



(10) **DE 10 2017 106 184 A1** 2018.09.27

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2017 106 184.3**
 (22) Anmeldetag: **22.03.2017**
 (43) Offenlegungstag: **27.09.2018**

(51) Int Cl.: **G01B 11/24 (2006.01)**
G01B 11/08 (2006.01)
G01B 9/02 (2006.01)
G01B 11/30 (2006.01)

(71) Anmelder:
**Bundesrepublik Deutschland, vertr. durch das
 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,
 dieses vertreten durch den Präsidenten der
 Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116
 Braunschweig, DE**

(72) Erfinder:
**Meeß, Rudolf, Dr., 38118 Braunschweig, DE;
 Drösemeier, Holger, 31226 Peine, DE**

(74) Vertreter:
**Gramm, Lins & Partner Patent- und
 Rechtsanwälte PartGmbB, 38122 Braunschweig,
 DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

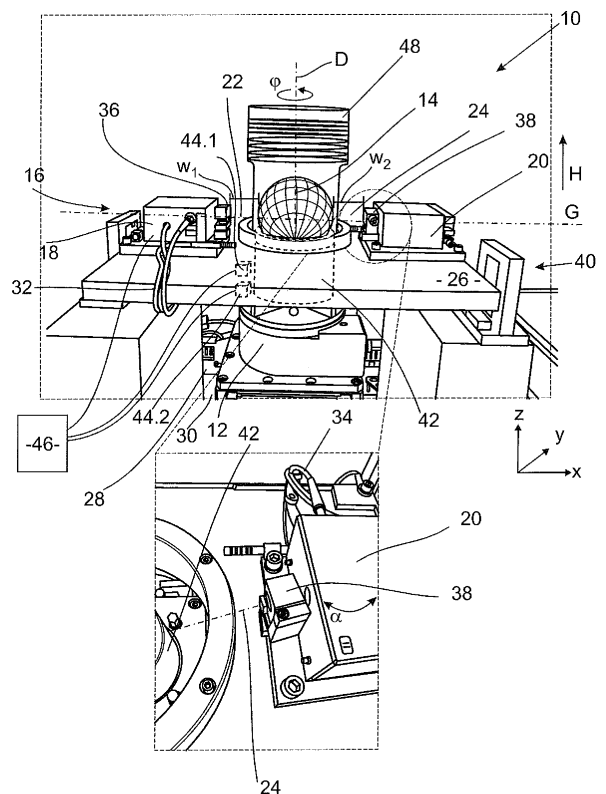
DE	10 2006 001 329	B4
DE	10 2005 023 467	A1
DE	11 2015 004 409	T5

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Messen einer Formabweichung einer Kugel und Kugel-Messvorrichtung dafür**

(57) Zusammenfassung:
 1. Verfahren zum Messen einer Formabweichung einer Kugel (14), mit den Schritten:
 (a) Richten eines ersten Laserstrahls (22) einer Interferometer-Vorrichtung (16) auf einen ersten Punkt auf der Kugeloberfläche (O) der Kugel (14),
 (b) Richten eines zweiten Laserstrahls (24) der Interferometer-Vorrichtung (16) auf einen zweiten Punkt auf der Kugeloberfläche (O) der Kugel (14),
 (c) Drehen der Kugel (14) um ihren Mittelpunkt und
 (d) Berechnen der Durchmesseränderung als Summe der Änderungen einer ersten Weglänge (w_1) des ersten Laserstrahls (22) und einer zweiten Weglänge (w_2) des zweiten Laserstrahls (24),
 (e) wobei der erste Laserstrahl (22) und der zweite Laserstrahl (24) kollinear und in Richtung auf den Mittelpunkt der Kugel (14) zu verlaufen.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Messen einer Formabweichung einer Kugel, insbesondere einer ultrapräzisen Kugel. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung eine Kugel-Messvorrichtung zum Messen einer Formabweichung einer solchen Kugel.

[0002] Ultrapräzise Kugeln sind solche Kugeln, bei denen der Formfehler höchstens 150 nm pro 10 cm Durchmesser beträgt. Vorzugsweise ist zudem die Mittenrauheit Ra kleiner als 10 nm, insbesondere kleiner als 1 nm. Derartige Kugeln werden beispielsweise dazu verwendet, die SI-Einheit Masse aus Naturkonstanten abzuleiten. Besteht die ultrapräzise Kugel beispielsweise aus Silizium, was eine bevorzugte Ausführungsform darstellt, so lässt sich deren Masse aus der Masse eines Siliziumatoms, der Gitterkonstanten sowie dem Volumen der Kugel berechnen. Zur Berechnung des Volumens mit hoher Genauigkeit ist es notwendig, dass die Formabweichung möglichst klein ist.

[0003] Um zu bestimmen, ob eine gegebene Kugel die Anforderungen an die Formgenauigkeit erfüllt, muss die Formabweichung ermittelt werden. Es hat sich als schwierig herausgestellt, die Formabweichung an ultrapräzisen Kugeln mit hinreichend hoher Genauigkeit zu bestimmen.

