungen. Je größer der Durchmesser der Stirnfläche und je kleiner die Entfernung des in die Messebene projizierten Antastpunktes 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, die eine Mehrzahl von Zylinderabschnitten unterschiedlicher Durchmesser aufweisen. Beginnend an einem Ende der Stufenwelle nehmen die Durchmesser der Zylinderabschnitte in der ersten Hälfte bis zur Mitte der Stufenwelle treppenartig zu und in der zweiten Hälfte, ab dem größten Zylinderabschnitt in der Mitte, 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 Zylinderabschnitte der Stufenwelle decken den gesamten Messbereich der Messeinrichtung ab. Durch den symmetrischen Aufbau der Stufenwelle können die Stirnflächen jedes Durchmessers stets aus beiden Richtungen axial angetastet werden. Mittels der Stufenwelle können für jeden möglichen Antastpunkt Korrekturwerte für die zuvor beschriebenen Messfehler ermittelt werden. Dadurch, dass die beiden Stirnflächen bei ansonsten identischen Bedingungen aus beiden Richtungen angetastet werden, unterscheidet sich der gemessene Abstand der Stirnflächen um die Summe der Antastfehler in beiden Antastrichtungen vom bekannten wahren Wert des Abstandes.

[0012] Mit dem hier beschriebenen Stand der Technik zur Ermittlung von Korrekturwerten für axiale Antastflächen besteht keine Möglichkeit, die Antastfehler der beiden Richtungen zu trennen. Sie können nur

als identische Beiträge angenommen und hälftig für jede Seite in Ansatz gebracht werden.

[0013] Ein weiterer Nachteil der Kalibrierung (Korrekturwertermittlung) mit dieser kommerziellen 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 Zylinderstufen mit den kleineren Durchmessern ist ein relativ großer axialer Abstand vorhanden. 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.

[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 (Stirnflächen) von Zylinderabschnitten zu bestimmen und weitestgehend zu eliminieren.

[0015] Erfindungsgemäß wird die Aufgabe durch eine Etalon-Stufenwelle mit abgestuften radialen Stirnflächen zur Kalibrierung einer optischen Messeinrichtung, insbesondere einer Präzisionsmessmaschine für rotierbare Objekte, aufweisend ein erstes und ein zweites zylinderförmiges Ende mit einem Durchmesser d und kegelförmige Vertiefungen zum Einspannen der Etalon-Stufenwelle entlang einer Rotationsachse in der Messeinrichtung, eine Mehrzahl axial unmittelbar benachbart und coaxial 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,
- weitere Zylinderabschnitte mit stufenweise kleiner werdenden Durchmessern D_j zu beiden Seiten des mittleren Zylinderabschnitts die treppenförmig nach außen abfallende Stufenwelle bilden, und
- ein separater Zylinderabschnitt als zylinderförmiger Bund mit wenigstens einer freistehenden Referenzstirnflächen am ersten oder zweiten Ende der Stufenwelle angeordnet ist, der einen Durchmesser D_B aufweist, der mit einem

Durchmesser D_N eines der entlang der Rotationsachse außen liegenden weiteren Zylinderabschnitte der treppenförmig nach außen abfallenden Stufenwelle übereinstimmt.

[0016] Vorteilhaft weisen alle Zylinderabschnitte der Stufenwelle unterschiedliche Höhen H_i auf, um verschiedene Kalibrieraufgaben mit derselben Stufenwelle zu erfüllen. Dabei ist es zweckmäßig, dass der mittlere Zylinderabschnitt eine definierte Höhe H_A und alle weiteren Zylinderabschnitte eine davon verschiedene Höhe H_i aufweisen. Es kann aber auch vorteilhaft sein, wenn alle Zylinderabschnitte gleiche Höhen H_i aufweisen.

[0017] In einer ersten vorteilhaften Ausführung der Stufenwelle haben alle Zylinderabschnitte unterschiedliche Durchmesser D_A bzw. D_i . In einer besonders bevorzugten zweite Variante weisen die weiteren Zylinderabschnitte ausgehend von einem mittleren Zylinderabschnitt paarweise unterschiedliche Durchmesser D_j auf.

