



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2019 220 247.0**  
(22) Anmeldetag: **19.12.2019**  
(43) Offenlegungstag: **24.06.2021**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **26.09.2024**

(51) Int Cl.: **G01B 11/03 (2006.01)**  
**G01B 21/04 (2006.01)**  
**G12B 13/00 (2006.01)**  
**G01B 11/27 (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).

(62) Teilung in:  
**10 2019 009 473.5**

(73) Patentinhaber:  
**Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, 73447  
Oberkochen, DE**

(74) Vertreter:  
**Patentanwälte Bressel und Partner mbB, 10785  
Berlin, DE**

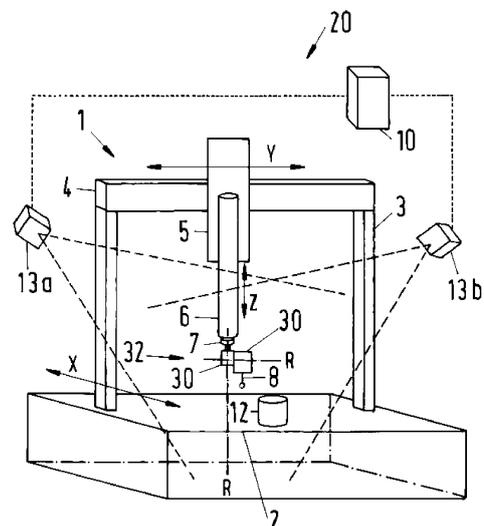
(72) Erfinder:  
**Held, Tobias, 86720 Nördlingen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**siehe Folgeseiten**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Anordnung zum optischen Kalibrieren von Drehachsen für  
Koordinatenmessungen**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Kalibrieren einer Drehachse (30) für Koordinatenmessungen, wobei wenigstens eine Drehachse (30) sowie zwei Markeranordnungen (100, 107, 109) und wenigstens zwei Erfassungseinrichtungen (13a, 13b) bereitgestellt sind, und wobei das Verfahren umfasst:

- Erzeugen einer Relativbewegung zwischen wenigstens einer der Markeranordnungen (100, 107, 109) und den Erfassungseinrichtungen (13a, 13b) und von den Markeranordnungen (100, 107, 109) zueinander mittels der Drehachse (30), während die Erfassungseinrichtungen (13a, 13b) die Markeranordnungen (100, 107, 109) jeweils optisch erfassen;
- Ermitteln von Koordinaten der Markeranordnungen (100, 107, 109) auf Basis von Erfassungsinformationen der optischen Erfassungseinrichtungen (13a, 13b);
- Bestimmen von Kalibrierinformationen zum Kalibrieren der Drehachse (30) anhand der ermittelten Koordinaten.



(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	36 37 410	A1
DE	100 06 753	A1
DE	100 07 062	A1
EP	0 963 816	A2
EP	2 431 707	A2
WO	2014/ 108 188	A1
JP	2003- 117 861	A

**HORN, Alfred: Doubly stochastic matrices and the diagonal of a rotation matrix. In: American Journal of Mathematics, Vol. 76, 1954, No. 3, S. 620-630. - ISSN 0002-9327 (P); 1080-6377 (E). DOI: 10.2307/2372705**

**LUHMANN, Thomas:  
Nahbereichsphotogrammetrie : Grundlagen – Methoden – Beispiele. 4., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin : Wichmann, 2018. Deckblatt u. Inhaltsverzeichnis. - ISBN 978-3-87907-640-6**

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anordnung zum optischen Kalibrieren von Drehachsen, die für Koordinatenmessungen verwendet werden.

**[0002]** Das maschinelle Ermitteln von Objektkoordinaten mittels Koordinatenmessgeräten (KMG) ist verbreitet und bekannt. Koordinatenmessgeräte umfassen in der Regel eine Mehrzahl von bewegbaren Achsen, um einen hiervon geführten Messsensor (oder auch Messkopf) zum Vermessen eines Objekts und/oder das Objekt selbst zu bewegen. Insbesondere sollen hierdurch unterschiedliche Bereiche der Objekte durch Erzeugen benötigter Relativbewegungen vermessen werden. Bei dem Objekt kann es sich um ein bevorzugt maschinell gefertigtes Werkstück handeln.

**[0003]** Es ist bekannt, den Messsensor, der ein taktiler Sensor oder ein optischer Sensor sein kann, mittels wenigstens einer Drehachse relativ zu dem Objekt auszurichten. Unter einer Drehachse (oder auch Rotationsachse) kann dabei eine angetriebene und/oder ansteuerbare Achse verstanden werden, die eine Rotationsbewegung erzeugen kann. Anders ausgedrückt kann es sich hierbei um ein bevorzugt elektrisch angetriebenes und/oder elektronisch oder digital ansteuerbares Rotationsgelenk handeln. Mit der Drehachse gekoppelte Komponenten können dann in einer gewünschten Weise verdreht werden.

**[0004]** Bei Koordinatenmessgeräten kommen Drehachsen zum Beispiel in sogenannten Drehtischen zum Einsatz, auf denen typischerweise das zu vermessene Objekt positioniert wird. Ein Beispiel hierzu findet sich in der DE 36 37 410 A1.