[0004] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Messung der Formabweichung bei Kugeln zu verbessern.

[0005] Die Erfindung löst das Problem durch ein Verfahren zum Messen einer Formabweichung einer Kugel mit den Schritten (a) Richten eines ersten Laserstrahls einer Interferometer-Vorrichtung auf einen ersten Punkt auf der Kugeloberfläche der Kugel, (b) Richten eines zweiten Laserstrahls der Interferometer-Vorrichtung auf einen zweiten Punkt auf der Kugeloberfläche der Kugel, (c) Drehen der Kugel um ihren Mittelpunkt und (d) Berechnen der Durchmesseränderung als Summe der Änderungen einer ersten Weglänge des ersten Laserstrahls und einer zweiten Weglänge des zweiten Laserstrahls, wobei (e) der erste Laserstrahl und der zweite Laserstrahl kollinear und in Richtung auf den Mittelpunkt der Kugel zu verlaufen.

[0006] Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch eine Kugel-Messvorrichtung zum Messen einer Formabweichung einer Kugel mit (a) einer Drehvorrichtung zum Drehen der Kugel und (b) einer Interferometer-Vorrichtung, die ausgebildet ist zum Abgeben eines ersten Laserstrahls auf einen ersten Punkt auf einer Kugeloberfläche der Kugel und eines zweiten Laserstrahls auf einen zweiten Punkt auf der Kugeloberfläche, wobei (c) die Drehvorrichtung

mechanisch von dem Interferometer entkoppelt ist.

[0007] Vorteilhaft an der erfindungsgemäßen Lösung ist, dass die Formabweichung der Kugel, insbesondere in Form einer Durchmesserschwankung, mit sehr hoher Genauigkeit gemessen werden kann. So sind Messgenauigkeiten von unterhalb von 10 nm für den Durchmesser erreichbar, so dass eine ultrapräzise Kugel ausmessbar ist. Es ist ein weiterer Vorteil, dass die Kugel-Messvorrichtung vergleichsweise einfach aufgebaut ist und daher eine robuste Messung erlaubt. Günstig ist zudem, dass kinematische Fehler, beispielsweise ein Taumeln der Drehachse, zu einem Kosinus-Fehler führt und daher in der Regel nicht kompensiert werden muss. Die primäre Messgröße, nämlich beispielsweise der Durchmesser, kann indirekt ermittelt werden.

[0008] Vorteilhaft ist zudem die geringe Baugröße in der Kugel-Messvorrichtung. Aufgrund der geringen Größe dauert ein Temperieren, was gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen ist, nur kurz. Das verkürzt die Messzeit. Wegen der kontaktlosen Messung wird zudem die - in der Regel teure - ultrapräzise Kugel geschont.

[0009] Durch die Entkopplung der Drehvorrichtung von den Interferometern haben externe Vibrationen zudem einen kleinen Einfluss auf das Messergebnis, was die Robustheit und Messgenauigkeit verbessert. Wegen der Einfachheit des Messprinzips kann beispielsweise die Durchmesserschwankung mit einer hohen räumlichen Auflösung erfasst werden.

[0010] Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter einer Formabweichung insbesondere eine Durchmesserschwankung verstanden.

[0011] Insbesondere werden die Laserstrahlen so auf die Kugeloberfläche gerichtet, dass sie dort senkrecht auftreffen. Unter einem senkrechten Auftreffen wird insbesondere verstanden, dass es möglich, nicht aber notwendig ist, dass der Winkel exakt 90° beträgt. Kleine Abweichungen sind möglich, insbesondere solange der reflektierte Laserstrahl sich mit dem einfallenden Laserstrahl überlagert. In anderen Worten wird der Durchmesser tatsächlich äquatorial gemessen.

[0012] Es ist möglich, nicht aber notwendig, dass die Interferometer-Vorrichtung zwei voneinander getrennte Interferometer aufweist. Getrennte Interferometer liegen dann vor, wenn die durch Interferieren erzeugten Schwebungs-Frequenzen sich ändern, wenn die Summe aus der ersten oder zweiten Weglänge konstant ist, sich aber die erste Weglänge ändert. Alternativ ist es möglich, dass die Interferometer-Vorrichtung nur ein Interferometer aufweist. In diesem Fall ändert sich die Schwebungs-Frequenz

nicht, wenn sich die erste Weglänge ändert, nicht aber die Summe der Weglängen.

[0013] Vorzugsweise wird das Berechnen der Durchmesseränderung kontinuierlich durchgeführt. In anderen Worten werden die erste und die zweite Weglänge kontinuierlich erfasst, beispielsweise zumindest einmal, vorzugsweise zumindest zehnmal, pro Sekunde. Vorzugsweise wird dann die Durchmesseränderung zumindest auch einmal pro Sekunde, insbesondere zumindest zehnmal pro Sekunde, aus den gemessenen Weglängen bestimmt.

[0014] Vorzugsweise werden der erste Laserstrahl und der zweite Laserstrahl mittels der Interferometer-Vorrichtung erzeugt und auf die Kugeloberfläche gerichtet, wobei das Drehen mittels einer Drehvorrichtung erfolgt, die von der Interferometer-Vorrichtung mechanisch entkoppelt ist.