[0018] Des Weiteren wird die Aufgabe bei einem Verfahren zum Kalibrieren eines thermisch induzierten Fehleranteils beim optischen Messen an axialen Planflächen rotierbarer Werkstücke gelöst durch die folgende Schrittfolge:

- Einstellen und Halten konstanter Bedingungen für die Temperatur in der Messumgebung und die Reproduzierbarkeit der optischen Antastung,
- Fixieren der Stufenwelle in einer optischen Messeinrichtung,
- optisches Antasten einer an einem zylinderförmigen Bund ausgebildeten Referenzstirnfläche an einem ersten Ende der Stufenwelle,
- optisches Antasten einer an einem weiteren Zylinderabschnitt vorhandenen Messstirnfläche mit gleicher Antastrichtung mit gleichem Durchmesser D_N wie der zylinderförmige Bund,
- Ermitteln des Abstandes L zwischen der Referenzstirnfläche und der Messstirnfläche,
- Bestimmen der 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 ,
- Anwendung des errechneten positionsabhängigen thermischen Korrekturfaktors zur Bestimmung einer positionsabhängigen Gesamtkorrektur, mit dem die sich aus der Messung außerhalb

eines Telezentriebereichs der Messeinrichtung und der Antastung aus entgegengesetzter Antastrichtung ergebenden Fehleranteile korrigiert werden.

[0019] Vorteilhaft erfolgt das Fixieren der Stufenwelle in der optischen Messeinrichtung drehbar in einer rotierbaren Werkstückhalterung, um die Kalibrierung durch Mehrfachmessung zu verbessern.

[0020] Mit der Erfindung ist es möglich, die Kalibrierung einer optischen Messeinrichtung zu realisieren, mit der ein thermisch bedingter Fehleranteil des systematischen Fehlers der für axiale Abstandsmessungen üblichen Sehnenkorrektur bei Abständen zwischen Radialflächen (axialen Stirnflächen) von Zylinderabschnitten bestimmt und weitestgehend eliminiert werden kann.

[0021] Nachfolgend soll die Erfindung anhand eines Ausführungsbeispiels näher erläutert werden. In den zugehörigen Zeichnungen zeigen:

Fig. 1 den prinzipiellen Aufbau einer erfindungsgemäßen Etalon-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.

[0022] Die Etalon-Stufenwelle, nachfolgend kurz: Stufenwelle **1**, weist prinzipiell, wie in **Fig. 1** gezeigt, ein zylinderförmiges erstes Ende **11** und ein zylinderförmiges zweites Ende **12** gleichen Durchmessers d auf, die entlang einer Rotationsachse **13** die Stufenwelle **1** in ihrer Länge (Höhe) begrenzen. Das erste und das zweite Ende **11** und **12** weisen jeweils in den Endflächen eine kegelförmige Zentrierbohrung **14** auf, in die Spannelemente einer Messeinrichtung **3** (nur in **Fig. 2** gezeigt) zur Halterung der Stufenwelle **1** eingreifen können. Die Prüfwelle kann, aber muss nicht rotiert werden. Sie muss sich aber exakt in der Rotationsachse befinden, die zugleich auch die Messebene des Systems repräsentiert.

[0023] Zwischen dem ersten und zweiten Ende **11** und **12** sind eine Mehrzahl von Zylinderabschnitten **15**, **16** mit unterschiedlichen Durchmessern unmittelbar benachbart und koaxial zur Rotationsachse **13** angeordnet. Dabei weisen die Zylinderabschnitte **15**, **16** axial abgestufte Positionen von radialen kreisringförmigen Messstirnflächen **17** auf, die bis zu einem mittleren Bereich der Stufenwelle **1** mit ihren Flächennormalen kollinear in Richtung des ersten Endes **11** orientiert sind, und werden ab einem mittleren Zylinderabschnitt **15** abgeschlossen mit Positionen von entgegengesetzt abgestuften kreisringförmigen Messstirnflächen **18**, die nach dem mittleren Be-

