



(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2016 110 453.1

(51) Int Cl.: G01B 21/04 (2006.01)

(22) Anmeldetag: 07.06.2016

G01B 5/008 (2006.01)

(43) Offenlegungstag: 07.12.2017

G01B 11/03 (2006.01)

(71) Anmelder:

Carl Mahr Holding GmbH, 37073 Göttingen, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US 2011 / 0 258 867 A1

(74) Vertreter:

Rüger, Barthelt & Abel, 73728 Esslingen, DE

TTR001M - Tip, Tilt, and Rotation Stage,

Thorlabs GmbH, Technische Zeichnung,

URL: https://www.thorlabs.com/drawings/e14377ea429f6270-A948C507-5056-2306-D92B0F3D63611662/TTR001_M-AutoCADPDF.pdf [abgerufen am 11.04.2017],

Veröffentlichungsvermerk in der Zeichnung:

29.08.2012

(72) Erfinder:

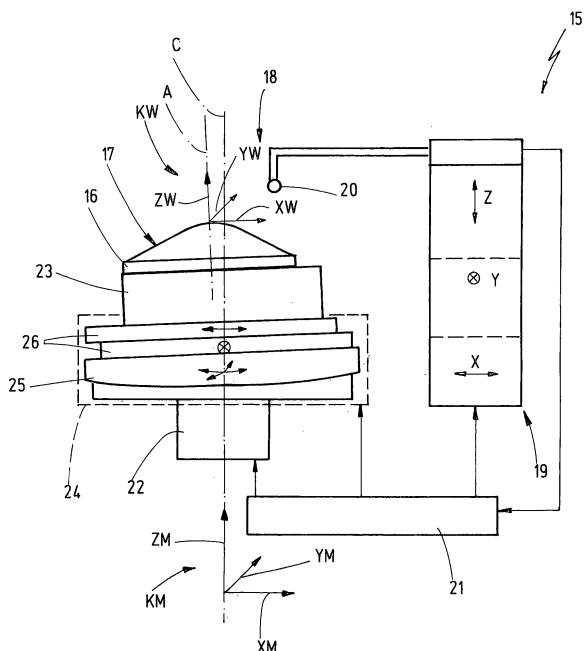
Wiegmann, Axel, Dr., 07607 Eisenberg, DE; Mika, Stefan, 07745 Jena, DE; Kurch, Ralf, 99098 Erfurt, DE

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: Messgerät und Verfahren zur Justage der Lage eines rotationssymmetrischen Werkstücks

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren und ein Messgerät (15), das zur Justage einer Lage eines Werkstücks (16) mit einer gekrümmten verlaufenden oberen Fläche (17) in Bezug auf eine Drehachse (C) des Messgerätes (15) eingerichtet ist. Das Werkstück (16) wird mit einem Werkstückträger (23) in eine erste Drehlage (c_1) gebracht. Innerhalb einer Messebene wird eine Mehrzahl von Messpunkten auf der oberen Fläche (17) aufgenommen. Das Werkstück (16) wird in eine weitere Drehlage (c_2) um die Drehachse (C) gebracht, und es werden erneut Messpunkte in der Messebene (E) auf der oberen Fläche (17) des Werkstücks (16) aufgenommen. Aus den aufgenommenen Messpunkten kann die Istlage (L_i) des Werkstücks (16) sowie die Abweichung von der vorgegebenen Solllage (L_s) ermittelt werden. In der Solllage (L_s) wird die Symmetriearchse (A) des Werkstücks (16) in Übereinstimmung mit der Drehachse (C) gebracht. Hierfür werden Justageparameter, beispielsgemäß ein Kippwinkel (y) und eine Verschiebung (t) ermittelt und eine Justageanordnung (24) des Messgerätes (15) abhängig von den berechneten Justageparametern angesteuert, um das Werkstück (16) zu justieren.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Justage der Lage eines rotationssymmetrischen Werkstücks mit einer gekrümmten oberen Fläche in einem Messgerät sowie ein Messgerät zur Durchführung des Verfahrens.

[0002] US 4 731 934 A beschreibt ein Messgerät mit einem um eine Drehachse drehbaren Werkstückträger. Zur Messung wird der Werkstückträger mit dem darauf angeordneten Werkstück gedreht. Für eine genaue Messung ist es dabei von Bedeutung, die Achse des Werkstücks mit der Drehachse in Übereinstimmung zu bringen. Das Messgerät dient zur Vermessung von länglichen Werkstücken mit einer zylindrischen Mantelfläche. In Richtung der Drehachse wird mit Abstand oben und unten am Werkstück eine Messung in Umfangsrichtung an der Mantelfläche des Werkstücks vorgenommen. Daraus kann die Abweichung der Achse des Werkstücks gegenüber der Drehachse ermittelt werden und eine entsprechende Positionierung des Werkstückträgers erfolgen. Dieses Verfahren eignet sich nur für Werkstücke mit einer ausreichenden hohen Mantelfläche in Richtung der Drehachse. Rotationssymmetrische Körper wie Linsen, Asphären oder dergleichen können auf diese Weise nicht justiert werden.

[0003] Ein ähnliches Verfahren ist beispielsweise auch aus DE 101 02 383 A1 oder DE 103 40 851 A1 bekannt.

[0004] Ein in DE 10 2007 015 947 B4 beschriebenes Verfahren führt vor der eigentlichen Messung eines Werkstücks Probemessungen aus. Dabei wird der Zenit des Werkstücks ermittelt, beispielsweise aus mehreren parallelen Tastschnittmessungen. Der Werkstückträger wird anschließend so justiert, dass der Zenit des Werkstücks in der Ebene liegt, in der der Tastschnitt mittels des Tastarms des Messgerätes durchgeführt wird.

[0005] Aus WO 2009/124767 A1 ist ein Messgerät bekannt, das zur Ermittlung der Symmetriearchse eines rotationssymmetrischen Werkstücks einen speziellen Zentrierungssensor aufweist, der als Autokollimator ausgeführt sein kann. Mit einem derartigen Autokollimator kann die Symmetriearchse des sphärischen Teils der Oberfläche des Werkstücks ermittelt werden. Der Autokollimator erfasst die Taumelbewegung, wenn die Symmetriearchse des Werkstücks nicht mit einer Drehachse eines drehend angetriebenen Werkstückträgers übereinstimmt. Dieses Messgerät erfordert mithin einen speziellen zusätzlichen Sensor, der bei vielen Universalmessgeräten (Formmessgeräten und/oder Koordinatenmessgeräten) nicht zur Verfügung steht.

[0006] DE 10 2012 023 377 B3 beschreibt ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Messung der Position und Justage eines asphärischen Körpers. Bei diesen Verfahren wird in wenigstens zwei unterschiedlichen Radiabständen zu der Drehachse, um die ein Werkstück gedreht wird, in mehreren Drehlagen jeweils ein Positions倅 auf der oberen Fläche des rotationssymmetrischen Werkstücks gemessen. Die Messpunkte liegen mit anderen Worten bei jeder durchgeführten Messung auf einem Kreis um die Drehachse. Ist die Symmetriearchse des Werkstücks nicht exakt entlang der Drehachse ausgerichtet, beschreiben die Messpunkte jeweils eine Sinuskurve. Aus zwei oder mehr solcher Sinuskurven kann dann die Neigung der Symmetriearchse des Werkstücks gegenüber der Drehachse sowie die Verschiebung der Symmetriearchse relativ zur Drehachse berechnet werden. Dies geschieht insbesondere dadurch, dass zunächst entweder die Verschiebung oder die Neigung anhand der einen gemessenen Sinuskurve geschätzt und unter Verwendung dieser Schätzung der jeweils andere Wert aus der zweiten gemessenen Sinuskurve ermittelt wird. Diese Schritte können iterativ wiederholt werden, bis eine ausreichend genaue Bestimmung erfolgt ist und eine entsprechende Justage vorgenommen werden kann.

[0007] Aus DE 196 51 232 C1 ist ein Werkstückträger mit einer ansteuerbaren Justageanordnung bekannt, um die Lage eines Werkstücks einstellen zu können.

[0008] Ausgehend vom Stand der Technik kann es als Aufgabe der vorliegenden Erfindung angesehen werden, ein verbessertes Verfahren bzw. ein verbessertes Messgerät zur Justage der Lage eines rotationssymmetrischen Werkstücks anzugeben.

[0009] Diese Aufgabe wird mit einem Verfahren gemäß Patentanspruch 1 sowie einem Messgerät gemäß Patentanspruch 18 gelöst.

[0010] Die Erfindung ist zur Justage der Lage von rotationssymmetrischen Werkstücken mit einer gekrümmten oberen Fläche vorgesehen. Die Werkstücke müssen keine zylindrische Mantelfläche aufweisen. Insbesondere kann es sich um Werkstücke mit asphärische oberer Fläche handeln.

[0011] Das Messgerät hat einen Werkstückträger, der um eine Drehachse antreibbar ist. Hierfür hat das Messgerät eine rotative Maschinenachse, die den Werkstückträger antreibt. Eine Justageanordnung ist dazu eingerichtet, eine Werkstückträgerachse gegenüber der Drehachse zu kippen und rechtwinklig zu der Drehachse in zwei unterschiedliche Raumrichtungen translatorisch zu bewegen. Die Drehachse verläuft parallel oder entlang einer Koordinatenachse des Maschinenkoordinatensystems. Das Messgerät hat außerdem eine Sensoreinheit zum Messen von Messpunkten in dem Maschinenkoordinatensystem auf der Außenfläche des Werkstücks. Die Sensoreinheit erfasst dabei die Koordinatenwerte eines Messpunkts im Maschinenkoordinatensystem auf der Außenfläche und insbesondere auf der oberen Fläche des Werkstücks.

[0012] Um das Werkstück zu justieren wird der Werkstückträger mit dem Werkstück zunächst in eine erste Drehlage um die Drehachse gebracht. In dieser ersten Drehlage werden mehrere Messpunkte innerhalb einer Messebene des Maschinenkoordinatensystems gemessen. Die Messebene ist vorzugsweise rechtwinklig zu einer der Koordinatenachsen des Maschinenkoordinatensystems ausgerichtet und kann die Drehachse aufweisen oder parallel dazu ausgerichtet sein.

[0013] Im Anschluss daran wird der Werkstückträger mit einem Werkstück um einen Drehwinkel um die Drehachse in eine zweite Drehlage gedreht. In dieser zweiten Drehlage werden in derselben Messebene des Maschinenkoordinatensystems mehrere Messpunkte gemessen.