**[0005]** Ebenso kommen Drehachsen in Einheiten zum Einsatz, mit denen der Messsensor aktiv bewegt wird. Hierbei kann es sich zum Beispiel um eine Drehachse handeln die, an einer Pinole des Koordinatenmessgeräts angeordnet wird oder allgemein mittels wenigstens einer bevorzugt linearen Achse des Koordinatenmessgeräts verlagerbar ist. Diese Drehachse kann den Messsensor mit dem Koordinatenmessgerät und insbesondere der erwähnten Pinole oder Linearachse verbinden und ferner bevorzugt relativ hierzu verdrehen. Bekannt ist der Einsatz derartiger Drehachsen in sogenannten Dreh-Schwenk-Gelenken, die zwei Drehachsen umfassen, deren Rotationsachsen senkrecht zueinander verlaufen, und die typischerweise an einer Pinole des Koordinatenmessgeräts angeordnet werden. Ein Beispiel hierzu findet sich in der DE 100 06 753 A1 und DE 100 07 062 A1.

**[0006]** Die Erfindung richtet sich prinzipiell auf jegliche der oben genannten Arten von Drehachsen, ohne aber darauf beschränkt zu sein.

**[0007]** Um eine gewünschte Messgenauigkeit zu erreichen, müssen die Drehachsen eine hohe Genauigkeit aufweisen. Idealerweise sind die Drehachsen steif und fehlerfrei und lassen nur eine Rotationsbewegung um die vorgesehene Rotationsachse zu. Idealerweise wird diese Bewegung dann auch fehlerfrei mit einem Winkelmesssystem erfasst. In der Realität ist dies aber aus vielfachen Gründen nicht erreichbar, beispielsweise da Ungenauigkeiten bei der Fertigung von Bauteilen der Drehachse auftreten und Temperatureinflüsse vorliegen. Mögliche Fehler von Drehachsen werden zum Beispiel in der Norm ISO 230-7:2015 definiert und auch in der Beschreibungseinleitung der oben genannten DE 36 37 410 A1.

**[0008]** Systemimmanente und folglich reproduzierbare Fehler von Drehachsen können mittels einer Kalibrierung ermittelt und dann bevorzugt rechnerisch bei realen Objektvermessungen kompensiert werden. Gemäß obiger Norm ist es beispielsweise bekannt, sogenannte Korrektur- oder auch Fehlertabellen während einer Kalibrierung anzulegen und auf diese zwecks einer Messwertkorrektur (insbesondere Winkelwertkorrektur) im weiteren Betrieb zurückzugreifen.

**[0009]** Die geforderten Genauigkeiten, mit der diese Fehler ermittelt werden sollen, liegen bei Winkelpositionsabweichungen typischerweise unter 10  $\mu$ rad und bei anderen Laufabweichungen oder allgemeinen Bewegungsfehlern bei unter 2  $\mu$ m.

**[0010]** Für den Kalibriervorgang sind bereits zahlreiche Lösungen vorgeschlagen worden. Diese zeichnen sich jedoch oftmals dadurch aus, dass aufwändige Systeme zum Vermessen der Drehachse bzw. von deren Fehlern erforderlich sind, um die vorstehend erwähnten Genauigkeiten zu erfüllen. Diese Systeme müssen angeschafft, eingerichtet und bedient werden, was jeweils mit Kosten, Aufwand und einem hohen Maß an erforderlichem Fachwissen einhergeht. Dies ist insbesondere dann nachteilig, wenn die Kalibrierung, wie allgemein üblich, auch beim Kunden in regelmäßigen Abständen wiederholt werden soll.

**[0011]** Bei der oben genannten DE 36 37 410 A1 ist zum Beispiel eine Kugelplatte erforderlich, die entsprechend genau gefertigt werden muss. Bei der ebenfalls oben genannten DE 100 06 753 A1 und DE 100 07 062 A1 ist die Fehlerermittlung nicht im eigentlichen Zielsystem (d. h. in dem KMG, in dem die Drehachse zum Einsatz kommen soll) möglich, sondern die Drehachsen müssen ausgebaut und in

speziellen Kalibriervorrichtungen ausgerichtet und vermessen werden.

**[0012]** Weiter sind aus der WO 2014 / 108 188 A1 und EP 2 431 707 A2 Verfahren zur Fehlerkomponentenbestimmungen bekannt, bei denen jeweils Zusatzvorrichtungen, wie ein Winkelmessgerät, ein Reflektor, ein Laserinterferometer und/oder mehrere Spiegel erforderlich sind und exakt ausgerichtet werden müssen.

**[0013]** Die EP 0 963 816 A2 offenbart ein Verfahren zum Erfassen und Kompensieren von kinematischen Veränderungen eines Roboters aufgrund interner und/oder externer Einflüsse. Dabei werden kinematische Veränderungen eines Roboters anhand einer Abweichung zwischen einer erfassten tatsächlichen räumlichen Ist-Stellung des Roboters und dessen theoretischer räumlicher Soll-Stellung angepasst und dadurch kompensiert.