reich der Stufenwelle **1** mit ihren Flächennormalen kollinear in Richtung des zweiten Endes **12** orientiert sind. Der im mittleren Bereich der Stufenwelle **1** zwischen dem ersten und zweiten Ende **11** bzw. **12** befindliche mittlere Zylinderabschnitt **15** weist den größten Außendurchmesser auf. Alle weiteren Zylinderabschnitte **16** sind zu beiden Seiten des mittleren Zylinderabschnitts **15** vorzugsweise symmetrisch und mit stufenweise zu den Enden **11** und **12** hin abnehmenden Durchmessern angeordnet. Am ersten Ende **11** ist zusätzlich ein zylinderförmiger Bund **2** mit mindestens einer zu den Zylinderabschnitten **15** und **16** der Stufenwelle **1** weisenden Referenzstirnfläche **21** angeordnet. Der Bund **2** weist einen Durchmesser D_B auf, der gleich dem Durchmesser D_N eines unmittelbar an das erste und zweite Ende angrenzenden weiteren Zylinderabschnitts **16** ist.

[0024] Das zylinderförmige erste und zweite Ende **11** und **12** der in **Fig. 1** dargestellten Stufenwelle **1** weist einen Durchmesser 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 an die Dimension einer zu kalibrierenden Messeinrichtung **3** bzw. an die Größe der zu prüfenden Messobjekte anzupassen ist.

[0025] Die Rotationsachse **13** verläuft durch das erste und das zweite Ende **11** und **12** der Stufenwelle **1**, sodass die Stufenwelle **1** in der Messeinrichtung **3** (nur in **Fig. 2** gezeigt), z. B. zwischen Zentrierspitzen einer Spannvorrichtung, drehbar fixiert werden kann. Die Aufnahme der Stufenwelle zwischen den Zentrierspitzen der Messeinrichtung **3** erfolgt in den Zentrierbohrungen **14**.

[0026] 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 Beschreibung (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 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 kreuzt die Rotationsachse **13**. Die dazu horizontal zeilenförmig ausgedehnte Beleuchtungs- und Kameraeinheit ermöglicht die An-tastung der Zylindermantelflächen **151** und **161**.

[0027] In der Mitte der Stufenwelle **1** befindet sich koaxial zur Rotationsachse **13** der mittlere Zylinderabschnitt **15**. Der mittlere Zylinderabschnitt **15** hat vorzugsweise einen Durchmesser D_A von 140 mm und eine axiale Höhe H_A von 15 mm. Eine in **Fig. 1** rechts zu sehende 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**.

[0028] 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 „ineinander geschachtelte“ Zylinder aufgefasst werden, sodass sich, beginnend am mittleren Zylinderabschnitt **15** und fortgeführt bis zu den Enden **11** und **12**, treppenförmig abgestufte weitere Zylinderabschnitte **16** mit paarweise gleichen Durchmessern beiderseits vom Zylinderabschnitt **15** anschließen. Dabei verkleinert sich der Durchmesser der weiteren Zylinderabschnitte **16** bei den oben gewählten Größenverhältnissen im Durchschnitt um jeweils 10 mm. Die axiale Höhe jedes der weiteren Zylinderabschnitte **16** nimmt vorzugsweise beidseitig symmetrisch um 4 mm zu, sodass bei Betrachtung der „ineinander geschachtelten Zylinder“ jeder „durchgehende Zylinder“ mit (um ca. 10 mm) verringertem Durchmesser um jeweils 8 mm weiter entfernte Messstirnflächen **17** und **18** aufweist.