[0014] Anhand der jeweils mehreren Messpunkte in den beiden Drehlagen kann die Istlage des Werkstücks durch Einpassen der Messpunkte in eine bekannte Sollgeometrie der oberen Fläche ermittelt werden. Die Solllage des Werkstücks ist vorgegeben. Unter der Lage des Werkstücks ist dessen Position im Raum sowie die Ausrichtung des Symmetriearches im Raum zu verstehen. In der Solllage fällt die Symmetriearches des Werkstücks mit der Drehachse des Werkstückträgers zusammen. Die Abweichung von der Istlage zu der Solllage kann durch geeignete Parameter beschrieben werden. Erfindungsgemäß wird ein Kippwinkel sowie eine Verschiebung definiert, die die Abweichung zwischen der Solllage und der Istlage beschreiben. Der Kippwinkel beschreibt die Kippung oder Neigung der Symmetriearches des Werkstücks gegenüber der Drehachse und die Verschiebung beschreibt eine radiale Positionsabweichung der Symmetriearches von der Drehachse in einer Situation, nachdem die Symmetriearches um eine Kippstelle, die durch die Justageanordnung definiert ist, zur Eliminierung des ursprünglich vorhandenen Kippwinkels gekippt wurde. Auf Basis des ermittelten Kippwinkels und der Verschiebung kann die Justageanordnung angesteuert werden, um die Istlage in Übereinstimmung mit der Solllage zu bringen.

[0015] Erfindungsgemäß kann mit lediglich zwei Messwertfolgen von jeweils mehreren Messpunkten entlang jeweils einer Konturlinie der oberen Fläche in der Messebene bei unterschiedlichen Drehlagen des Werkstücks bereits die Abweichung ermittelt und eine entsprechende Justage ausgeführt werden. Das Verfahren kann mithin in kurzer Zeit eine gute Justage des Werkstücks erreichen. Zusätzliche spezifische Sensoren sind nicht erforderlich. Das Verfahren lässt sich mit den ohnehin vorhandenen Sensoren auf Universalmessgeräten wie Formtestern und/oder Konturmessgeräten durchführen. Mithin kann es sich bei dem erfindungsgemäßen Messgerät beispielsweise um einen Formtester bzw. eine Formmessmaschine und/oder ein Konturmessgerät und/oder ein Koordinatenmessgerät handeln, die eine ansteuerbare Justageanordnung sowie einen um die Drehachse antreibbaren Werkstückträger aufweisen. Diese Messgeräte sind nicht speziell auf eine einzige Messaufgabe eingerichtet, sondern universell für unterschiedliche Aufgaben geeignet. Dennoch kann mittels der Erfindung auch auf solchen Messgeräten eine einfache und gute Justage von rotationssymmetrischen Werkstücken mit einer gekrümmten, beispielsweise konvexen oder konkaven oberen Fläche durchgeführt werden.

[0016] Es ist vorteilhaft, wenn der ermittelte Kippwinkel jeweils eine Kippwinkelkomponente um eine von den beiden Koordinatenachsen des Maschinenkoordinatensystems hat, die rechtwinklig zur Drehachse ausgerichtet sind. Entsprechend kann die Justageanordnung zwei Kippachsen aufweisen, die die Werkstückträgerachse der Kippwinkelkomponenten kippen bzw. neigen können.

[0017] Die ermittelte Verschiebung kann zwei oder drei Verschiebungskomponenten aufweisen. Die Verschiebung hat vorzugsweise zwei Verschiebungskomponenten entlang unterschiedlicher Koordinatenachsen rechtwinklig zur Drehachse und optional eine weitere Verschiebungskomponente in Richtung parallel zur Drehachse. Entsprechend dieser Verschiebungskomponenten kann die Justageanordnung des Messgeräts wenigstens zwei translatorische Achsen zur Verstellung des Werkstückträgers aufweisen.

[0018] Bei einer vorteilhaften Ausführungsform wird im Anschluss an die Ansteuerung der Justageanordnung geprüft, ob die Istlage mit der Solllage ausreichend genau übereinstimmt. Ist keine ausreichend genaue Über-

einstimmung gegeben, können die Messungen in den beiden Drehlagen wiederholt und aktuelle Werte für die Verschiebung und den Kippwinkel ermittelt werden, die dann als Basis für eine weitere Ansteuerung der Justageanordnung dienen. Es kann dann erneut geprüft werden, ob nach diesem zweiten Iterationsschritt eine ausreichend genaue Übereinstimmung vorliegt. Dieser iterative Ablauf kann mehrfach solange wiederholt werden, bis vorgegebene Genauigkeit erreicht ist oder keine wesentliche Verbesserung der Genauigkeit durch weitere Iterationen erreicht werden kann.

[0019] Die in den unterschiedlichen Drehlagen des Werkstückträgers gemessenen Messpunkte werden über die Sensoreinheit zunächst als Messpunkte im Maschinenkoordinatensystem erfasst. Es ist bevorzugt, wenn beim Ermitteln des Kippwinkels und der Verschiebung die Messpunkte in Abhängigkeit von der jeweiligen zugehörigen Drehlage zunächst in das Werkstückkoordinatensystem des Werkstücks transformiert werden.

[0020] Die Messpunkte, vorzugsweise die in das Werkstückkoordinatensystem des Werkstücks transformierten Messpunkte, werden zur Ermittlung des Kippwinkels in eine bekannte Sollform bzw. Sollgeometrie der oberen Fläche des Werkstücks eingepasst. Die Einpassung erfolgt derart, dass ein Fehler oder eine Abweichung zwischen den Messpunkten, die die gemessene Geometrie des Werkstücks beschreiben, und der bekannten Sollgeometrie des Werkstücks minimal ist. Das Minimieren des Fehlers kann beispielsweise durch bekannte mathematische Verfahren, wie etwa das Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt werden.

[0021] Bei einem Ausführungsbeispiel wird jedem Messpunkt jeweils ein Zielpunkt der Sollgeometrie zugeordnet. Von jedem Messpunkt kann dann ein Vektor zu dem zugeordneten Zielpunkt definiert werden. Anhand dieser Vektoren kann die Einpassung der Messpunkte in die Sollgeometrie erfolgen.

[0022] Es ist vorteilhaft, wenn die Sollgeometrie des Werkstücks so vorgegeben ist, dass sie gleichzeitig die Solllage des Werkstücks beschreibt. Dadurch wird durch die Sollgeometrie nicht nur die gewünschte Form der oberen Fläche beschrieben, sondern auch deren Position und Ausrichtungen gegenüber der Drehachse. Dabei ist es möglich, dass bei der Bestimmung der Abweichung zwischen der Istlage und der Solllage – beispielsweise von Vektoren von den Messpunkten zu den Zielpunkten – anhand der Abweichung bzw. der Vektoren der Kippwinkel und die Verschiebung ermittelt werden. Durch geeignete Auswahl der Verschiebung und des Kippwinkels kann beispielsweise die Abweichung zwischen der anhand der Messpunkte gemessenen Geometrie und der Solllage minimiert werden.

[0023] Es ist vorteilhaft, wenn der Koordinatenursprung des Werkstückkoordinatensystems auf der Symmetriechse des rotationssymmetrischen Werkstücks auf der oberen Fläche liegt. Vorzugsweise entspricht dies dem Zenit des konvexen rotationssymmetrischen Werkstücks.

[0024] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren ist es möglich, dass in mehr als zwei Drehlagen jeweils mehrere Messpunkte gemessen werden. Das Drehen des Werkstückträgers mit dem Werkstück um die Drehachse und das anschließende Messen der Messpunkte in der eingestellten Drehlage kann mehrfach wiederholt werden. Zumindest wird in zwei unterschiedlichen Drehlagen gemessen. Der Winkel zwischen den unterschiedlichen Drehlagen, in denen jeweils eine Messung erfolgt, stellt einen Solldrehwinkel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Drehlagen dar, der durch Ansteuerung der rotativen Maschinenachse des Messgeräts eingestellt wird. Der Solldrehwinkel beträgt vorzugsweise 180° geteilt durch die Anzahl der unterschiedlichen Drehlagen, in denen gemessen wird. Der tatsächlich eingestellte Drehwinkel kann bei einer bevorzugten Ausführungsform von dem ermittelten Solldrehwinkel betragsmäßig um maximal 10° oder um maximal 5° abweichen.

[0025] Bei der vorstehend erläuterten Durchführung der Justage wird davon ausgegangen, dass die genaue Achsanordnung der Justageanordnung bekannt ist. Sollte bei einem Messgerät die Lage der Justageachsen und insbesondere der Kippachsen nicht mit ausreichender Genauigkeit bekannt sein, kann nach den wenigstens zwei Messungen in unterschiedlichen Drehlagen und der anschließenden erfolgten Ermittlung eines ersten Wertes zumindest für den Kippwinkel wie folgt vorgegangen werden:

Die Justageeinheit wird zum Kippen des Werkstücks abhängig von dem ermittelten Wert des Kippwinkels ansteuert. Anschließend wird das Werkstück erneut gemessen. Es werden wiederum wenigstens zwei unterschiedliche Drehlagen eingestellt und jeweils wenigstens eine Messung durchgeführt.

[0026] Anschließend ist bekannt, wie sich die Istlage des Werkstücks durch das Kippen mittels der Kippachsen der Justageanordnung verändert hat. Dadurch lässt sich ein Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Kippung des Werkstücks und der Ansteuerung der Justageanordnung zur Erzielung der Kippung ermitteln.

[0027] Anschließend können die Messungen in den unterschiedlichen Drehlagen wiederholt und jeweils ein aktueller Wert für den Kippwinkel und die Verschiebung ermittelt werden. Dann kann die Justageanordnung mittels der aktuellen Werte für den Kippwinkel und die Verschiebung angesteuert werden, um die Istlage des Werkstücks mit der gewünschten Solllage in Übereinstimmung zu bringen.

[0028] Dieses Verfahren kann mittels einer Steuereinrichtung des Messgeräts durchgeführt werden, das die vorhandenen Maschinenachsen, die Justageanordnung und die Sensoreinheit zur Durchführung der Messungen ansteuert und von der Sensoreinheit die entsprechenden Sensormesswerte erhält. Die erforderlichen Berechnungen werden in der Steuereinrichtung durchgeführt.

[0029] Es ist außerdem vorteilhaft, wenn ein Höhenprofil des Werkstücks, das während einer Messung in einer bestimmten Drehstellung aufgenommen wird, einen Schnittpunkt mit einem anderen Höhenprofil hat, das während einer Messung in einer anderen Drehstellung und vorzugsweise in der benachbarten Drehstellung aufgenommen wurde. Es ist auch möglich, dass sämtliche aufgenommene Höhenprofile einen gemeinsamen Schnittpunkt aufweisen, wenn die Drehachse des Messgeräts in der Messebene liegt, in der die einzelnen Höhenprofile aufgenommen werden. In diesem Fall können sich sämtliche Höhenprofile an einem Schnittpunkt schneiden, der auf der Drehachse liegt.

[0030] Die Steuereinrichtung kann die Berechnungsergebnisse und/oder die Messwerte und/oder andere daraus abgeleitete Ergebnisse oder Rechenwerte über eine geeignete Schnittstelle anzeigen oder zu einer externen Einheit übertragen.