**[0014]** Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, den Aufwand zur Kalibrierung von Drehachsen, die für die Koordinatenmessung verwendet werden, unter Einhalten einer geforderten Genauigkeit zu vereinfachen.

**[0015]** Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren und eine Anordnung gemäß den beigefügten unabhängigen Ansprüchen gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Ferner versteht es sich, dass die in der einleitenden Beschreibung erwähnten Merkmale einzeln oder in beliebiger Kombination auch bei der vorliegend offenbarten Lösung vorgesehen sein können, sofern nicht anders angegeben oder ersichtlich.

**[0016]** Der Erfinder hat erkannt, dass durch optisches Erfassen von Komponenten und insbesondere von deren Koordinaten Kalibriervorgänge von Koordinatenmessgeräten vereinfacht werden können. Genauer gesagt können die Freiheitsgrade, also Position und Orientierung, welche gemeinsam eine Pose bzw. Lage definieren, optisch aufwandsarm erfasst werden. Insbesondere können optisch erfassbare Marker (hierin auch lediglich als optische Marker bezeichnet) an Komponenten eines Koordinatenmessgeräts angebracht und gemeinsam hiermit bewegbar sein. Die Bewegungen der Marker und somit der Komponenten sind optisch erfassbar, typischerweise mittels digitaler Kamerasysteme. Derartige Ansätze werden üblicherweise der Photogrammetrie zugeordnet. Die Erfindung überwindet dabei das Vorurteil, dass kamerabasierte Objekterfassungen eine geringe Genauigkeit besitzen daher für Kalibrierungen in dem vorliegenden technischen Gebiet prinzipiell ungeeignet wären.

**[0017]** Genauer gesagt schlägt die Erfindung eine optische Kalibrierung von der Drehachse eines Koor-

dinatenmessgeräts vor. Lösungen, die auf einer optischen Erfassung von Bewegungen einer Komponente (die beispielsweise von einer Drehachse bewegt wird oder Teil der Drehachse ist) zwecks einer Kalibrierung beruhen, können hierin allgemein als optische Kalibrierung (d.h. Kalibrierung mittels oder auf Basis optischer Erfassungen) bezeichnet werden.

**[0018]** Die Drehachse kann zum Beispiel in einem Koordinatenmessgerät fest verbaut sein. Sie kann aber losgelöst bzw. als eine Einzelkomponente, zum Beispiel während einer Wartung oder nach ihrer Herstellung, erfindungsgemäß kalibriert werden.

**[0019]** Vorteile des erfindungsgemäßen Vorgehens sind ein geringer Aufwand zur Kalibrierung, insbesondere hinsichtlich Einrichtung und Bedienung des optischen Erfassungssystems. Auch fallen die Kosten zum Beispiel im Vergleich zu Lösungen mit Laserinterferometern vergleichsweise gering aus. Weiter können erforderliche Qualifikationen eines Bedieners vergleichsweise gering ausfallen.

**[0020]** Zudem ist es möglich, die Drehachse auch im eingebauten Zustand (d. h. im Zielsystem, insbesondere im Koordinatenmessgerät) und daher auch direkt beim Kunden zu kalibrieren. Weiter sind Kalibrierungen von verschiedensten Arten von Drehachsen mit demselben (Erfassungs-) System möglich, zum Beispiel von sowohl Drehtischachsen als auch von Dreh-Schwenk-Gelenksachsen.

**[0021]** Insbesondere schlägt die Erfindung ein Verfahren zum Kalibrieren einer Drehachse für Koordinatenmessungen mit den Merkmalen des beigefügten Anspruchs 1 vor, und u.a., wobei eine Drehachse (zum Beispiel von einem, in einem oder für ein Koordinatenmessgerät) sowie zwei Markeranordnungen und wenigstens zwei Erfassungseinrichtungen bereitgestellt sind, und wobei das Verfahren umfasst:

- Erzeugen einer Relativbewegung zwischen wenigstens einer der Markeranordnungen und den Erfassungseinrichtungen mittels der Drehachse, während die Erfassungseinrichtungen die Markeranordnungen jeweils optisch erfassen;
- Ermitteln von Koordinaten der Markeranordnung auf Basis von Erfassungsinformationen der optischen Erfassungseinrichtungen;
- Bestimmen von Kalibrierinformationen zum Kalibrieren der Drehachse anhand der ermittelten Koordinaten.

**[0022]** Die Erfassungseinrichtungen können alternativ auch als Bildaufzeichnungseinrichtungen bezeichnet werden. Insbesondere kann es sich um digitale Kameras handeln. Die Erfassungseinrichtun-

gen können jeweils Bilder (auch als Aufzeichnungsbilder oder Kamerabilder bezeichnerbar), insbesondere in Form von digitalen Bildern und/oder digitalen Dateien erfassen und/oder aufzeichnen. Diese Bilder können ausgegeben werden, beispielsweise zwecks Auswertung oder Abspeicherung. Die Bilder können Informationen zu einer erfassten Szene (insbesondere mit darin erfassten Markern) enthalten. Die Informationen können Pixelwerte sein oder beschreiben. Derartige Werte können zum Beispiel Grauwerte, Farbwerte oder binäre Werte sein, die in einem Bildkoordinatensystem definiert sind.