[0029] Der weitere Zylinderabschnitt **16** mit dem kleinsten Durchmesser grenzt an das erste und zweite Ende **11** und **12** an und hat beispielweise einen Durchmesser von 12 mm. Am ersten Ende **11** der Stufenwelle **1** ist koaxial der zylinderförmige Bund **2** mit zwei gegenüberliegenden Referenzstirnflächen **21** und **22** ausgebildet. Der Durchmesser D_B des Bundes **2** entspricht vorzugsweise dem Durchmesser D_1 bzw. D_N des am ersten Ende **11** und am zweiten Ende **12** angrenzenden weiteren Zylinderabschnitts **16**, die beide denselben Durchmesser wie der Bund **2** aufweisen. Sinnvoll kann aber auch der übernächste Zylinderabschnitt **16** als Vorgabe für den maßgleich auszubildenden Bund **2** verwendet werden. In jedem Fall besitzt dabei der Bund **2** einen mit zwei weiteren Zylinderabschnitten **16** übereinstimmenden Durchmesser D_B sowie eine frei zugängliche Referenzstirnfläche **21**, deren Messstirnfläche **17** wie die eines nahe dem zweiten Ende **12** angeordneten weiteren Zylinderabschnitts **16** orientiert ist, und vorteilhaft eine Referenzstirnfläche **22**, deren Orientierung mit der Messstirnfläche **18** eines nahe dem ersten Ende **11** angeordneten weiteren Zylinderabschnitts **16** übereinstimmt. Für die Erfindung wesentlich ist, dass der Durchmesser des in der Zeichnung unten befindlichen Bundes **2** identisch ist mit einem Durchmesser D_1 einer Stufe (d.h. eines weiteren Zylinderabschnitts

16) in der oberen Hälfte der Stufenwelle **1**. Vorteilhaft wird am zweiten Ende **2** der kleinste Zylinderabschnitt **16** mit identischem Durchmesser zum Bund **2** ausgebildet, wodurch der längenabhängige Fehler am genauesten bestimmt werden kann. Für die mit der Erfindung beabsichtigte Korrektur des Temperatureinflusses werden die axialen Stirnflächen **17** und **21** verwendet.

[0030] Die Stufenwelle **1** ist vorzugsweise aus Edelstahl hergestellt, kann aber auch aus anderen harten widerstandsfähigen Materialien mit geringer Wärmeausdehnung bestehen. Die aus Edelstahl gefertigte Stufenwelle wird einer Wärmebehandlung unterzogen, die eine hohe Formstabilität und eine geringe Korrosionsneigung sichert. Alle Oberflächen (Zylindermantelflächen **151** und **161** sowie Messstirnflächen **17** und **18**) und die der Stufenwelle **1** sind geschliffen und geläppt und besitzen eine entsprechend hohe Oberflächengüte, wie sie bei optischen Oberflächen üblich ist.

[0031] Bei dem Verfahren zum Kalibrieren eines thermisch induzierten Fehleranteils beim optischen Messen an axialen Planflächen rotierbarer Werkstücke werden in einem ersten Verfahrensschritt zunächst konstante Bedingungen in der Messumgebung eingestellt. Die Messumgebung beinhaltet vor allem die Stufenwelle **1** (Etalon-Stufenwelle) und die zu kalibrierende Messeinrichtung **3** selbst. Zu den Bedingungen gehören vor allem konstante Temperaturverhältnisse. Die Temperaturverhältnisse sind vorteilhaft entsprechend den Bedingungen, unter denen ein Prüflabor die Stufenwelle **1** zertifiziert hat, einzustellen.

[0032] Nach dem Einstellen der konstanten 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 nicht erforderlich.

[0033] In den folgenden Verfahrensschritten wird die durch die temperaturabhängige thermische Ausdehnung entstandene Längenänderung der Stufenwelle **1** unter den eingestellten Bedingungen ermittelt. Dazu wird zunächst die Referenzstirnfläche **21** am ersten Ende **11** der Stufenwelle **1** optisch angetastet. Das Antasten erfolgt von oben.

[0034] Anschließend wird die Messstirnfläche **17** des weiteren Zylinderabschnitts **16** optisch angetastet, der an das zweite Ende **12** der Stufenwelle **1** angrenzt und den gleichen Durchmesser wie der Bund **2** aufweist. Das Antasten des Zylinderabschnitts **16** erfolgt ebenfalls von oben an der Messstirnfläche **17**. Aufgrund der gleichgroßen und gleich orientierten Messstirnflächen **17** und **21**, erfolgt das Antasten unter gleichen Bedingungen, sodass die beim Antasten auftretenden Fehler gleich groß sind und sich deshalb nicht auf den Messwert auswirken. Das heißt, dass die aus dem Antasten der Stirnfläche bei einer bestimmten Sehnenlänge resultierenden Fehleranteile identisch groß und gleich gerichtet sind und sich deshalb nicht auf den Messwert auswirken.