[0031] Vorteilhafte Ausführungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen, der Beschreibung und der Zeichnung. Nachfolgend werden bevorzugte Ausführungsbeispiele anhand der beigefügten Zeichnung im Einzelnen erläutert. Es zeigen:

[0032] **Fig. 1** eine schematische Prinzipdarstellung eines Ausführungsbeispiels eines Messgeräts mit einem zu messenden Werkstück,

[0033] **Fig. 2** eine schematische Prinzipdarstellung der ermittelten Verschiebung und des Kippwinkels der Symmetriearchse des Werkstücks gegenüber einer Drehachse des Messgeräts,

[0034] **Fig. 3a bis Fig. 3c** eine Prinzipdarstellung der Justage des Werkstücks, wobei dessen Symmetriearchse entlang der Drehachse des Messgeräts ausgerichtet wird,

[0035] **Fig. 4** eine Prinzipdarstellung einer ersten Messung auf einer oberen Fläche des Werkstücks in einer Messebene in einer ersten Drehlage,

[0036] **Fig. 5** eine Prinzipdarstellung einer Messung auf einer oberen Fläche des Werkstücks in der Messebene in einer zweiten Drehlage des Werkstücks,

[0037] **Fig. 6** eine qualitative Darstellung einer beispielhaften Messung in der ersten Drehstellung,

[0038] **Fig. 7** eine qualitative Darstellung einer beispielhaften Messung in der zweiten Drehlage,

[0039] **Fig. 8** eine Prinzipdarstellung zur Anpassung der gemessenen Messpunkte auf der Oberfläche des Werkstücks in eine Sollgeometrie der Oberfläche und

[0040] **Fig. 9** eine Prinzipdarstellung einer weiteren Vorgehensweise zur Einpassung der gemessenen Messwerte in eine bekannte Sollgeometrie der oberen Fläche des Werkstücks.

[0041] In **Fig. 1** ist ein Ausführungsbeispiel eines Messgeräts **15** nach Art eines Blockschaltbildes schematisch veranschaulicht. Das Messgerät **15** kann ein Koordinatenmessgerät oder ein Formmessgerät sein und ist universell für mehrere Messaufgaben einsetzbar. Es ist dazu eingerichtet, ein rotationssymmetrisches Werkstück **16** mit einer gekrümmten oberen Fläche **17** zu messen. Hierfür können auf der oberen Fläche **17** Messpunkte aufgenommen werden. Jeder Messpunkt ist dabei durch einen Punkt in einem Maschinenkoordinatensystem KM definiert. Das Maschinenkoordinatensystem ist beispielgemäß als kartesisches Koordinatensystem ausgestaltet mit drei Koordinatenachsen, nämlich einer X-Koordinatenachse XM in einer X-Richtung, einer Y-Koordinatenachse YM in Y-Richtung und einer Z-Koordinatenachse ZM in Z-Richtung.

[0042] Ein Werkstückkoordinatensystem KW hat eine Z-Koordinatenachse ZW, die entlang einer Symmetriearchse A des rotationssymmetrischen Werkstücks **16** ausgerichtet ist. Der Koordinatenursprung befindet sich vorzugsweise an der Stelle, an der die Symmetriearchse A die gekrümmte obere Fläche **17** schneidet. Beim Ausführungsbeispiel ist die obere Fläche **17** konkav gekrümmmt und hat im Koordinatenursprung an der Symmetriearchse A ihren Zenit. Bei dem Werkstück **16** handelt es sich beispielsgemäß um ein Werkstück mit einer asphärischen oberen Fläche **17**. Das Werkstückkoordinatensystem KW hat außerdem eine X-Koordinatenachse XW und eine Y-Koordinatenachse YW, die jeweils rechtwinklig zueinander und rechtwinklig zur Z-Koordinatenachse ZW ausgerichtet sind und ein kartesisches Koordinatensystem KW bilden.

[0043] Das Messgerät **15** hat eine Sensoreinheit **18** zur Aufnahme von Messpunkten auf der Außenfläche des Werkstücks **16**. Die Sensoreinheit **18** kann dabei über eine Maschinenachsanzordnung **19** relativ zum Werkstück **16** bewegt werden. Bei dem hier beschriebenen Ausführungsbeispiel weist die Maschinenachsanzordnung **19** drei translatorische Maschinenachsen auf, mit denen die Sensoreinheit **18** jeweils in Richtung einer der Koordinatenachsen XM, YM, ZM des Maschinenkoordinatensystems KM bewegt werden kann. Zusätzlich oder alternativ zu den translatorischen Maschinenachsen der Maschinenachsanzordnung **19** könnten auch eine oder mehrere rotative Maschinenachsen vorgesehen sein.

[0044] Die Sensoreinheit **18** weist einen Sensor **20** auf, beispielsweise einen optisch messenden oder taktilen Sensor **20**. Die Sensoreinheit **18** übermittelt ein Sensorsignal an eine Steuereinrichtung **21**. In der Steuereinrichtung **21** kann aus dem Sensorsignal und der Drehlage des Werkstückträgers **23** um die Drehachse C jedem Messpunkt auf der Außenfläche und beispielsgemäß auf der oberen Fläche **17** des Werkstücks **16** ein Koordinatenquadrupel $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, c_i$ im Maschinenkoordinatensystem KM zugeordnet werden. Die Steuereinrichtung **21** steuert auch die Maschinenachsanzordnung **19** mit den translatorischen und/oder rotatorischen Maschinenachsen.

[0045] Das Messgerät **15** hat außerdem einen mittels einer rotativen Maschinenachse **22** drehbar um eine Drehachse C antreibbaren Werkstückträger **23**. Der Werkstückträger **23** ist dazu eingerichtet, das Werkstück **16** zu halten. Der Werkstückträger **23** kann hierfür eine geeignete Werkstückhalteeinrichtung aufweisen, so dass sich das Werkstück **16** während der Messung nicht relativ zum Werkstückträger **23** bewegen kann. Die rotative Maschinenachse **22** wird durch die Steuereinrichtung **21** angesteuert.

[0046] Außerdem weist das Messgerät **15** eine Justageanordnung **24** auf. Über die Justageanordnung **24** kann der Werkstückträger **23** mit dem darauf angeordneten Werkstück **16** zum Messen in eine gewünschte Lage gebracht werden. Hierfür hat die Justageanordnung **24** wenigstens eine und beispielsgemäß mehrere Justageachsen, die als translatorische Achsen bzw. Schwenk- oder Kippachsen ausgeführt sein können. Bei dem veranschaulichten Beispiel hat die Justageanordnung **24** einen Kipptisch **25**, mittels dem der Werkstückträger **23** bzw. das darauf angeordnete Werkstück **16** um zwei rechtwinklig zueinander ausgerichtete Achsen geschwenkt bzw. gekippt werden kann.

[0047] Der Kipptisch **25** kann den Werkstückträger **23** mit dem Werkstück **16** um eine erste Kippachse kippen, die parallel zur X-Koordinatenachse XW des Werkstückkoordinatensystems KW ausgerichtet ist und um eine zweite Kippachse, die parallel zur Y-Koordinatenachse YW des Werkstückkoordinatensystems KW ausgerichtet ist.

[0048] Die Justageanordnung **24** hat außerdem zwei translatorische Justageachsen **26**, wobei die eine translatorische Justageachse den Werkstückträger **23** parallel zur X-Koordinatenachse des Werkstückkoordinatensystems KW und die jeweils andere translatorische Justageachse **26** den Werkstückträger **23** parallel zur Y-Koordinatenachse des Werkstückkoordinatensystems KW verschieben kann.

[0049] Die Justageanordnung **24** wird durch die Steuereinrichtung **21** angesteuert. Die Steuereinrichtung **21** gibt die Drehlage c_i um die Drehachse C sowie die Positionen für die Maschinenachsanzordnung **19** vor. Die jeweiligen Lage- bzw. Positionsdaten bezogen auf das Maschinenkoordinatensystem KM sind daher in der Steuereinrichtung **21** als Sollwerte bekannt. Es ist möglich, die jeweilige Position der Achsen sensorisch zu erfassen und an die Steuereinrichtung **21** zu übermitteln, so dass in der Steuereinrichtung **21** auch die Istwerte vorliegen, beispielsweise um eine Regelung durchzuführen.

[0050] Über die Justageanordnung **24** kann die Symmetriearchse A des Werkstücks **16** bzw. eine Werkstückträgerachse gegenüber der Drehachse C gekippt und relativ zur Drehachse C in X-Richtung und Y-Richtung des Werkstückkoordinatensystems KW bewegt werden.

[0051] In **Fig. 1** ist schematisch veranschaulicht, dass das auf dem Werkstückträger **23** angeordnete Werkstück **16** gegenüber der Drehachse C nicht in einer gewünschten Solllage L_s ausgerichtet ist. Die Symmetriearchse A ist gegenüber der Drehachse C bzw. der Z-Koordinatenachse ZM des Maschinenkoordinatensystems KM geneigt und/oder in der X-Y-Ebene des Maschinenkoordinatensystems KM verschoben. Die Lage der Symmetriearchse A kann daher allgemein durch einen Kippwinkel γ und eine Verschiebung t in der X-Y-Ebene des Werkstückkoordinatensystems KW angegeben werden (**Fig. 2** und **Fig. 3**). Es ist auch möglich, die Verschiebung t nicht nur in einer Ebene, sondern im Raum zu definieren (Verschiebung t^* in **Fig. 2**), so dass die Verschiebung t^* nicht nur eine X-Komponente t_x , eine Y-Komponente t_y , sondern zusätzlich noch eine Z-Komponente t_z aufweist. Dadurch besteht die Möglichkeit, den Koordinatenursprung des Werkstückkoordinatensystems KW und den Koordinatenursprung des Maschinenkoordinatensystems KM in Übereinstimmung zu bringen. Die Justageanordnung **24** weist in diesem Fall eine translatorische Justageachse zur Bewegung des Werkstückträgers **23** in Z-Richtung auf. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das Maschinenkoordinatensystem KM in **Fig. 1** der Übersichtlichkeit wegen unterhalb des Werkstückträgers **23** eingezeichnet ist. Der Ursprung des Maschinenkoordinatensystems KM wäre im letztgenannten Fall oberhalb des Werkstückträgers **23** zu definieren. Er kann abhängig vom zu vermessenden Werkstück **16** an einer beliebigen Stelle entlang der Drehachse C durch eine entsprechende Initialisierung vorgegeben werden.

[0052] Der Kippwinkel γ kann allgemein durch zwei Kippwinkelkomponenten α, β beschrieben werden. Die Kippwinkelkomponente um die X-Koordinatenachse XW wird daher als Kippwinkelkomponente α und die Kippwinkelkomponente um die Y-Koordinatenachse YW des Werkstückkoordinatensystems KW als Kippwinkelkomponente β bezeichnet. Beide Kippwinkelkomponenten α, β ergeben zusammen den Kippwinkel γ zwischen der Ausrichtung der Symmetriearchse A und einer Parallelen zur Drehachse C bzw. zur Z-Koordinatenachse ZM des Maschinenkoordinatensystems KM.

[0053] Die Verschiebung t ergibt sich durch eine Vektoraddition der Verschiebungskomponenten in die verschiedenen Raumrichtungen, beispielsgemäß durch eine Verschiebungskomponente t_x entlang der X-Koordinatenachse XW und einer Verschiebungskomponente t_y entlang der Y-Koordinatenachse YW des Werkstückkoordinatensystems KW.