**[0023]** Die Erfassungseinrichtungen können mittels bekannter Verfahren intrinsisch und/oder extrinsisch kalibriert sein oder (als eine erfindungsgemäß umfasste Maßnahme) entsprechend kalibriert werden. Sind Referenzdaten der Markieranordnung verfügbar, die in bekannter Weise eine relative Lage von Einzelmarkern der Markieranordnung zueinander beschreiben, kann die extrinsisch (oder auch äußere) Kalibrierung auch aus Einzelbildern einer der Erfassungseinrichtungen ermittelt werden, d. h. ohne Einzelbilder verschiedener Erfassungseinrichtungen gemeinsam zu verarbeiten und/oder miteinander zu vergleichen.

**[0024]** Wie bereits erläutert, kann die Drehachse in einem Rotationsgelenk des Koordinatenmessgeräts integriert sein und/oder ein solches Rotationsgelenk bilden. Die Drehachse kann von wenigstens einer weiteren Achse des Koordinatenmessgeräts in einem Arbeitsraum des Koordinatenmessgeräts variabel positionierbar sein. Alternativ kann die Drehachse von einem (in der Regel ortsfesten) Drehtisch des Koordinatenmessgeräts umfasst sein oder einen solchen Drehtisch bereitstellen.

**[0025]** Es kann sich allgemein um eine mechanische Drehachse (d. h. eine mechanische Baugruppe) handeln, die bevorzugt elektronisch und/oder digital ansteuerbar ist.

**[0026]** Insbesondere kann sie eine Antriebseinrichtung zum Beispiel in Form eines Elektromotors zum Ausführen einer Drehbewegung umfassen.

**[0027]** Hiervon zu unterscheiden ist die hierin ebenfalls erwähnte Rotationsbewegungsachse (oder auch lediglich Rotationsachse) der Drehachse. Hierbei kann es sich um eine virtuelle Achse handeln, um die die Drehachse als reale Baugruppe ihre Rotationsbewegung ausführt. Die Rotationsbewegungsachse kann zum Beispiel orthogonal auf einem die Drehachse umfassenden Drehtisch stehen oder orthogonal durch ein die Drehachse umfassendes Drehgelenk verlaufen.

**[0028]** Unter einem Koordinatenmessgerät kann ein Gerät verstanden werden, dass zum Erfassen von

Koordinaten eines Bauteils eingerichtet ist und insbesondere von dessen Oberflächenkoordinaten. Diese können zum Beispiel optisch oder taktil erfasst werden. Das Koordinatenmessgerät kann dazu eingerichtet sein, einen Messsensor derart zu bewegen, dass dieser das Bauteil und insbesondere dessen Oberfläche in gewünschten Bereichen antasten kann.

**[0029]** Hierfür kann das Koordinatenmessgerät zusätzlich zu der Drehachse bevorzugt eine Mehrzahl von weiteren Bewegungsachsen umfassen, insbesondere eine Mehrzahl von Linearachsen. Diese können zum Beispiel paarweise orthogonal zueinander verlaufen. Gängige Bauarten von Koordinatenmessgeräten, die auch im Rahmen der vorliegenden Erfindung vorgesehen sein können, betreffen zum Beispiel eine Portalbauweise oder Brückenbauweise.

**[0030]** Das Koordinatenmessgerät kann auch ein Positionsmesssystem umfassen, um die Position und/oder Orientierung (d. h. die räumliche Lage) eines Messsensors (und insbesondere eines Messstasters und/oder optischen Messkopfes) zu erfassen. Insbesondere kann das Positionsmesssystem dazu eingerichtet sein, Stellungen (zum Beispiel im Sinne eines aktuellen Bewegungsausmaßes) der Bewegungsachsen des Koordinatenmessgeräts zu erfassen. Daraus kann dann die vorstehend erwähnte Position und/oder Orientierung berechnet werden.

**[0031]** Die Markieranordnung kann auch als ein Target bezeichnet werden. Die Markieranordnung kann eine Mehrzahl von Einzelmarkern umfassen. Für jeden dieser Einzelmarker kann dann wenigstens ein Koordinatenwert (auch als Objektpunkt oder Objektkoordinate bezeichnerbar) und bevorzugt zumindest die vollständige Position (d. h. Koordinaten der drei räumlichen Positionsfreiheitsgrade) und gegebenenfalls auch die Orientierung (d. h. die Koordinaten der drei räumlichen Orientierungsfreiheitsgrade) ermittelt werden. Hieraus können dann in der nachstehend erläuterten Weise Fehleranteile und/oder Kalibrierinformationen der Drehachse ermittelt werden.

**[0032]** Die Einzelmarker können gleichartig ausgebildet sein (zum Beispiel jeweils eine gleichartige geometrische Form und/oder geometrische Eigenschaften aufweisen), können jedoch voneinander abweichende Abmessungen aufweisen (d. h. unterschiedlich skaliert sein).