[0035] Bei den Stufenwellen des Standes der Technik (d.h. ohne die Stirnfläche **21**) konnte die thermische Ausdehnung nicht ermittelt werden und wurde fehlerhaft den zu korrigierenden, von der Sehnenlänge abhängigen Antastfehlern zugerechnet.

[0036] Bei der erfindungsgemäßen Stufenwelle **1** wird aus den zwei angetasteten Messwerten der Abstand **L** zwischen der Referenzstirnfläche **21** und der Messstirnfläche **17** ermittelt und eine Abweichung des ermittelten Abstandes **L** zu einem bekannten Zertifikatswert der Stufenwelle **1** für den Abstand **L** festgestellt und an jeder axialen Position der Messstirnflächen **17** und **18** der Zylinderabschnitte **15** und **16** für die Messeinrichtung **3** normierte thermische Korrekturfaktoren berechnet und gespeichert.

[0037] Für die Positionen aller Messstirnflächen (nicht nur für die ausgewählt bezeichnete obere und untere Messstirnfläche **17** bzw. **18**) werden proportional zu ihrem Abstand gegenüber der als Referenzstirnfläche dienenden oberen Messstirnfläche **17** Korrekturwerte aus der Abweichung des Abstandes **L** zu seinem Kalibrierwert abgeleitet. Die Messstirnfläche **17** bezeichnet insofern nur eine konkrete Planfläche, die hier stellvertretend für alle Planflächen (als Messstirnflächen) steht, bei denen eine Korrektur abgeleitet aus dem Abstand **L** gegenüber der oberen Referenzstirnfläche **21** des Bundes **2** berechnet wird.

[0038] Ein mit der Messeinrichtung **3** ermittelter Abstand **L** zwischen den beiden Stirnflächen, Referenzstirnfläche **21** und Messstirnfläche **17**, wird mit einem von einem Prüflabor ermittelten Zertifikatswert L_z der Stufenwelle **1** verglichen. Eine sich zwischen den beiden Werten von **L** und L_z ergebende Differenz stellt die thermische Längenänderung der Stufenwelle **1** über den Abstand **L** entlang der gesamten Stufenwelle **1** dar. Daraus wird anschließend ein Korrekturwert bezügl. der Messstirnfläche **17** und der Referenzstirnfläche **21** ermittelt und dieser Korrekturfaktor wird dann auf alle Längenmaße H_i zwischen korrespondierenden Messstirnflächen für die nachfolgenden Kalibriermessungen umgerechnet (normiert).

[0039] Die mit dem ermittelten Korrekturfaktor hinsichtlich der thermisch bedingten Ausdehnung korrigierten Längenmaße zwischen korrespondierenden Messstirnflächen **17**, **18**, ... werden mit den aus dem Kalibrierzertifikat der Stufenwelle **1** bekannten wahren Längenmaßen H_i verglichen. Die Abweichung wird als Korrekturwert für die Antastabweichung im System hinterlegt und bei Messungen angewendet.

Bezugszeichenliste

1	Stufenwelle
11	erstes Ende (der Stufenwelle 1)
12	zweites Ende (der Stufenwelle 1)
13	Rotationsachse
14	kegelförmige Vertiefung
15	mittlerer Zylinderabschnitt
151	Zylindermantelfläche (des mittleren Zylinderabschnitts)
16	weiterer Zylinderabschnitt
161	Zylindermantelfläche (weiterer
17	obere Messstirnfläche
18	untere Messstirnfläche
2	Bund
21	(obere) Referenzstirnfläche (des Bundes 2)
22	(untere) Referenzstirnfläche (des Bundes 2)
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)
D_B	Durchmesser (des zylinderförmigen Bundes 2)
D_N	Durchmesser (eines mit D_B übereinstimmenden weiteren Zylinderabschnitts 16)
H_A	Höhe (des mittleren Zylinderabschnitts 15)