[0015] Die Interferometer-Vorrichtung umfasst ein Interferometer. Unter dem Interferometer wird insbesondere eine Vorrichtung verstanden, die einen Strahlteiler und einen Ort aufweist, an dem zwei Lichtstrahlen zur Interferenz gebracht werden. Die Interferometer-Vorrichtung umfasst eine Lichtquelle zum Erzeugen eines Laserstrahls für das Interferometer, diese Lichtquelle kann Teil des Interferometers sein, dies ist aber nicht notwendig.

[0016] Vorzugsweise sind die Drehvorrichtung zum Drehen der Kugel und der Interferometer mechanisch entkoppelt. Hierunter ist es insbesondere zu verstehen, dass sich das Interferometer um höchstens 20 μm bewegt, wenn eine Kraft von 0,1 N auf die Kugel aufgebracht wird. Es ist unbeachtlich, in welche Richtung die Kraft auf die Kugel aufgebracht wird. Nur der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es durchaus möglich ist, dass die Lichtquelle nicht von der Drehvorrichtung mechanisch entkoppelt ist, obwohl dies vorteilhaft ist.

[0017] Vorzugsweise wirkt die Kugeloberfläche als Spiegel des Interferometers. Das ist möglich, weil die Oberflächengüte der ultrapräzisen Kugel so hoch ist, dass eine ausreichende Menge an Licht reflektiert wird.

[0018] Vorzugsweise weist die Interferometer-Vorrichtung ein erstes Auslassfenster auf, durch das der erste Laserstrahl austritt. Zudem weist die Interferometer-Vorrichtung ein zweites Auslassfenster auf, durch das der zweite Laserstrahl austritt. Ein erster Abstand zwischen der Kugeloberfläche einerseits und dem ersten Auslassfenster andererseits beträgt vorzugsweise weniger als 10 cm. Alternativ oder zusätzlich beträgt ein Abstand zwischen der Kugeloberfläche einerseits und dem zweiten Auslassfenster andererseits weniger als 10 cm. Auf diese Weise wird eine besonders hohe geringe Messunsicherheit

erreicht. Der erste Abstand kann der ersten Weglänge entsprechen und der zweite Abstand kann der zweiten Weglänge entsprechen.

[0019] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst das Verfahren die Schritte eines Drehens der Kugel um eine Drehachse, eines zeitabhängigen Messens einer Taumelbewegung der Drehachse und eines Bestimmens eines azimutalwinkelabhängigen Radius der Kugel aus der Taumelbewegung und der zeitabhängigen ersten Weglänge und/oder der zeitabhängigen zweiten Weglänge.

[0020] Das Messen der Taumelbewegung kann beispielsweise interferometrisch und/oder kapazitiv erfolgen. Dazu werden vorzugsweise die Messwerte von zwei Sensoren, die auf unterschiedlichen Höhen entlang der Drehachse angeordnet sind, erfasst und daraus zeitabhängig die Lage, und damit die Taumelbewegung, der Drehachse bestimmt. Auf diese Weise kann der lokale Radius in Abhängigkeit vom Azimutalwinkel bestimmt werden und nicht nur eine Durchmesserschwankung.

[0021] Günstig ist es, wenn die Kugel auf der Drehvorrichtung aufliegt. Insbesondere liegt die Kugel ungespannt auf der Drehvorrichtung, das heißt, dass lediglich die Gewichtskraft der Kugel diese auf der Drehvorrichtung hält. Eine zusätzliche Spannkraft wird in diesem Fall nicht angelegt. Das verhindert eine Deformation der Kugel.

[0022] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist an der Drehvorrichtung ein zylindermantelförmiger Abschnitt ausgebildet, dessen Längsachse einer Drehachse der Drehvorrichtung entspricht, wobei der zylindermantelförmige Abschnitt so angeordnet ist, dass die Längsachse durch einen Mittelpunkt der Kugel verläuft, wenn eine Kugel auf der Drehachse liegt.

[0023] Vorzugsweise besitzt die Kugel-Messvorrichtung eine Taumelmessvorrichtung zum Messen einer Taumelbewegung des zylindermantelförmigen Abschnitts um seine Längsachse. Aus dieser Taumelbewegung kann auf eine Taumelbewegung der Drehachse geschlossen werden, um die die Kugel dreht. Hieraus wiederum kann zusammen mit der ersten Weglänge und/oder der zweiten Weglänge auf einen azimutalwinkelabhängigen Radius der ultrapräzisen Kugel geschlossen werden.

[0024] Günstig ist es, wenn die Kugel-Messvorrichtung eine Auswertvorrichtung aufweist, die ausgebildet ist zum automatischen Berechnen der Durchmesseränderung als Summe der Änderungen der ersten und der zweiten Weglänge. Alternativ oder zusätzlich ist die Auswertvorrichtung ausgebildet zum automatischen Berechnen des azimutalwinkelabhängigen Radius aus der ersten Weglänge und/oder der zweiten Weglänge einerseits und einer momentanen

Lage der Drehachse, um die die Kugel dreht andererseits. Vorzugsweise besitzt die Kugel-Messvorrichtung eine Azimutalwinkel-Messvorrichtung zum Messen eines zeitabhängigen Azimutalwinkels zwischen der Kugel und dem zumindest einen Interferometer. Der Azimutalwinkel ändert sich, wenn die Kugel gedreht wird.