[0054] In den **Fig. 3a** bis **Fig. 3c** ist das Prinzip der Justage schematisch dargestellt. Das zunächst eine beliebige Istlage L_i einnehmende Werkstück **16** wird über die Justageanordnung **24** beispielsgemäß den Kipptisch **25** zunächst um den Kippwinkel γ gekippt, so dass die Symmetriearchse A parallel zur Drehachse C ausgerichtet ist (**Fig. 3b**). Anschließend wird das Werkstück **16** um die Verschiebung t bewegt, so dass die Symmetriearchse A entlang der Drehachse C ausgerichtet ist und das Werkstück **16** die Solllage L_s einnimmt (**Fig. 3c**). Um diese Justage vornehmen zu können, muss der Kippwinkel γ und die Verschiebung t ermittelt werden. Das Verfahren zur Ermittlung dieser Parameter wird nachfolgend anhand der **Fig. 4**–**Fig. 9** erläutert.

[0055] In den **Fig. 4** und **Fig. 5** ist der Werkstückträger **23** und das darauf angeordnete Werkstück **16** stark vereinfacht in Draufsicht dargestellt. Der Koordinatenursprung UW des Werkstückkoordinatensystems KW ist eingetragen. Der Koordinatenursprung UW entspricht dem Zenit des Werkstücks **16** bzw. dem Durchstoßpunkt der Symmetriearchse A durch die obere Fläche **17**. Die Drehachse C verläuft senkrecht zur Zeichenebene.

[0056] In einem ersten Schritt S1 wird der Werkstückträger **23** bzw. das Werkstück **16** in eine erste Drehlage c_1 gebracht bzw. die aktuelle Drehlage wird als erste Drehlage c_1 definiert. In dieser ersten Drehlage c_1 werden in dem ersten Schritt S1 mehrere Messpunkte in einer Messebene E aufgenommen. Die Messebene E ist beispielsgemäß durch die Maschinenkoordinatenachsen XM, ZM aufgespannt und mithin rechtwinklig zur Y-Koordinatenachse YM des Maschinenkoordinatensystems KM ausgerichtet. Die Drehachse C verläuft daher innerhalb der Messebene E. Alternativ hierzu könnte die Messebene E auch parallel und mit Abstand zur Drehachse C angeordnet sein. Die Sensoreinheit **15** nimmt in dieser ersten Drehlage c_1 auf der oberen Fläche **17** die Koordinaten mehrerer Messpunkte $x_{1j}, y_{1j}, z_{1j}, c_1$ auf.

[0057] In einem zweiten Schritt S2 wird der Werkstückträger **23** mit dem Werkstück **16** um einen Drehwinkel δ um die Drehachse C in eine zweite Drehlage c_2 gedreht. Der Drehwinkel δ beträgt beim Ausführungsbeispiel etwa 90° und kann um vorzugsweise maximal 5° von dem Solldrehwinkel abweichen. In dieser zweiten Drehlage c_2 werden Messpunkte $x_{2j}, y_{2j}, z_{2j}, c_2$ in derselben Messebene E bezüglich des Maschinenkoordinatensystems KM gemessen (Schritt S3).

[0058] Es werden mindestens zwei Messungen in zwei unterschiedlichen Drehlagen c_1, c_2 mit jeweils mehreren Messpunkten $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, c_i$ aufgenommen. Der Index $i = 1, 2, 3, \dots$ gibt dabei die Nummer der Messwertfolge bei der Messung mehrerer Messpunkte in einer der Drehlagen an. Es können auch mehr als zwei Messungen

in mehr als zwei verschiedenen Drehlagen durchgeführt werden. Der Index $j = 1, 2, 3, \dots$ gibt die Nummer des Messpunkts in einer Messwertfolge an. Die Anzahl der Messpunkte in der Messebene E entlang der oberen Fläche **17** wird in Abhängigkeit von der erforderlichen Genauigkeit gewählt.

[0059] Allgemein wird der Solldrehwinkel δ_{soll} zwischen zwei aufeinanderfolgenden Drehstellungen c_i und c_{i+1} wie folgt berechnet:

$$\delta_{\text{soll}} = \frac{180^\circ}{M} \quad (1)$$

wobei M die Anzahl der Messwertfolgen $i = 1, 2, 3, \dots, M$ in den verschiedenen Drehstellungen angibt. Bei Messungen in zwei unterschiedlichen Drehstellungen c_1, c_2 ist der Solldrehwinkel δ_{soll} daher gleich 90° . Je mehr Drehstellungen für jeweils eine Messwertfolge verwendet werden, desto weniger Iterationen werden zur Erzielung einer vorgegebenen Genauigkeit der Justage der Symmetriearchse A des Werkstücks **16** entlang der Drehachse C benötigt. Entsprechend kann bei einer vorgegebenen Anzahl von Iterationen durch eine größere Anzahl von Drehstellungen eine verbesserte Genauigkeit der Justage der Symmetriearchse A des Werkstücks **16** entlang der Drehachse C erreicht werden.

[0060] Die aufgenommenen Messpunkte $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, c_i$ beschreiben die Istlage Li des Werkstücks **16**. Die Sollgeometrie der Werkstückoberfläche **17** des gemessenen Werkstücks **16**, beispielsweise eine asphärische Fläche, ist bekannt. Durch Einpassen der Messpunkte $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, c_i$ in die bekannte Sollgeometrie kann daher die Istlage Li ermittelt werden. Die Abweichung der Istlage Li zur gewünschten Solllage Ls des Werkstücks **16** kann durch die Verschiebung t und den Kippwinkel y beschrieben werden. Wenn die Sollgeometrie für die obere Fläche **17** bzw. das Werkstück **16** gleichzeitig auch die Solllage definiert, kann durch Einpassen der Messpunkte in die Solllage Ls auch gleich die Verschiebung t und der Kippwinkel y ermittelt werden.

[0061] Die durch die Messpunkte $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, c_i$ beschriebenen Z-Konturlinien entlang der X-Koordinatenachse XM des Maschinenkoordinatensystems KM sind qualitativ beispielhaft in den **Fig. 6** und **Fig. 7** veranschaulicht. Jede Messung in einer Drehlage c_i beschreibt eine solche Konturlinie.

[0062] Jeder Messpunkt einer Messung lässt sich durch seine Koordinaten x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} im Raum des Maschinenkoordinatensystems KM sowie die Drehlage c_i beschreiben, so dass sich ein Koordinatenquadrupel $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, c_i$ ergibt. Wie erläutert bezeichnet der Index i die Nummer der Messwertfolge und der Index j die Nummer des Punktes einer Messwertfolge. Die Messpunkte werden beispielsgemäß zunächst von dem Maschinenkoordinatensystem KM in das Werkstückkoordinatensystem KW transformiert:

$$\begin{pmatrix} x_{ij}^{KW} \\ y_{ij}^{KW} \\ z_{ij}^{KW} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(c_i) & -\sin(c_i) & 0 \\ \sin(c_i) & \cos(c_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{pmatrix} \quad (2)$$

[0063] Die erhaltenen Messpunkte $x_{ij}^{KW}, y_{ij}^{KW}, z_{ij}^{KW}$ werden in die bekannte Sollgeometrie unter Minimierung der Abweichung eingepasst. Zwei prinzipielle Möglichkeiten einer solchen Einpassung sind in den **Fig. 8** und **Fig. 9** stark schematisiert dargestellt. Den einzelnen Messpunkten $x_{ij}^{KW}, y_{ij}^{KW}, z_{ij}^{KW}$ kann jeweils ein Zielpunkt P_{ij} auf der oberen Fläche **17** des sich in Solllage Ls befindenden Werkstücks **16** mit bekannter Sollgeometrie der oberen Fläche **17** zugeordnet werden. Die Zuordnung kann beispielsweise für alle Messpunkte $x_{ij}^{KW}, y_{ij}^{KW}, z_{ij}^{KW}$ entlang derselben Richtung erfolgen (**Fig. 8**), beispielsweise parallel zur Z-Koordinatenachse ZM, oder alternativ in Normalenrichtung (**Fig. 9**) zur oberen Fläche **17** des sich in Solllage Ls befindenden Werkstücks **16**. Von jedem Messpunkt $x_{ij}^{KW}, y_{ij}^{KW}, z_{ij}^{KW}$ zeigt ein Vektor V_{ij} zu dem jeweils zugeordneten Zielpunkt P_{ij} auf der oberen Fläche **17** des Werkstücks **16**. Die Vektoren V_{ij} stellen jeweils die Abweichung der Istlage Li zu der Solllage Ls dar und daraus können die gesuchten Justageparameter, nämlich der Kippwinkel y und die Verschiebung t ermittelt werden. Dabei werden die Justageparameter (Kippwinkel y, Verschiebung t) so ermittelt, dass die Abweichung bei der Einpassung der Messpunkte $x_{ij}^{KW}, y_{ij}^{KW}, z_{ij}^{KW}$ in die Sollgeometrie der oberen Fläche **17** möglichst klein ist. Hierzu kann ein geeignetes Qualitätsmaß definiert werden. Beispielsweise kann das Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate oder ein anderes bekanntes mathematisches Verfahren eingesetzt werden, um das ermittelte Qualitätsmaß bzw. die Abweichung zu minimieren.

[0064] Nach der Ermittlung der Verschiebung t und des Kippwinkels y im vierten Schritt S4 wird die Justageanordnung **24** durch die Steuereinrichtung **21** angesteuert. Dabei werden zunächst die Kippachsen des Kippstisches **25** angesteuert, um eine entsprechende Kippung des Werkstücks **16** durchzuführen, um die Symmetriearchse A parallel zu der Dreieckachse C auszurichten. Anschließend werden die translatorischen Justageach-

sen **26** angesteuert, um die Symmetriearchse A des Werkstücks **16** auf die Drehachse C zu verschieben. Die Ansteuerung der Justageanordnung **24** hat das Ziel, die Istlage L_i des Werkstücks **16** in Übereinstimmung mit der Solllage L_s zu bringen.

[0065] In einem sechsten Schritt S6 kann eine erneute Messung in einer oder mehreren Drehlagen durchgeführt und die Abweichung der Istlage L_i von der Solllage L_s bewertet werden. Ist eine gewünschte Genauigkeit noch nicht erreicht, können aktuelle Werte für den Kippwinkel γ und die Verschiebung t berechnet und die Justageanordnung **24** entsprechend der berechneten Parameter angesteuert werden. Dieser iterative Ablauf kann mehrfach solange wiederholt werden, bis vorgegebene Genauigkeit erreicht ist oder keine wesentliche Verbesserung der Genauigkeit durch weitere Iterationen erreicht werden kann.

[0066] Das vorstehend allgemein erläuterte Verfahren wird nachfolgend an einem Beispiel veranschaulicht. Als Qualitätsmaß wird hier die mittlere quadratische Abweichung minimiert, um die transformierten Messpunkte x_{i,j}^{KW}, y_{i,j}^{KW}, z_{i,j}^{KW} die Sollgeometrie bzw. die Solllage L_s einzupassen.