**[0033]** Es können auch Mischformen aus verschiedenartigen Einzelmarkern vorgesehen sein. Zumindest einer der Einzelmarker kann als Referenz zum Identifizieren anderer Einzelmarker dienen, die z.B. hinsichtlich ihrer Identität nicht anderweitig codiert und/oder markiert sind. Insbesondere können diese

anderen Einzelmarker zumindest teilweise gleichartig und/oder gleichförmig und/oder gleich dimensioniert sein. Insbesondere kann zumindest einer der Einzelmarker eine Referenz bilden, in Bezug auf die die Einzelmarker (z.B. abstandsabhängig und/oder virtuell) nummeriert werden. Auf diese Weise können die jeweiligen Einzelmarker in den Bildern unterschiedlicher Erfassungseinrichtungen identifiziert und z.B. in ein Verhältnis gesetzt und/oder einander zugeordnet werden (z.B. im Rahmen einer Triangulation). Die Anzahl der als Referenz dienenden Marker kann die Anzahl der weiteren Marker unterschreiten (beispielsweise können wenigstens zehnmal mehr weitere Marker vorgesehen sein).

**[0034]** Beispielsweise kann auch vorgesehen sein, dass ein als Referenz dienender Marker im Rahmen bekannter Rückprojektionsverfahren in die Abbildungsebene zur Ermittlung eines Startwertes und/oder allgemein als ein Ausgangspunkt dient. Es kann dann geprüft werden, ob bei einer Rückprojektion in der Nähe ein aufgenommenes Merkmal (zum Beispiel ein einzelner Marker) eingepasst und somit identifiziert werden kann. Dabei kann in der Nähe bedeuten, dass Größenverhältnisse bei der Rückprojektion überprüft werden. Insbesondere kann ein Vergleich von Nominalradien kreisförmiger Marker aus einem Referenzdatensatz mit einem mittleren Ellipsenradius aus der Detektion eines Markers (also der Bildaufnahme, bei der die kreisförmigen Marker perspektivisch verzerrt abgebildet sein können) sowie einer ermittelten Positionsabweichung (Rückprojektion zu Detektion) durchgeführt werden. Ist die Positionsabweichung kleiner als der Nominalradius und beträgt der ermittelte Ellipsenradius weniger als 30 % des

**[0035]** Nominalradius, so kann das aufgenommene Merkmal als entsprechender Einzelmarker identifiziert werden

**[0036]** Wenigstens einer der Einzelmarker kann dazu dienen, eine Orientierung der Markeranordnung zum Beispiel relativ zu einer jeweiligen Erfassungseinrichtung und/oder allgemein für eine Rückprojektion aus der (zweidimensionalen) Bildebene in die (dreidimensionale) Projektionsebene zu bestimmen. Andere der Einzelmarker können hingegen dazu dienen, eine jeweilige Position und/oder Orientierung dieser Einzelmarker zu bestimmen.

**[0037]** Ein Beispiel für Einzelmarker sind ausgefüllte (bevorzugt dunkle) Kreise. Ein anderes Beispiel ist der Schnittpunkt wenigstens zweier Geraden, zum Beispiel der Schnittpunkt zwischen mehreren Einzelmarkern (genauer gesagt vier Feldern) eines Schachbrettmusters. Ein weiteres Beispiel für einen Einzelmarker ist eine Grauwertverteilung und/oder ein Grauwertmuster. Bevorzugte Typen von Einzelmarkern sind sogenannte Aruco-Marker, Optinav-Marker

oder ring-codierte Marker. Einzelmarker können sich von einem Untergrund zum Beispiel farblich und/oder durch andere Grauwerte abheben.

**[0038]** Beispielsweise kann eine zweidimensionale Gaussverteilung („Glockenkurve“) von Grauwerten als Marker verwendet werden. In einer Abbildung (d. h. Bildaufnahme des Markers) ergibt sich eine perspektivisch verzerrte Gaussverteilung. Durch Optimierungsrechnung kann die Markerposition in Abbildungskoordinaten aus dieser Aufnahme berechnet werden.

**[0039]** Bei Markern mit Linienmustern, wie Kreisringen, können die Kanten ebenfalls durch Grauwertübergänge abgebildet werden. Vorteilhaft sind hier Sinusverläufe oder Normalverteilung. Im Abbildungsraum werden dann die als Grauwertverteilung abgebildeten Linien in Normalrichtung (die in an sich bekannter Weise als Information z.B. aus einem Rückprojektionsverfahren ermittelbar ist) an vielen Stellen (virtuellmathematisch) geschnitten. Die Berechnung des hellsten bzw. dunkelsten Punktes des Schnittes erfolgt dann bevorzugt mittels mathematischer Faltung, über Ableitung oder durch Einpassung einer asymmetrisch verzerrten Gaus- bzw. Sinuskurve. Aus den mehreren so berechneten Punkten kann dann die Liniengeometrie berechnet werden. So kann bei einem ringförmigen Marker eine Ellipseeinpassung berechnet werden, aus der dann die Markerposition bestimmt werden kann.