[0025] Die Kugel-Messvorrichtung ist vorzugsweise ausgebildet zum Messen der Durchmesser-schwankung mit einer Messunsicherheit von höchstens 10 nm. Vorzugsweise liegt ein Durchmesser der ultrapräzisen Kugel zwischen 1 cm und 25 cm.

[0026] Um den Einfluss von Temperaturschwankungen auf das Messergebnis möglichst klein zu halten, ist gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen, dass das Interferometer auf einer Unterlage angeordnet ist und ein Gehäuse aufweist, das aus einem Gehäusematerial besteht, dessen Wärmeausdehnungskoeffizient sich um höchstens 5% von einem Wärmeausdehnungskoeffizient des Unterlage-Materials der Unterlagen unterscheidet.

[0027] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigt:

Fig. 1 eine erfindungsgemäße Kugel-Messvorrichtung zum Messen einer Formabweichung einer ultrapräzisen Kugel,

Fig. 2 zeigt schematisch den Aufbau der Interferometer der Kugel-Messvorrichtung gemäß **Fig. 1** und

Fig. 3 ist ein Ergebnis-Ausdruck eines erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0028] **Fig. 1** zeigt eine erfindungsgemäße Kugel-Messvorrichtung **10** mit einer Drehvorrichtung **12** zum Drehen einer hochpräzisen Kugel **14**, die im vorliegenden Fall aus Silizium besteht. Die Kugel-Messvorrichtung **10** weist eine Interferometer-Vorrichtung **16** auf, die ein erstes Interferometer **18** und ein zweites Interferometer **20** besitzt. Das erste Interferometer **18** gibt beim Betrieb einen ersten Laserstrahl **22** auf die Kugel **14** ab, der von dort zurückreflektiert wird. Das zweite Interferometer **20** gibt einen zweiten Laserstrahl **24** auf die Kugel ab, der wie der erste Laserstrahl **22** senkrecht auf einer Kugeloberfläche **O** auf die Kugel **14** auftrifft. Die beiden Laserstrahlen **22**, **24** verlaufen kollinear, das heißt, dass sie sich entlang einer gemeinsamen Geraden **G** erstrecken.

[0029] Die Interferometer **18**, **20** sind auf einer Unterlage **26** angeordnet, die im vorliegenden Fall durch eine Platte gebildet ist. Eine Lichtquelle **28** der Interferometer-Vorrichtung **16** ist abseits der Unterlage **26** auf einem Unterbau **30** befestigt und versorgt das erste Interferometer **18** über einen ersten Lichtleiter **32** und das zweite Interferometer **20** mittels eines zweiten Lichtleiters **34** mit Laserlicht. Im vorlie-

genden Fall ist das Licht, das zum ersten Interferometer **18** geleitet wird, kohärent zu dem Licht, das zum zweiten Interferometer **20** geleitet wird. Das ist aber nicht notwendig.

[0030] Die Drehvorrichtung **12** ist ebenfalls auf dem Unterbau **30** befestigt und dreht beim Betrieb die Kugel **14** um eine Drehachse **D**. Das erste Interferometer **18** misst dabei eine erste Weglänge w_1 zwischen einem ersten Austrittsfenster **36** des ersten Interferometers **18**. Das zweite Interferometer **20** misst eine zweite Weglänge w_2 zwischen einem zweiten Austrittsfenster **38** des zweiten Interferometers **20** und der Kugel **14**.

[0031] Die Unterlage **26** ist hier als Granitplatte ausgebildet und ausschließlich mittels einer Dämpfvorrichtung **40** mit dem Unterbau **30** verbunden, so dass die Unterlage **26** vom Unterbau **30** mechanisch entkoppelt ist. In anderen Worten ist die Unterlage **26** im vorliegenden Fall über genau drei Auflagen, nämlich die Dämpfvorrichtungen **40**, mit dem Unterbau **30** verbunden. Auf diese Weise werden etwaige Schwingungen des Untergrunds, die sich auf den Unterbau **30** übertragen, nicht auf die Interferometer **18**, **20** übertragen. Die Interferometer **18**, **20** besitzen jeweilige Gehäuse, die aus einem Gehäusematerial gefertigt sind. Das Gehäusematerial ist beispielsweise Stahl oder Aluminium. Aus dem gleichen Material ist die Unterlage **26** gefertigt. So werden Spannungen zwischen den Gehäusen einerseits und der Unterlage **26** andererseits vermieden, wenn die Temperatur sich ändern sollte. Nicht eingezeichnet, ist eine Temperaturkonstanthaltevorrichtung der Kugel-Messvorrichtung **10**, die dazu ausgebildet ist, um eine Temperatur **T** der Komponenten der Kugel-Messvorrichtung konstant zu halten. Vorzugsweise ist eine Temperaturänderungsgeschwindigkeit $dT/dt \leq 0,1$ mK pro Sekunde.