[0067] Das nominelle Design (Sollgeometrie) des zu messenden Werkstücks **16** bzw. der oberen Fläche **17** ist bekannt. Beispielsgemäß handelt es sich dabei um eine Asphäre. Der Höhenwert bzw. z-Wert z_{asp} der Asphäre kann beispielweise mit folgender Asphärenformel angegeben werden:

$$z_{asp}(x^{KW}, y^{KW}) = z_{asp}(r^{KW}) = \frac{\left(\frac{(r^{KW})^2}{R_0}\right)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)\left(\frac{(r^{KW})^2}{R_0}\right)}} + \sum_{n=2}^N A_{2n} (r^{KW})^{2n} \quad (3)$$

mit

$$r^{KW} = \sqrt{(x^{KW})^2 + (y^{KW})^2} \quad (4)$$

wobei R₀ der Grundradius der Asphäre, k die konische Konstante und A_{2n} die Asphärenkoeffizienten sind. Bei der Gleichung (3) befindet sich der Ursprung des Werkstückkoordinatensystems KW im Zenit der Asphäre.

[0068] Die in das Werkstückkoordinatensystem KW transformierten Messpunkte werden so in die durch die Gleichung (3) gegebene Sollgeometrie (nominelles Asphärendesign) eingepasst, dass die mittlere quadratische Abweichung zwischen der z-Koordinate der eingepassten Punkte und dem z-Wert z_{asp} der Sollgeometrie an den zugeordneten Stellen x, y der eingepassten Messpunkte minimal ist. Dazu werden beispielsgemäß zwei Rotations- oder Kippparameter (Kippwinkelkomponenten α, β) und zwei oder drei Translationsparameter (Verschiebungskomponenten t_x, t_y und optional t_z) ermittelt, so dass der folgende Ausdruck minimal ist:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \left(\tilde{z}_{i,j}^{KW} - z_{asp}(\tilde{x}_{i,j}^{KW}, \tilde{y}_{i,j}^{KW}) \right)^2 \quad (5)$$

[0069] Dabei werden $\tilde{x}_{i,j}^{KW}$, $\tilde{y}_{i,j}^{KW}$, $\tilde{z}_{i,j}^{KW}$ und zu berechnet mittels

$$\begin{pmatrix} \tilde{x}_{i,j}^{KW} \\ \tilde{y}_{i,j}^{KW} \\ \tilde{z}_{i,j}^{KW} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{i,j}^{KW} \\ y_{i,j}^{KW} \\ z_{i,j}^{KW} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (6)$$

[0070] Da beispielsgemäß die Sollgeometrie den Koordinatenursprung des Werkstückkoordinatensystems KW am Zenit der Asphäre hat und im Maschinenkoordinatensystem KM die Drehachse C durch den Koordinatenursprung des Maschinenkoordinatensystems KM verläuft, stellen die Verschiebungskomponenten t_x in X-Richtung des Werkstückkoordinatensystems KW und t_y in Y-Richtung des Werkstückkoordinatensystems KW die Verschiebung der Symmetriearchse A des Werkstücks **16** rechtwinklig zur Drehachse C dar und die Kippwinkelkomponenten α um die X-Richtung des Werkstückkoordinatensystems KW und β um die Y-Richtung des Werkstückkoordinatensystems KW bilden den Kippwinkel γ zwischen der Symmetriearchse A und der Drehachse C.

[0071] Nach der Bestimmung der Verschiebung t und des Kippwinkels γ kann die Justageanordnung **24** entsprechend angesteuert werden, um die Istlage L_i in Übereinstimmung zu bringen mit der Solllage L_s . Wie erläutert kann das Verfahren iterativ wiederholt werden, um die Genauigkeit zu erhöhen.

[0072] Bei den vorstehenden Ausführungsbeispielen wurde die Anordnung der Justageachsen der Justageanordnung **24** als bekannt vorausgesetzt. Wie in **Fig. 3a** schematisch veranschaulicht ist, wird das Werkstück **16** mittels des Kipptisches **25** um eine Kippstelle **KS** geschwenkt, die mit Abstand zum Werkstück **16** angeordnet ist. Wenn dieser Abstand nicht exakt bekannt ist, kann das vorstehend beschriebene Verfahren wie nachfolgend beschrieben modifiziert werden.

[0073] Nach der Ermittlung eines ersten Wertes für den Kippwinkel γ (im vierten Schritt S4) kann zunächst der Kipptisch **25** angesteuert werden, um dem Werkstückträger **23** entsprechend des ermittelten Kippwinkels γ zu bewegen.

[0074] Anschließend wird der Werkstückträger **23** z. B. wieder in die erste Drehlage c_1 gebracht und eine erneute Messung einer Messwertfolge in der Messebene E vorgenommen. Dann wird der Werkstückträger **23** gedreht, beispielsweise in die zweite Drehlage c_2 , und es wird wiederum eine Messung einer Messwertfolge in der Messebene E vorgenommen. Nach diesen beiden Messungen der Messwertfolgen wird erneut ein aktueller Wert für den Kippwinkel und die Verschiebung aus den aktuellen Messungen berechnet. Da nach einem Kippen des Werkstückträgers **23** und der erneuten Messung bekannt ist, wie sich die Kipplage des Werkstückträgers **23** bzw. des Werkstücks **16** verändert hat, kann nunmehr auf Basis der aktuellen Messungen und des ermittelten aktuellen Kippwinkels sowie der ermittelten aktuellen Verschiebung die Justageanordnung **24** angesteuert werden, um die Istlage L_i mit der Solllage L_s in Übereinstimmung zu bringen. Es versteht sich auch bei diesem Verfahren, dass in wenigstens zwei Drehlagen jeweils eine Messung erfolgt, Messungen aber auch in mehr als zwei Drehlagen durchgeführt werden können, wie es im Zusammenhang mit anderen Ausführungsbeispielen bereits erläutert wurde.

[0075] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und ein Messgerät **15**, das zur Justage einer Lage eines Werkstücks **16** mit einer gekrümmten verlaufenden oberen Fläche **17** in Bezug auf eine Drehachse **C** des Messgerätes **15** eingerichtet ist. Das Werkstück **16** wird mit einem Werkstückträger **23** in eine erste Drehlage c_1 gebracht. Innerhalb einer Messebene wird eine Mehrzahl von Messpunkten auf der oberen Fläche **17** aufgenommen. Das Werkstück **16** wird in eine weitere Drehlage c_2 um die Drehachse **C** gebracht, und es werden erneut Messpunkte in der Messebene E auf der oberen Fläche **17** des Werkstücks **16** aufgenommen. Aus den aufgenommenen Messpunkten kann die Istlage L_i des Werkstücks **16** sowie die Abweichung von der vorgegebenen Solllage L_s ermittelt werden. In der Solllage L_s wird die Symmetriearchse **A** des Werkstücks **16** in Übereinstimmung mit der Drehachse **C** gebracht. Hierfür werden Justageparameter, beispielsgemäß ein Kippwinkel γ und eine Verschiebung t ermittelt und eine Justageanordnung **24** des Messgerätes **15** abhängig von den berechneten Justageparametern angesteuert, um das Werkstück **16** zu justieren.

Bezugszeichenliste

15	Messgerät
16	Werkstück
17	obere Fläche des Werkstücks
18	Sensoreinheit
19	Maschinenachsananordnung
20	Sensor
21	Steuereinrichtung
22	rotative Maschinenachse
23	Werkstückträger
24	Justageanordnung
25	Kipptisch
26	translatorische Justageachse
α	Kippwinkelkomponente um die x-Richtung des Werkstückkoordinatensystems
β	Kippwinkelkomponente um die y-Richtung des Werkstückkoordinatensystems
γ	Kippwinkel
δ	Drehwinkel
δ_{soll}	Solldrehwinkel
A	Symmetriearchse des Werkstücks
C	Drehachse

c_i	Drehlage des Werkstücks um die Drehachse im Maschinenkoordinatensystems KM
KM	Maschinenkoordinatensystem
KW	Werkstückkoordinatensystem
KS	Kippstelle
Li	Istlage
Ls	Solllage
P_{ij}	Zielpunkt
t	Verschiebung
t_x	Verschiebungskomponente in x-Richtung des Werkstückkoordinatensystems
t_y	Verschiebungskomponente in y-Richtung des Werkstückkoordinatensystems
t_z	Verschiebungskomponente in z-Richtung des Werkstückkoordinatensystems
UW	Koordinatenursprung des Werkstückkoordinatensystems
V_{ij}	Vektor
x_{ij}	x-Koordinate eines Messpunkts im Maschinenkoordinatensystems
x_{ij}^{KW}	x-Koordinate eines Messpunkts im Werkstückkoordinatensystem
XM	X-Koordinatenachse des Maschinenkoordinatensystems
XY	X-Koordinatenachse des Werkstückkoordinatensystems
y_{ij}	y-Koordinate eines Messpunkts im Maschinenkoordinatensystems
y_{ij}^{KW}	y-Koordinate eines Messpunkts im Werkstückkoordinatensystem
YM	Y-Koordinatenachse des Maschinenkoordinatensystems
YW	Y-Koordinatenachse des Werkstückkoordinatensystems
z_{ij}	z-Koordinate eines Messpunkts im Maschinenkoordinatensystems
z_{ij}^{KW}	z-Koordinate eines Messpunkts im Werkstückkoordinatensystem
ZM	Z-Koordinatenachse des Maschinenkoordinatensystems
ZW	Z-Koordinatenachse des Werkstückkoordinatensystems

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 4731934 A [0002]
- DE 10102383 A1 [0003]
- DE 10340851 A1 [0003]
- DE 102007015947 B4 [0004]
- WO 2009/124767 A1 [0005]
- DE 102012023377 B3 [0006]
- DE 19651232 C1 [0007]

Patentansprüche

1. Verfahren zur Justage der Lage eines rotationssymmetrischen Werkstücks (16) mit einer gekrümmten oberen Fläche (17) in einem Messgerät (15), das eine um eine Drehachse (C) antreibbaren Werkstückträger (23) aufweist, der über eine Justageanordnung (24) gegenüber der Drehachse (C) gekippt und rechtwinkelig zur Drehachse (C) zwei Raumrichtungen bewegbar ist, wobei das Messgerät (15) eine Sensoreinheit (18) zum Messen von Messpunkten ($x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, c_i$) in einem Maschinenkoordinatensystem (KM) des Messgeräts (15) auf der Außenfläche des Werkstücks (16) aufweist, mit folgenden Schritten:

- S1: Messen von mehreren Messpunkten ($x_{1j}, y_{1j}, z_{1j}, c_1$) in einer Messebene (E) des Maschinenkoordinatensystems (KM) auf der oberen Fläche (17) des Werkstücks (16) in einer ersten Drehlage (c_1) des Werkstücks (16) um die Drehachse (C),
- S2: Drehen des Werkstückträgers (23) mit dem Werkstück (16) um einen Drehwinkel (6) um die Drehachse (C) in eine zweite Drehlage (c_2),
- S3: Messen von mehreren Messpunkten ($x_{2j}, y_{2j}, z_{2j}, c_2$) in derselben Messebene (E) im Maschinenkoordinatensystem (KM) auf der oberen Fläche (17) des Werkstücks (16) in der zweiten Drehlage (c_2) des Werkstücks (16),
- S4: Ermitteln eines Kippwinkels (γ) und einer Verschiebung (t), aus einer durch die gemessenen Messpunkte ($x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, c_i$) beschriebenen Istlage (Li) des Werkstücks (16) in eine Solllage (Ls) des Werkstücks (16),
- S5: Ansteuern der Justageanordnung (24) abhängig vom Kippwinkel (γ) und der Verschiebung, um die Istlage (Li) mit der Solllage (Ls) in Übereinstimmung zu bringen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Maschinenkoordinatensystem (KM) eine Koordinatenachse (ZM) parallel zu der Drehachse (C) und zwei Koordinatenachsen (XM, YM) rechtwinkelig zu der Drehachse (C) aufweist.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der ermittelte Kippwinkel (γ) jeweils eine Kippwinkelkomponente (α, β) um eine von den beiden Koordinatenachsen (XW, YW) des Werkstückkoordinatensystems (KW) aufweist.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die ermittelte Verschiebung (t) jeweils eine Verschiebungskomponente (t_x, t_y) in Richtung einer von den beiden Koordinatenachsen (XW, YW) des Werkstückkoordinatensystems (KW) aufweist.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die ermittelte Verschiebung (t) jeweils eine Verschiebungskomponente (t_z) in Richtung der Koordinatenachse (ZW) des Werkstückkoordinatensystems (KW) aufweist, die parallel zur Drehachse (C) ausgerichtet ist.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Anschluss an den Schritt S5 in einem Schritt S6 die Übereinstimmung der Istlage (Li) mit der Solllage (Ls) geprüft wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass dann, wenn im Schritt S6 festgestellt wurde, dass die Istlage (Li) und die Solllage (Ls) nicht mit einer vorgegeben Genauigkeit übereinstimmen, die Schritte S1 bis S6 wiederholt werden.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Messpunkte ($x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, c_i$) zum Ermitteln des Kippwinkels (γ) und der Verschiebung (t) im Schritt S4 zunächst in Punkte ($x_{ij}^{KW}, y_{ij}^{KW}, z_{ij}^{KW}$) im Werkstückkoordinatensystem (KW) des Werkstücks (16) umgerechnet werden.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Messpunkte ($x_{ij}^{KW}, y_{ij}^{KW}, z_{ij}^{KW}$) zum Ermitteln des Kippwinkels (γ) und der Verschiebung (t) im Schritt S4 derart in eine bekannte Sollgeometrie der oberen Fläche (17) des Werkstücks (16) eingepasst werden, dass die Abweichung zwischen der durch die Messpunkte ($x_{ij}^{KW}, y_{ij}^{KW}, z_{ij}^{KW}$) beschriebenen gemessenen Geometrie und der Sollgeometrie minimal ist.

10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sollgeometrie des Werkstücks (16) so vorgegeben ist, dass sie gleichzeitig die Solllage (Ls) beschreibt.

11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass jeder Messpunkte ($x_{ij}^{KW}, y_{ij}^{KW}, z_{ij}^{KW}$) jeweils einem Zielpunkt (P_{1j}, P_{2j}) der Sollgeometrie zugeordnet wird und abhängig von den Vektoren (V_{ij}) von jedem Messpunkt ($x_{ij}^{KW}, y_{ij}^{KW}, z_{ij}^{KW}$) zu dem zugeordnet Zielpunkt (P_{1j}, P_{2j}) der Kippwinkel (γ) und die Verschiebung

(t) derart ermittelt wird, dass die Abweichung zwischen der gemessenen Geometrie und der Sollgeometrie minimal ist.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Koordinatenursprung des Werkstückkoordinatensystems (KW) auf der Symmetriearchse (A) des rotationssymmetrischen Werkstücks (16) und auf der oberen Fläche (17) liegt.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schritte S2 und S3 N mal ausgeführt werden, wobei N eine natürliche Zahl ungleich Null ist, so dass Messpunkte (x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} , c_i) in wenigstens zwei Drehlagen (c_1 , c_2) gemessen werden, wobei ein Solldrehwinkel (δ_{sol}) gleich 180° geteilt durch N + 1 ist.

14. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass der eingestellte Drehwinkel (δ) von dem Solldrehwinkel (δ_{sol}) um betragsmäßig maximal 5° oder 10° abweichen kann.

15. Verfahren nach Anspruch 13 oder 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei einer vorgegebenen Anzahl von Iterationen N durch eine größere Anzahl von Drehstellungen (c_i) eine verbesserte Genauigkeit der Justage der Symmetriearchse (A) des Werkstücks (16) entlang der Drehachse (C) erreicht wird.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass je größer die Anzahl der Drehstellungen (c_i) ist, für jeweils eine Messwertfolge von Messpunkten (x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} , c_i) gemessen wird, desto weniger Iterationen N werden zur Erzielung einer vorgegebenen Genauigkeit der Justage der Symmetriearchse (A) des Werkstücks (16) entlang der Drehachse (C) benötigt.

17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass dann, wenn die Lage von Justageachsen (25, 26) der Justageanordnung (24) nicht mit ausreichender Genauigkeit bekannt ist, der Schritt S5 wie folgt ausgeführt wird:

- S5a: Ansteuerung der Justageeinheit (24) zum Kippen des Werkstücks (16) abhängig vom Kippwinkel (γ),
- S5b: Drehen des Werkstückträgers (23) mit dem Werkstück (16) in eine Drehlage (c_i) und Messen von mehreren Messpunkten (x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} , c_i) in der Messebene (E) des Maschinenkoordinatensystem (KM) auf der oberen Fläche (17) des Werkstücks (16) in dieser Drehlage
- S5c: Drehen des Werkstückträgers (23) mit dem Werkstück (16) in eine andere Drehlage (c_{i+1}) und Messen von mehreren Messpunkten ($x_{i+1,j}$, $y_{i+1,j}$, $z_{i+1,j}$, c_{i+1}) in der Messebene (E) des Maschinenkoordinatensystem (KM) auf der oberen Fläche (17) des Werkstücks (16) in dieser Drehlage (c_{i+1}),
- S5d: Ermitteln jeweils eines aktuellen Werts des Kippwinkels (γ) und der Verschiebung (t) aus der durch die gemessenen Messpunkte ($(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, c_i); (x_{i+1,j}, y_{i+1,j}, z_{i+1,j}, c_{i+1})$) beschriebenen Istlage (Li) des Werkstücks (16) in die Solllage (Ls) des Werkstücks (Ls), wobei die Messpunkte ($(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, c_i); ((x_{i+1,j}, y_{i+1,j}, z_{i+1,j}, c_{i+1}))$ der Schritte S5c und S5d verwendet werden,
- S5e: Ansteuern der Justageanordnung (24) abhängig vom Kippwinkel (γ) und der Verschiebung (t) aus dem Schritt S5d, um die Istlage (Li) mit der Solllage (Ls) in Übereinstimmung zu bringen.

18. Messgerät (15), das zur Ausrichtung eines rotationssymmetrischen Werkstücks (16) mit einer gekrümmten oberen Fläche (17) eingerichtet ist,

mit einem um eine Drehachse (C) antreibbaren Werkstückträger (23), der über eine Justageanordnung (24) gegenüber der Drehachse (C) gekippt und rechtwinklig zur Drehachse (C) in zwei Raumrichtungen bewegbar ist,

mit einer Sensoreinheit (18) zum Messen von Messpunkten (x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} , c_i) in einem Maschinenkoordinatensystem (KM) des Messgeräts (18) auf einer Außenfläche des Werkstücks (16),

und mit Steuereinrichtung (21), die dazu eingerichtet ist folgende Schritte auszuführen:

- S1: Messen von mehreren Messpunkten (x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} , c_i) in einer Messebene (E) des Maschinenkoordinatensystems (KM) auf der oberen Fläche (17) des Werkstücks (16) in einer ersten Drehlage (c_1) des Werkstücks (16),
- S2: Drehen des Werkstückträgers (23) mit dem Werkstück (16) um einen Drehwinkel (δ) in eine zweite Drehlage (C2),
- S3: Messen von mehreren Messpunkten (x_{2j} , y_{2j} , z_{2j} , c_2) in derselben Messebene (E) im Maschinenkoordinatensystem (KM) auf der oberen Fläche (17) des Werkstücks (16) in der zweiten Drehlage (c_2) des Werkstücks (16),
- S4: Ermitteln eines Kippwinkels (γ) und einer Verschiebung (t), aus einer durch die gemessenen Messpunkte ($x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, c_i$) beschriebenen Istlage (Li) des Werkstücks (16) in eine Solllage (Ls) des Werkstücks (16),

– S5: Ansteuern der Justageanordnung (**24**) abhängig vom Kippwinkel (γ) und der Verschiebung, um die Istlage (Li) mit der Solllage (Ls) in Übereinstimmung zu bringen.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