**[0040]** Die Punkte eines sogenannten und typischerweise für eine intrinsische Kalibrierung verwendeten „Circle Grid“ können ebenfalls jeweils Einzelmarker darstellen, wobei bevorzugt einzelne Punkte betrachtet und/oder ausgewertet werden, die zumindest ungefähr auf einem gemeinsamen Kreis liegen.

**[0041]** Allgemein kann die Markeranordnung grafischer Art sein und/oder drucktechnisch herstellbar sein. Insbesondere kann es sich um einen Papierausdruck handeln, der entsprechende Einzelmarker enthält. Ebenso ist es möglich, die Markeranordnung auf einen dreidimensionalen Träger aufzubringen oder allgemein dreidimensional auszubilden. Hierfür kommen beispielsweise zylindrische und/oder rotationssymmetrisch um eine Achse (zum Beispiel eine Längsachse) ausgebildete Träger in Betracht.

**[0042]** Die Erfassungseinrichtungen und insbesondere eine hiervon umfasste oder hiermit verbundene Auswertungseinrichtung kann mittels bekannter Bildauswertalgorithmen dazu eingerichtet sein, in den erfassten Bildern bzw. anhand der erfassten Bildinformationen die Einzelmarker zu identifizieren. Insbesondere kann eine Position und/oder Orientierung innerhalb einer Bildebene (oder auch Kameraebene) identifiziert werden, wie sie zum Beispiel mittels eines Pixelkoordinatensystems beschreibbar ist.

**[0043]** Eine solche Ermittlung der Position von Einzelmarkern anhand der und/oder in den erfassten Bildern kann einen gesonderten erfindungsgemäßen Verfahrensschritt darstellen. Insbesondere können ermittelte Positionen von den Erfassungsinformationen der optischen Erfassungseinrichtungen umfasst sein.

**[0044]** Vorteilhafterweise erfolgt das Ermitteln der Position und ggf. auch Orientierung der Einzelmarker möglichst genau. Hierfür kann die Markeranordnung entsprechend gestaltet sein. Beispielsweise können deutlich mehr Einzelmarker für eine vorstehend diskutierte Positionsermittlung als Einzelmarker für eine Orientierungsermittlung (der Markeranordnung) vorgesehen sein, z.B. mindestens dreimal oder fünfmal so viele.

**[0045]** Allgemein können die Erfassungsinformationen Bilder und/oder Bilddateien an sich sein. Wie erwähnt, kann es sich aber zusätzlich oder alternativ um Positionsinformationen der Einzelmarker zum Beispiel in einer Bildebene handeln.

**[0046]** Bei den ermittelten Koordinaten der Markeranordnung, die auf Basis dieser Erfassungsinformationen bestimmt werden, kann es sich hingegen um dreidimensionale Koordinaten handeln. Insbesondere kann es sich um Koordinaten im realen Raum oder, mit anderen Worten, von der real beobachteten räumlichen Szene handeln. Die Koordinaten können sämtliche sechs Freiheitsgrade (drei translatorische und drei rotatorische) beschreiben und/oder definieren, bevorzugt aber zumindest die räumliche Position (d. h. die drei translatorischen Freiheitsgrade). Aus zweidimensionalen Bildkoordinaten kann also dreidimensionale Raumkoordinaten bestimmt werden.

**[0047]** Allgemein können die Koordinaten für eine Mehrzahl von Einzelmarkern der Markeranordnung individuell bestimmt werden. Die Koordinaten der Einzelmarker werden dann bevorzugt in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert oder, mit anderen Worten, in einem gemeinsamen Koordinatensystem beschrieben.

**[0048]** Insbesondere kann es sich bei den erfassten Koordinaten um Koordinaten handeln, die analog zu den Koordinaten eines Kugelmittelpunkts sind und/oder analog hierzu verwendet werden. Entsprechende Kugelmittelpunkts-Koordinaten werden im Stand der Technik beispielsweise durch Antasten von Antastkugeln gewonnen.

**[0049]** Das Ermitteln der (dreidimensionalen) Koordinaten aus den (zweidimensionalen) Erfassungsinformationen bzw. Kamerabildern kann mittels bekannter Auswerteverfahren erfolgen. Lediglich beispielhaft wird verwiesen auf eine stereoskopische

Auswertung, eine Mehrbildauswertung mittels Bündeltriangulation (engl.: bundle adjustment), und eine Einzelbildauswertung, wie sie mittels bekannter Bildverarbeitungsprogrammen wie „Optinav API“ oder „OpenCV“ (dort als „camera pose estimation“ bezeichnet) ausführbar ist.

**[0050]** Wenigstens zwei, bevorzugt aber drei oder fünf Erfassungseinrichtungen können verwendet werden. Sind insbesondere im Rahmen obiger Auswerteverfahren Koordinatentransformationen in ein gemeinsames Koordinatensystem erforderlich, kann beispielsweise ein (Kamera-) Koordinatensystem der ersten Erfassungseinrichtung oder aber der Drehachse und/oder eines dazugehörigen Koordinatenmessgeräts als das gemeinsame Koordinatensystem gewählt werden.