H_i	Höhen (unterschiedlicher Zylinderabschnitte)
L	Abstand (von Referenz- und Messstirnfläche 21 und 17)

Patentansprüche

1. Etalon-Stufenwelle zur Kalibrierung einer optischen Messeinrichtung, insbesondere einer Präzisionsmessmaschine für rotierbare Objekte, mit abgestuften radialen Stirnflächen, aufweisend

- ein erstes und ein zweites zylinderförmiges Ende (**11**, **12**) mit einem Durchmesser d und kegelförmige Vertiefungen (**14**) zum Einspannen der Etalon-Stufenwelle entlang einer Rotationsachse (**13**) in der 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_j zu beiden Seiten des mittleren Zylinderabschnitts (**15**) die treppenförmig nach außen abfallende Stufenwelle (**1**) bilden, und

- ein separater Zylinderabschnitt als zylinderförmiger Bund (**2**) mit wenigstens einer freistehenden Referenzstirnflächen (**21**) am ersten oder zweiten Ende (**11**, **12**) der Stufenwelle (**1**) angeordnet ist, der einen Durchmesser D_B aufweist, der mit einem Durchmesser D_N eines der entlang der Rotationsachse (**13**) außen liegenden weiteren Zylinderabschnitte (**16**) der treppenförmig nach außen abfallenden Stufenwelle (**1**) übereinstimmt.

2. Etalon-Stufenwelle nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass alle Zylinderabschnitte (**15**, **16**) unterschiedliche Höhen H_i aufweisen, um verschiedene Kalibrieraufgaben mit derselben Stufenwelle zu erfüllen.

3. Etalon-Stufenwelle nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der mittlere Zylinderabschnitt (**15**) eine definierte Höhe H_A und alle weiteren Zylinderabschnitte (**16**) eine davon verschiedene Höhe H_j aufweisen.

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

5. Etalon-Stufenwelle nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass alle Zylinderabschnitte (**15**, **16**) unterschiedliche Durchmesser D_A und D_j aufweisen.

6. Etalon-Stufenwelle nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die weiteren Zylinderabschnitte (16) paarweise unterschiedliche Durchmesser D_j aufweisen.

7. Verfahren zum Kalibrieren eines thermisch induzierten Fehleranteils beim optischen Messen an axialen Planflächen rotierbarer Werkstücke mit den Schritten:

- a) Einstellen und Halten konstanter Bedingungen für die Temperatur in der Messumgebung und die Reproduzierbarkeit der optischen Antastung,
- b) Fixieren der Stufenwelle (1) in einer optischen Messeinrichtung (3),
- c) optisches Antasten einer an einem zylinderförmigen Bund (2) ausgebildeten Referenzstirnfläche (21) an einem ersten Ende (11) der Stufenwelle (1),
- d) optisches Antasten einer an einem weiteren Zylinderabschnitt (16) vorhandenen Messstirnfläche (17) mit gleicher Antastrichtung mit gleichem Durchmesser D_N wie der zylinderförmige Bund (2),
- e) Ermitteln des Abstandes L zwischen der Referenzstirnfläche (21) und der Messstirnfläche (17),
- f) Bestimmen der Abweichung ΔL zwischen dem ermittelten Abstand L und einem bekannten Zertifikatswert der Stufenwelle (1) für den Abstand L ,
- g) Berechnen eines auf jede axiale Position der Messeinrichtung (3) normierten thermischen Korrekturfaktors aus der ermittelten Abweichung ΔL ,
- h) Anwendung des errechneten positionsabhängigen thermischen Korrekturfaktors zur Bestimmung einer positionsabhängigen Gesamtkorrektur, mit dem die sich aus der Messung außerhalb eines Telezentriebereichs der Messeinrichtung (3) und der Antastung aus entgegengesetzter Antastrichtung ergebenden Fehleranteile korrigiert werden.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Schritt b) das Fixieren der Stufenwelle (1) in der optischen Messeinrichtung (3) drehbar erfolgt, um die Kalibrierung durch Mehrfachmessung zu verbessern.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