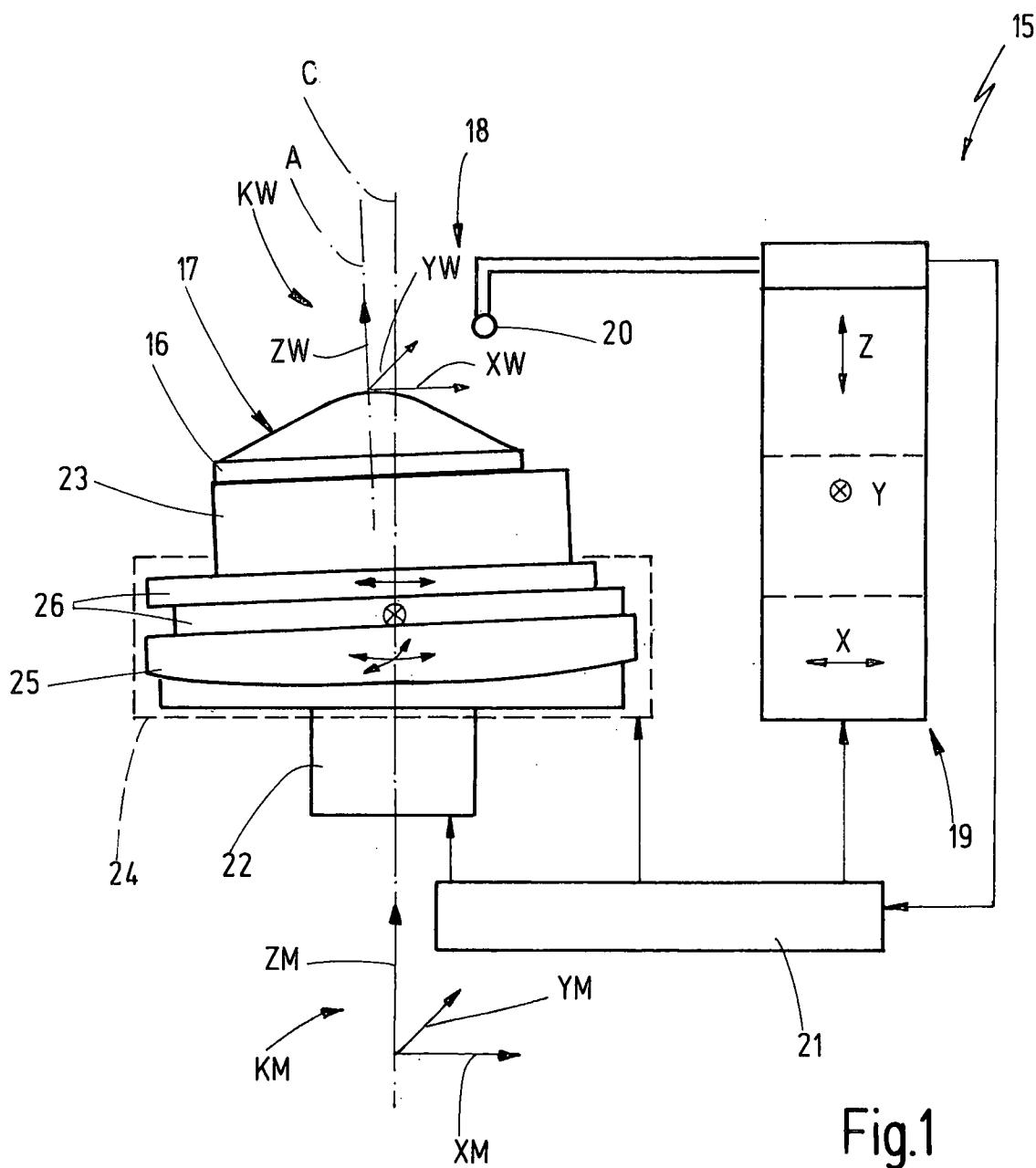


Fig.1

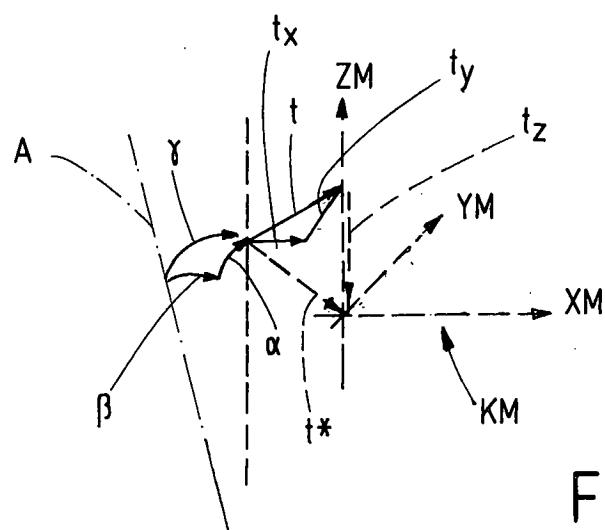


Fig.2

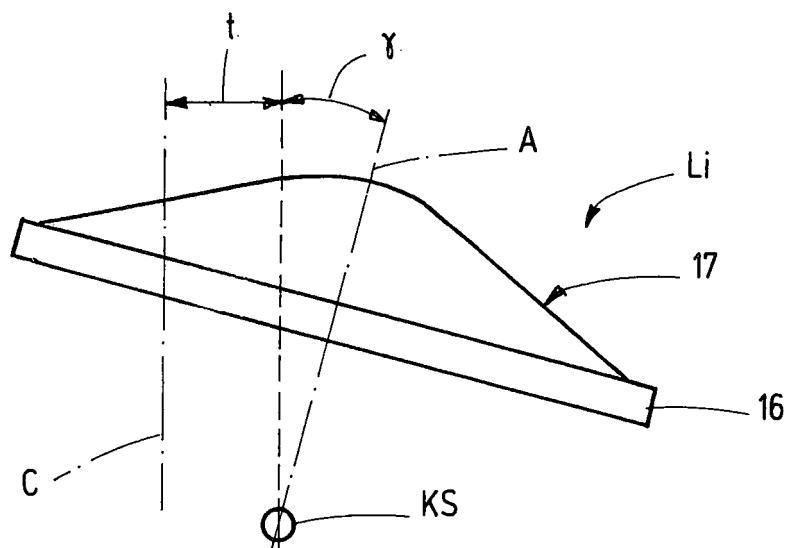


Fig.3a

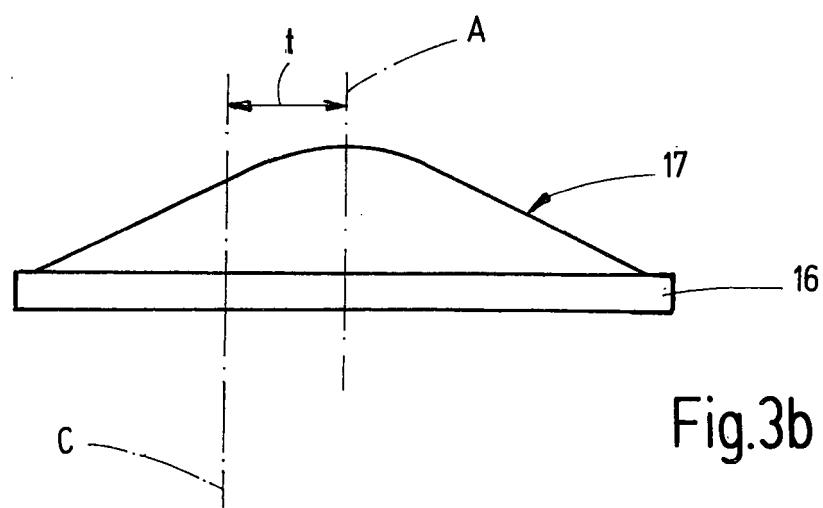


Fig.3b

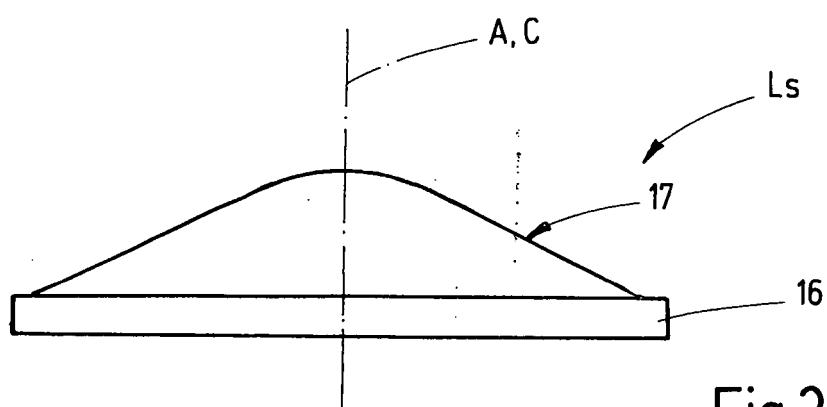


Fig.3c

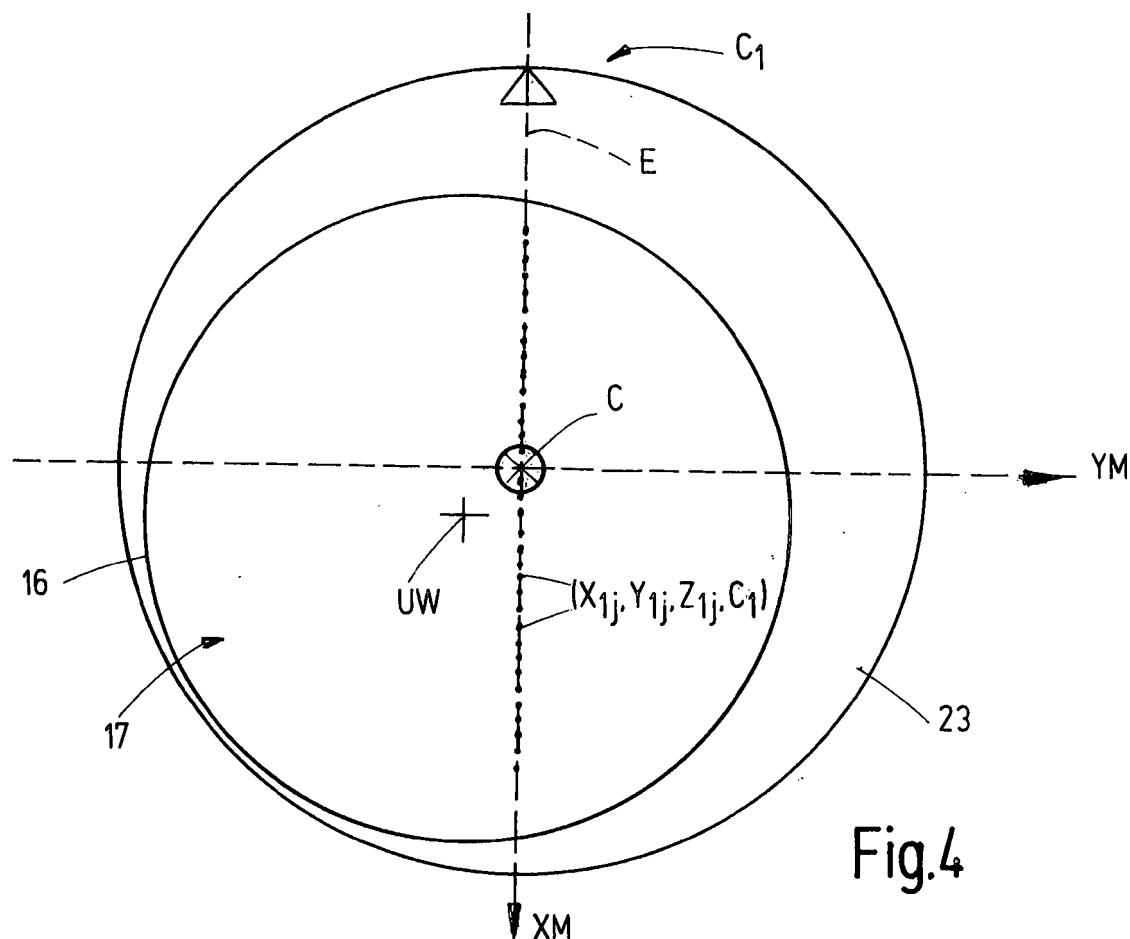