**[0051]** Im Rahmen der Relativbewegung können entsprechend Koordinaten der Markeranordnungen und insbesondere von spezifischen Einzelmarkern für eine Mehrzahl von (relativen) Winkelpositionen und/oder Winkelpositionen der Drehachse erhalten werden. Die Koordinaten, insbesondere aber auch die darauf basierend ermittelten Kalibrierinformationen, können dann ebenfalls für eine entsprechende Mehrzahl von Winkelpositionen bestimmt werden. Insbesondere können Verläufe der Koordinaten und/oder Kalibrierinformationen über das Winkelbewegungsspektrum aufgezeichnet bzw. ermittelt werden.

**[0052]** Bei den Kalibrierinformationen kann es sich um Informationen handeln, die dazu verwendbar sind, um zukünftige Messwerte der Drehachse und/oder eines Koordinatenmessgeräts umfassend die Drehachse anzupassen. Insbesondere können auf die Drehachse zurückzuführende Fehleranteile oder auch sogenannte Drehabweichungen (bzw. Drehtischabweichungen, siehe vorstehend zitierte DE 36 37 410 A1 (Seite 2, ab Zeile 55), die auch für Drehachsen oder Drehgelenke jeglicher Art gelten) mittels der Kalibrierinformationen kompensierbar und/oder von diesen umfasst sein.

**[0053]** Beispielsweise können die Kalibrierinformationen derartige Abweichungen definieren oder sein und/oder allgemein Werte bzw. Einträge einer Kalibriertabelle der Drehachse sein. In an sich bekannter Weise können derartige Abweichungen verwendet werden, um insbesondere Messwerte der Drehachse (zum Beispiel Winkelmesswerte) geeignet zu korrigieren. Wie erwähnt, können die Koordinaten und/oder die Kalibrierinformationen prinzipiell winkelabhängig und bevorzugt für eine Mehrzahl von Winkelpositionen bestimmt werden. Je nach angefahrenem Winkel kann dann die zugeordnete Kalibrierinformation ermittelt und eine situationsgerechte Kompensation durchgeführt werden.

**[0054]** Zusammengefasst kann es sich also bei den Kalibrierinformationen um Drehfehler oder Drehabweichungen handeln, die anhand der ermittelten (dreidimensionalen) Koordinaten bestimmt werden. Diese können abgespeichert und bedarfsweise (insbesondere je nach angefahrter Winkelposition) ausgelesen und/oder für eine Kompensation verwendet werden.

**[0055]** Zum Ermitteln von Drehabweichungen aus den Koordinaten kommen prinzipiell verschiedene Verfahren aus dem Stand der Technik in Betracht, insbesondere wenn die Koordinaten in der vorstehend erwähnten Weise analog zu Kugelmittelpunktskoordinaten verwendet werden.

**[0056]** Beispielhaft wird auf die DE 100 07 062 A1 und das dortige Ermitteln entsprechender Abweichungen auf Basis von Kugelantastungen verwiesen (siehe Seite 5, erster Absatz). Ebenso wird auf die Kugelantastungen der DE 36 37 410 A1 und darauf basierend ermittelter Drehtisch-Abweichungen verwiesen, wie zum Beispiel ab der dortigen Seite 4 zusammengefasst. Weiter ist eine sogenannte Rigid Body Transformation bekannt, wie sie zum Beispiel in der folgenden Veröffentlichung beschrieben wird:

„Doubly stochastic matrices and the diagonal of a rotation matrix“, A. Horn, American Journal of Mathematics, Vol. 76, p. 620-630 (1954).

**[0057]** Wie vorstehend bereits angedeutet, sieht eine Weiterbildung vor, dass die Kalibrierinformationen Abweichungen der Drehachse von einer fehlerfreien (d. h. idealen) Drehbewegung beschreiben. Die Drehbewegung kann um eine (virtuelle) Rotationsbewegungsachse der (realen mechanischen) Drehachse stattfinden. Die Abweichungen können Fehler- und genauer gesagt Bewegungsanteile beschreiben, die von dieser fehlerfreien Drehbewegung abweichen, zum Beispiel axiale oder radiale Verschiebungen, Winkelfehler und/oder Taumelfehler.

**[0058]** Eine Weiterbildung sieht daher vor, dass als Abweichungen wenigstens zwei Fehlerkomponenten der Drehbewegung erfasst werden, z.B. die obigen Verschiebungen, der Winkelfehler und/oder der Taumelfehler. Dabei kann eine Fehlerkomponente jeweils einen Fehleranteil bezüglich eines von sechs räumlichen Bewegungsfreiheitsgrade der Drehachse definieren. Beispielsweise kann also wenigstens eine zu einem (Dreh-) Winkelfehler zusätzliche Fehlerkomponente ermittelt werden. Gemäß einer Weiterbildung sind die Erfassungseinrichtungen gleichmäßig um eine Rotationsbewegungsachse der Drehachse verteilt. Insbesondere können die Erfassungseinrichtungen in gleichen Winkelabständen zueinander (bzw. zu unmittelbar benachbarten Erfassungseinrichtungen) um die Drehachse verteilt sein, zum Beispiel in einem

Abstand von  $180^\circ$  bei zwei Erfassungseinrichtungen, in einem Abstand von jeweils  $120^\circ$  bei drei Erfassungseinrichtungen, in einem Abstand von jeweils  $90^\circ$  bei vier Erfassungseinrichtungen usw. Anders ausgedrückt können die Erfassungseinrichtungen also drehsymmetrisch in Bezug auf die Drehachse angeordnet sein, beispielsweise sodass sie bei einer (gedanklichen) Drehung um die vorstehend erwähnten Winkelabstände wieder auf sich selbst bzw. eine vormals an gleicher Stelle positionierte Erfassungseinrichtung abgebildet werden.