[0032] Gestrichelt ist angezeichnet, dass die Kugel-Messvorrichtung einen zylindermantelförmigen Abschnitt **42** hat, der Teil einer Aufnahme für die Kugel **14** ist. Dreht die Drehvorrichtung **12** die Kugel **14**, so dreht sich der zylindermantelförmige Abschnitt **42** der Aufnahme um die gleiche Drehachse **D** die Kugel **14**. Zwei kapazitive Sensoren **44.1**, **44.2** sind auf unterschiedlichen Höhen **H** entlang der Drehachse **D** angeordnet. Die Höhe **H** entspricht im vorliegenden Fall einem Weg entlang der z-Achse. Durch die Sensoren **44.1**, **44.2**, bei denen es sich auch um optische Sensoren handeln kann, wird eine Taumelbewegung der Drehachse **O** bei Drehung um einen Azimutalwinkel φ erfasst. Die Sensoren **44.1**, **44.2** bilden so eine Azimutalwinkel-Messvorrichtung zum zeitabhängigen Messen des Azimutalwinkels φ .

[0033] Die Sensoren **44.1**, **44.2** sind wie die Interferometer **18**, **20** mit einer Auswertevorrichtung **46** verbunden. Die Auswertevorrichtung **46** ist zudem mit

einer Azimutalwinkel-Messvorrichtung, die Teil der Drehvorrichtung **12** ist, verbunden und berechnet automatisch in einem vorgegebenen Zeitpunkt t_i die Lage der Drehachse **D** daraus und aus den Weglängen w_1 , w_2 den Durchmesser $D(t_i)$ der Kugel **14** zum Zeitpunkt t_i . Diese Auswertung erfolgt kontinuierlich, so dass beispielsweise pro Sekunde **10** Messwerte t_i berechnet werden.

[0034] Fig. 2 zeigt schematisch den Aufbau der Interferometer **18**, **20**.

[0035] Fig. 3 zeigt schematisch einen Ergebnis-Ausdruck mit stark überhöhter Darstellung der Abweichung des tatsächlichen Durchmessers vom Soll-Durchmesser.

[0036] Fig. 1 zeigt schematisch, dass die Interferometer **18**, **20** mittels Stellschrauben in ihrer X- und Y-Position, also der Erstreckungsrichtung der Unterlage **26**, verschoben werden können. Das zweite Austrittsfenster **38** ist zusammen mit dem Interferometer **20** schwenkbar angeordnet ist, so dass ein Schwenkwinkel α des Laserstrahls **24** variiert werden kann. Das gleiche gilt für das Interferometer **18**. Die Interferometer **18**, **20** sind zudem in zwei Dimensionen verschieblich angeordnet, so dass die Laserstrahlen **22**, **24** justierbar sind.

[0037] Zur Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens werden zunächst die Interferometer **18**, **20** so justiert, dass die Laserstrahlen **22**, **24** exakt kollinear verlaufen.

[0038] Danach wird die Kugel **14** auf die Aufnahme gesetzt, so dass sie das in Fig. 1 gezeigte Bild ergibt.

[0039] Es ist möglich und stellt eine bevorzugte Ausführungsform dar, dass die Kugel **14** in einem Transporthalter **48** gehalten wird, der so ausgebildet ist, dass er auf der Unterlage **26** aufliegt, wenn die Kugel **14** auf ihrer Aufnahme liegt, wobei die Kugel **14** dann keinen Kontakt zum Transporthalter **48** hat. Auf diese Weise kommt die Kugel **14** beim Transport nur in Kontakt mit dem Transporthalter **48**, so dass keine Massenveränderung durch Fussel, Fingerabdrücke oder Abrieb zu befürchten ist. Bei der Messung dient der Transporthalter **48** als Schutzvorrichtung gegen Luftkonvektion.

[0040] Danach wird die Drehvorrichtung **12** betätigt, so dass sich der Azimutalwinkel φ kontinuierlich ändert. Zu einer Reihe von Zeitpunkten t_i wird der Azimutalwinkel $\varphi(t_i)$ ermittelt. Simultan dazu werden die erste und zweite Weglänge $w_1(t_i)$ und $w_2(t_i)$ bestimmt und daraus die Abhängigkeit des Durchmessers $D(t_i)$ berechnet. Optional dazu wird mittels der Sensoren **44.1**, **44.2** zudem der Taumelwinkel bestimmt und daraus der Radius $R(\varphi)$ berechnet.