Fig.4

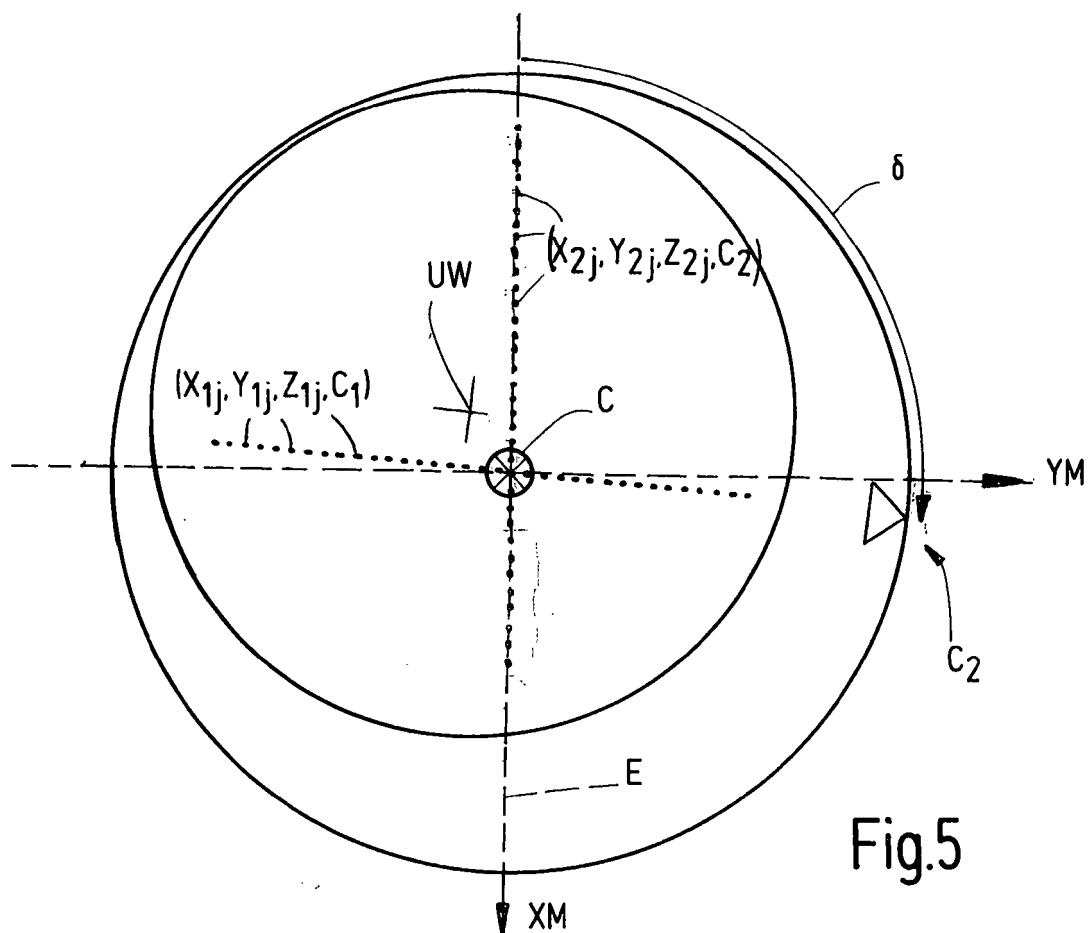


Fig.5

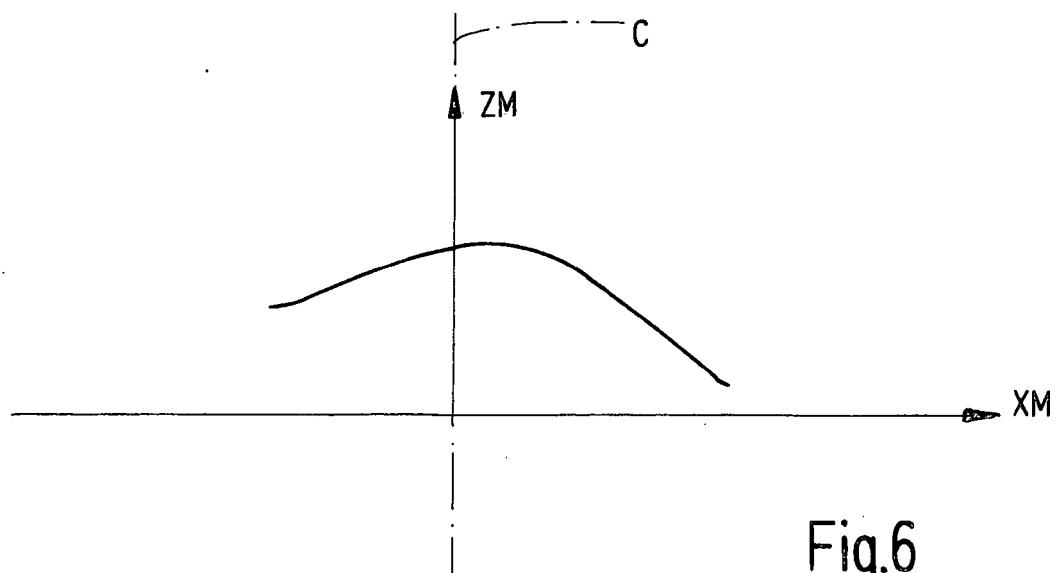


Fig.6

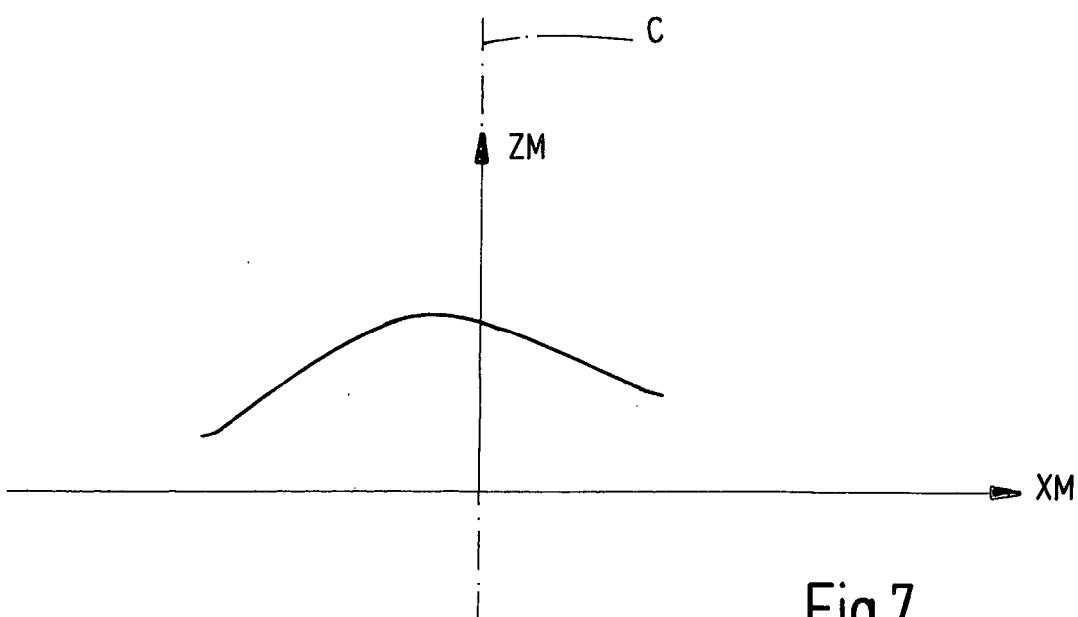


Fig.7

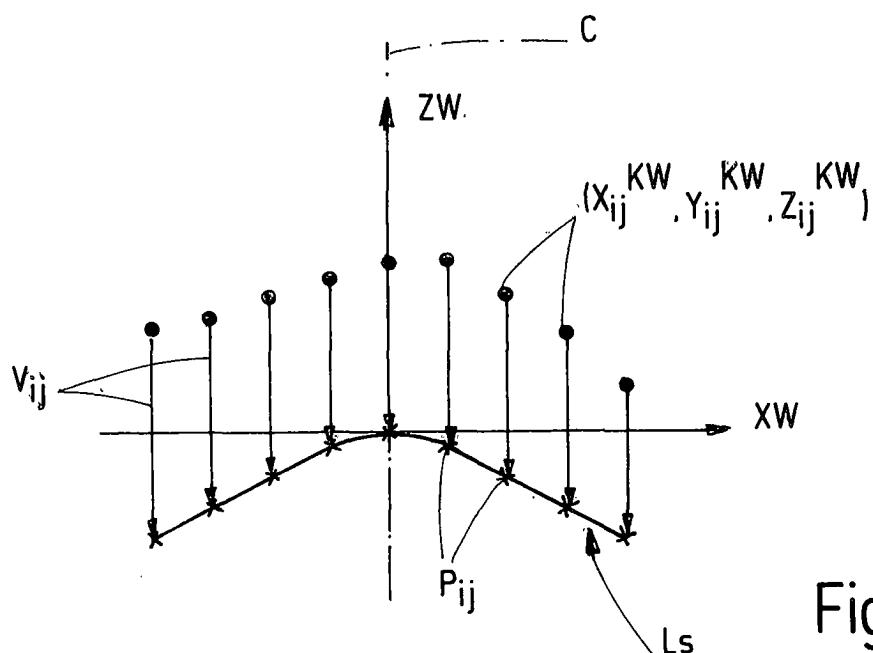


Fig.8

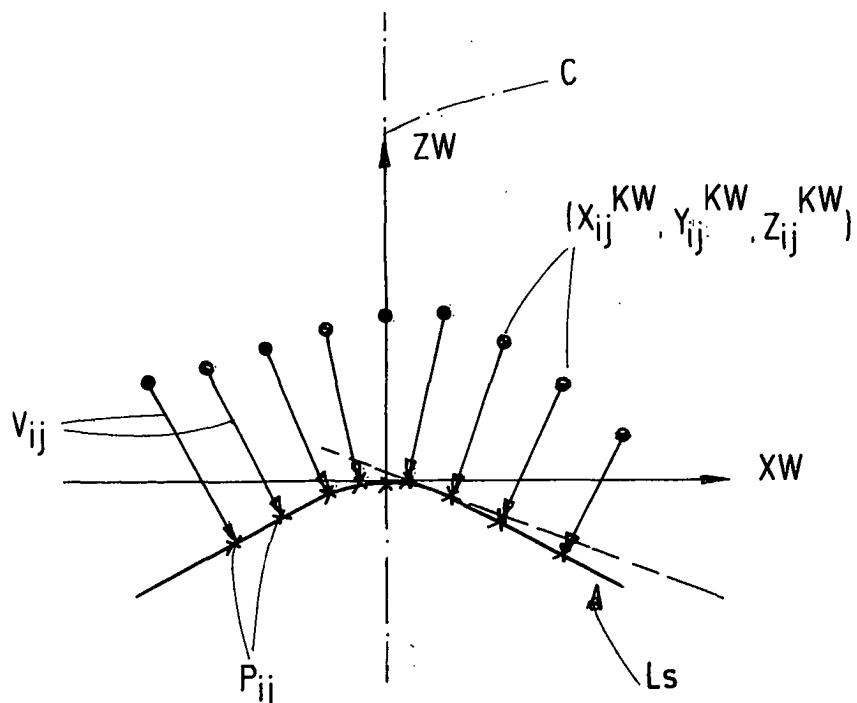


Fig.9