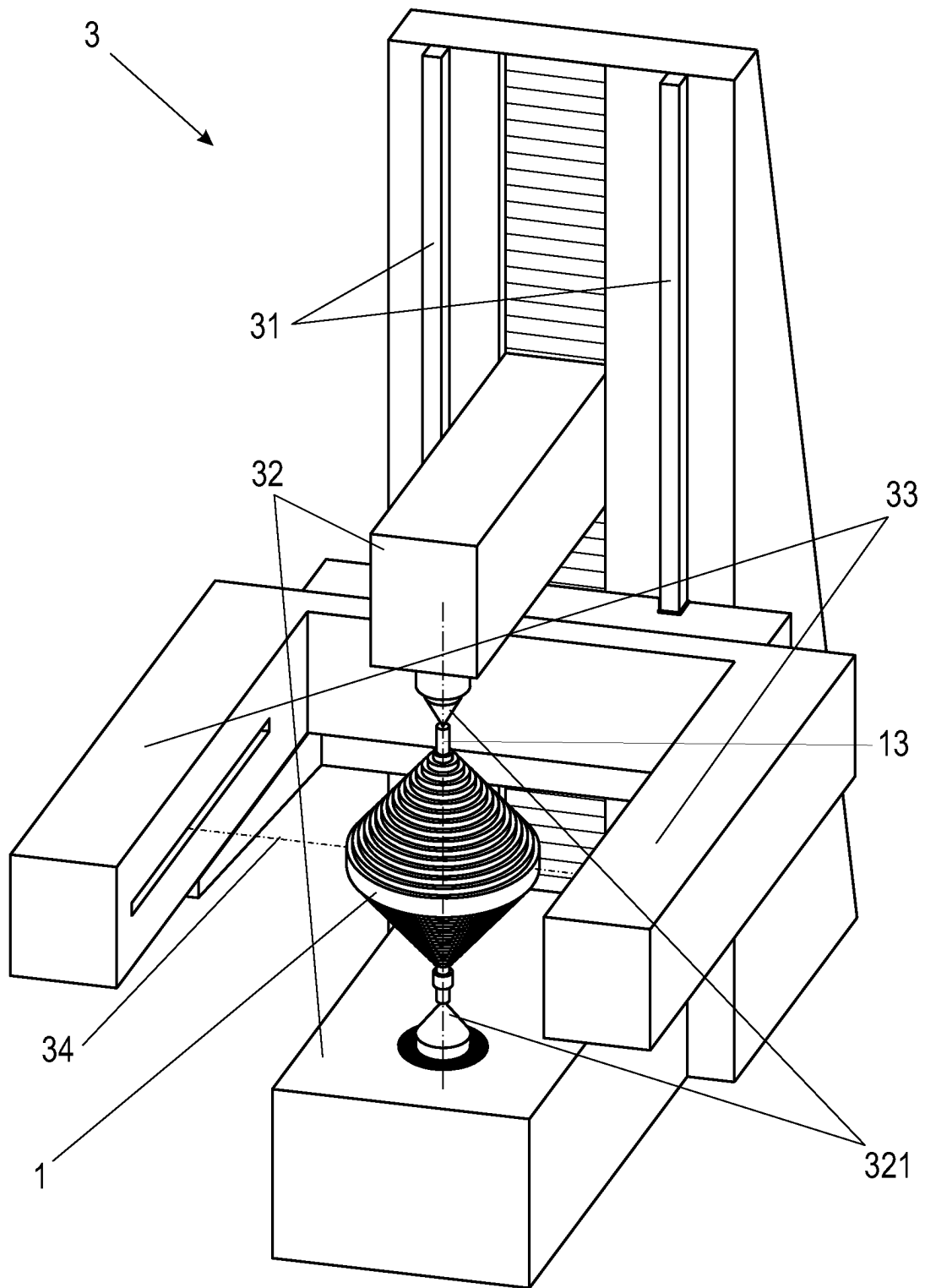


Fig. 2