Bezugszeichenliste

10	Kugel-Messvorrichtung
12	Drehvorrichtung
14	Kugel
16	Interferometer-Vorrichtung
18	erstes Interferometer
20	zweites Interferometer
22	erster Laserstrahl
24	zweiter Laserstrahl
26	Unterlage
28	Lichtquelle
30	Unterbau
32	erster Lichtleiter
34	zweiter Lichtleiter
36	erstes Austrittsfenster
38	zweites Austrittsfenster
40	Dämpfvorrichtung
42	Abschnitt
44	Sensor
46	Auswertevorrichtung
48	Transporthalter
φ	Azimutalwinkel
α	Schwenkwinkel
D	Drehachse
D	Durchmesser
H	Höhe
G	Gerade
O	Kugeloberfläche
t_i	Zeitpunkt
T	Temperatur
w_1	erste Weglänge
w_2	zweite Weglänge

Patentansprüche

1. Verfahren zum Messen einer Formabweichung einer Kugel (14), mit den Schritten:
 - (a) Richten eines ersten Laserstrahls (22) einer Interferometer-Vorrichtung (16) auf einen ersten Punkt auf der Kugeloberfläche (O) der Kugel (14),
 - (b) Richten eines zweiten Laserstrahls (24) der Interferometer-Vorrichtung (16) auf einen zweiten Punkt auf der Kugeloberfläche (O) der Kugel (14),
 - (c) Drehen der Kugel (14) um ihren Mittelpunkt und

(d) Berechnen der Durchmesseränderung als Summe der Änderungen einer ersten Weglänge (w_1) des ersten Laserstrahls (22) und einer zweiten Weglänge (w_2) des zweiten Laserstrahls (24),
 (e) wobei der erste Laserstrahl (22) und der zweite Laserstrahl (24) kollinear und in Richtung auf den Mittelpunkt der Kugel (14) zu verlaufen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- der erste Laserstrahl (22) und der zweite Laserstrahl (24) mittels der Interferometer-Vorrichtung (16) erzeugt und auf die Kugeloberfläche (O) gerichtet werden und
- das Drehen mittels einer Drehvorrichtung (12) erfolgt, die von der Interferometer-Vorrichtung (16) mechanisch entkoppelt ist.

3. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kugeloberfläche (O) als Spiegel der Interferometer-Vorrichtung (16) wirkt.

4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- die Interferometer-Vorrichtung (16) ein erstes Auslassfenster (36) aufweist, durch das der erste Laserstrahl (22) austritt,
- die Interferometer-Vorrichtung (16) ein zweites Auslassfenster (38) aufweist, durch das der zweite Laserstrahl (24) austritt, und dass
- ein erster Abstand (w_1) zwischen der Kugeloberfläche (O) einerseits und dem ersten Auslassfenster (36) andererseits kleiner ist als 10 Zentimeter und/oder
- ein zweiter Abstand (w_2) zwischen der Kugeloberfläche (O) einerseits und dem zweiten Auslassfenster (38) andererseits kleiner ist als 10 Zentimeter.

5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** die Schritte:

- (a) Drehen der Kugel (14) um eine Drehachse (D),
- (b) zeitabhängiges Messen einer Taumelbewegung der Drehachse (D) und
- (c) Bestimmen eines azimutalwinkelabhängigen Radius ($R(\varphi)$) der Kugel (14) aus der Taumelbewegung und der zeitabhängigen ersten Weglänge (w_1) und/oder der zeitabhängigen zweiten Weglänge (w_2).

6. Kugel-Messvorrichtung (10) zum Messen einer Formabweichung einer Kugel (14), mit

- (a) einer Drehvorrichtung (12) zum Drehen der Kugel (14) und
- (b) einer Interferometer-Vorrichtung (16), die ausgebildet ist zum Abgeben
 - eines ersten Laserstrahls (22) auf einen ersten Punkt auf einer Kugeloberfläche (O) der Kugel (14) und
 - eines zweiten Laserstrahls auf einen zweiten Punkt auf der Kugeloberfläche (O),

(c) wobei die Drehvorrichtung (12) mechanisch von der Interferometer-Vorrichtung (16) entkoppelt ist.

7. Kugel -Messvorrichtung (10) nach Anspruch 6, **gekennzeichnet durch**

- (a) einen zylindermantelförmigen Abschnitt (42), der an der Drehvorrichtung (12) ausgebildet ist und dessen Längsachse seiner Drehachse (D) entspricht und durch einen Mittelpunkt der Kugel (14) verläuft, und
- (b) eine Taumelmessvorrichtung zum Messen einer Taumelbewegung des zylindermantelförmigen Abschnitts um seine Längsachse.

8. Kugel -Messvorrichtung (10) nach einem der Ansprüche 6 oder 7, **gekennzeichnet durch** eine Azimutalwinkel-Messvorrichtung zum Messen eines zeitabhängigen Azimutalwinkels (φ) zwischen der Kugel und dem zumindest einen Interferometer.

9. Kugel -Messvorrichtung nach einem der Ansprüche 6 oder 7, **gekennzeichnet durch** eine Auswertvorrichtung, die ausgebildet ist zum automatischen Berechnen der Durchmesseränderung als Summe der Änderungen einer ersten Weglänge (w_1) des ersten Laserstrahls (22) und einer zweiten Weglänge (w_2) des zweiten Laserstrahls (24).

10. Kugel -Messvorrichtung (10) nach einem der Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie ausgebildet ist zum Messen der Durchmesser-schwankung mit einer Messunsicherheit von höchstens 10 Nanometer.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

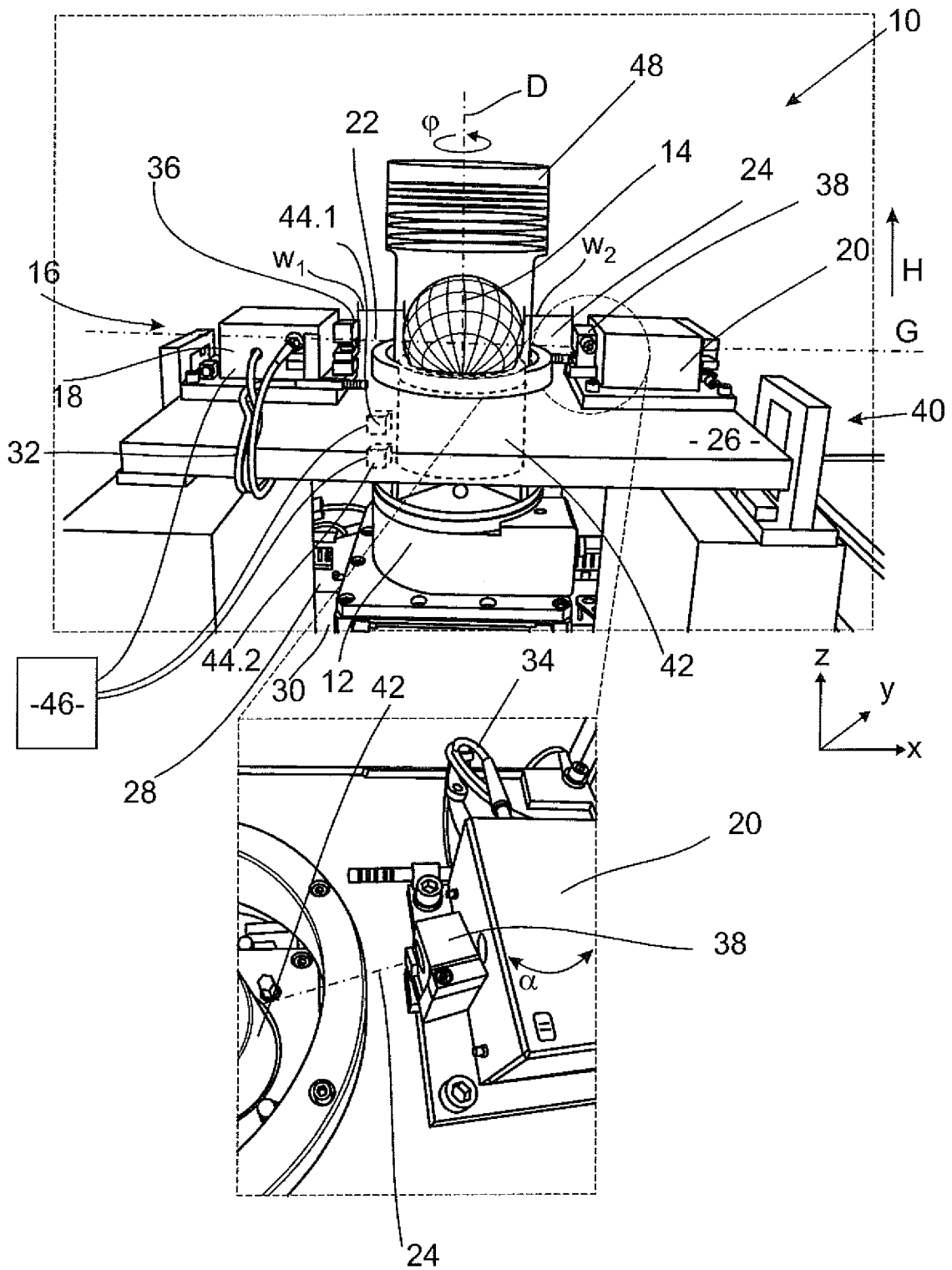


Fig. 1

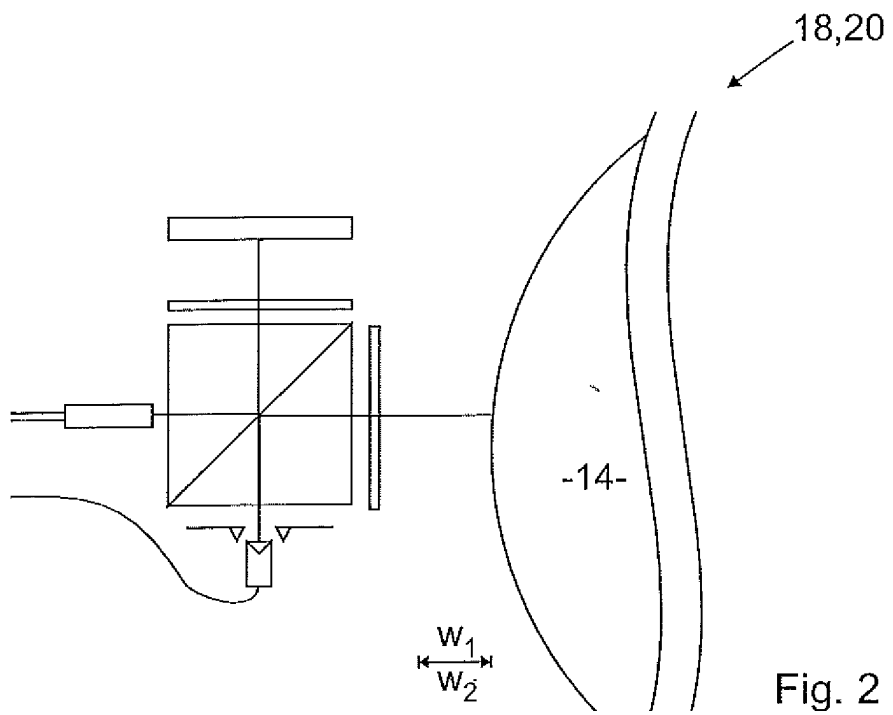


Fig. 2

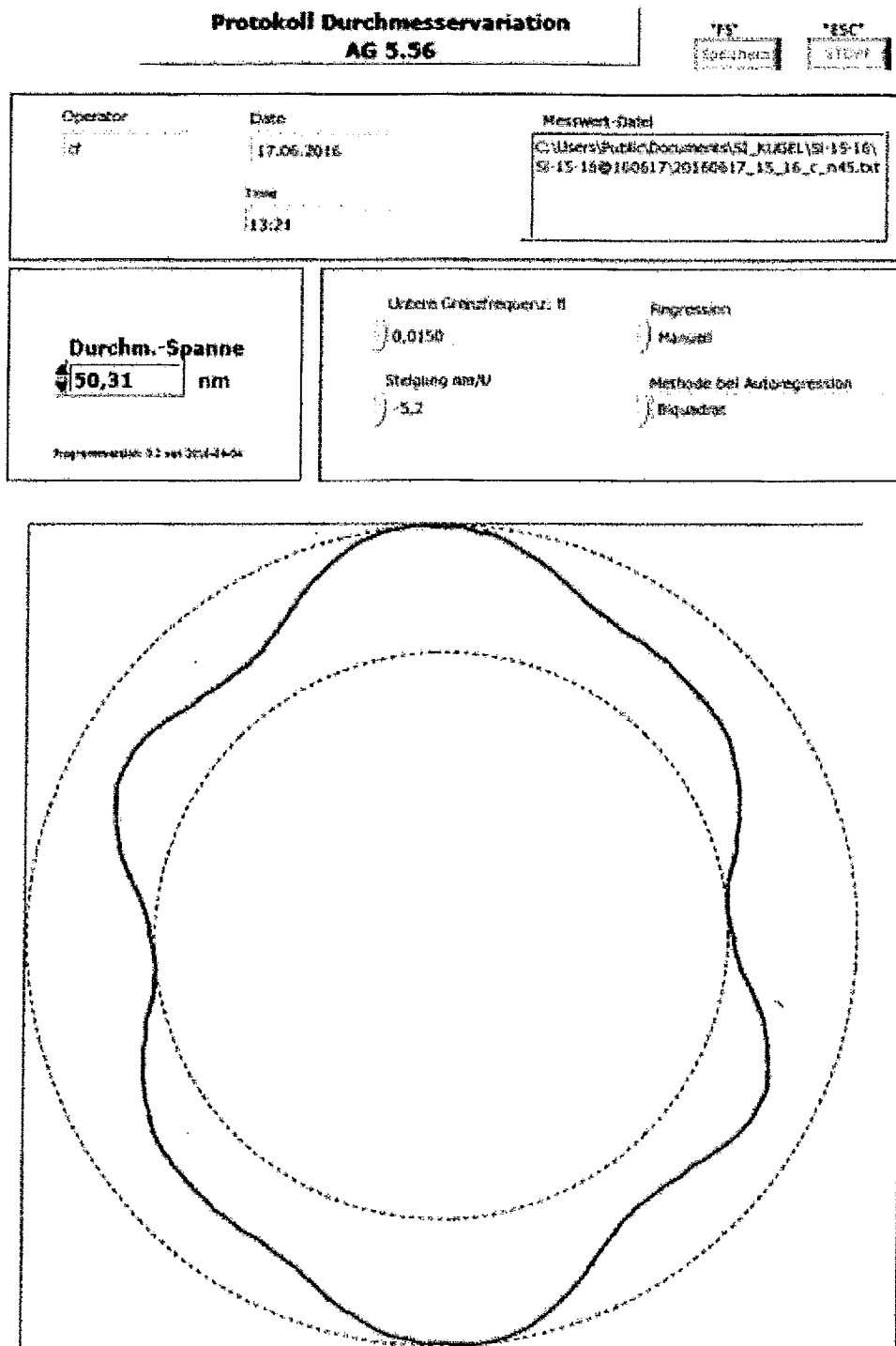


Fig. 3