**[0059]** Der geschilderte Verteilungszustand der Erfassungseinrichtungen kann zum Beispiel durch (optional von der Erfindung ebenfalls umfassen Schritt des) Positionieren(s) der Drehachse relativ zu den Erfassungseinrichtungen erreicht werden. Beispielsweise kann die Drehachse von Bewegungsachsen eines Koordinatenmessgeräts derart verfahren werden, dass sie relativ zu den Erfassungseinrichtungen positioniert ist, insbesondere derart, dass diese entsprechend symmetrisch und die Drehachse verteilt sind.

**[0060]** Allgemein kann eine solche Anordnung von Erfassungseinrichtungen zu Genauigkeitsverbesserungen führen. Insbesondere wenn auch eine entsprechend gleichmäßig verteilte und/oder drehsymmetrische Markeranordnung der nachstehend erläuterten Art verwendet wird, kann hierdurch bewirkt werden, dass die Erfassungseinrichtungen jeweils gleichartige Ausschnitte der Markeranordnung (zum Beispiel jeweils gleichartig in einer jeweiligen Bildebene verteilte Einzelmarker) erfassen. Hierdurch können sich systematische Fehleranteile zumindest teilweise aufheben.

**[0061]** Allgemein ermöglicht die hierin vorgestellte Lösung das zuverlässige und aufwandsarme Ermitteln von Fehleranteilen. Besonders zuverlässig gelingt dies mit einem konzentrisch auf der Drehachse positionierten Target, das drehsymmetrisch verteilte Marker aufweist. Zusätzlich wird dies dann verbessert, wenn auch die Erfassungseinrichtungen drehsymmetrisch um die Drehachse positioniert sind.

**[0062]** In an sich bekannter Weise können während einer Kalibrierung auftretende Fehler den einzelnen Baugruppen oder Untersystemen der hierin verwendeten Messanordnung wie folgt zugeordnet werden:

- das Target (bzw. die Markeranordnung) ist fehlerbehaftet;
- die Drehachse ist fehlerbehaftet;
- die einzelnen Erfassungseinrichtungen sind fehlerbehaftet;

- die Bestimmung der Erfassungseinrichtungen zueinander (extrinsische Kalibrierung) ist fehlerbehaftet.

**[0063]** Prinzipiell können diese Fehler in reproduzierbare und nicht reproduzierbare Anteile getrennt werden (zum Beispiel in Bezug auf bzw. für die Dauer des Messablaufes). Die vorliegende Lösung richtet sich insbesondere auf die Bestimmung der Drehachsenfehler. Um diese präzise zu bestimmen, sind diese vorteilhafterweise getrennt (separiert) von den anderen Fehlern zu betrachten und zu ermitteln.

**[0064]** Hierfür können folgende Annahmen, allein oder in beliebiger Kombination, zugrunde gelegt werden:

- Die Fehler des Targets sind während der Messung (d. h. Kalibrierung beziehungsweise Kalibriermessung) konstant;

- Die Fehler der Erfassungseinrichtungen (zum Beispiel Restfehler einer intrinsischen Kalibrierung dieser Erfassungseinrichtungen) sind ebenfalls hinreichend konstant. Bei der Berechnung der einzelnen Markerpositionen ergeben sich an festen Orten im Objektraum bei dieser Annahme stets die gleichen Fehler;

- Beim Start einer Messung (d. h. Kalibrierung beziehungsweise Kalibriermessung) ist die Lage der Erfassungseinrichtungen zueinander nicht hinreichend genau bekannt. Über die Dauer der Messung ändert sie sich aber nicht mehr.

**[0065]** Es hat sich gezeigt, dass sich der größte Fehleranteil bei realen Versuchen in der Regel aus dem zweiten Punkt ergibt (Fehler der Erfassungseinrichtungen). Bei der vorliegenden Lösung sind die Kamerafehler bevorzugt ebenso reproduzierbar wie die Fehler des oben beschriebenen Koordinatenmessgeräts.

**[0066]** Wie nachstehend noch anhand der Figuren erläutert, liegt im Fall der hierin bevorzugten konzentrischen Anordnung der Markieranordnung zur Drehachse bei den zu prüfenden (zum Beispiel acht) Winkelstellungen immer genau einer der Marker am Ort einer Erfassungseinrichtung-Fehlmessung vor. Dadurch ist in jeder zu prüfenden Winkelstellung das Target um den gleichen Betrag fehlerhaft bzw. um den gleichen Betrag verschoben gemessen. Man kann auf diese Weise einen Fehleranteil der Erfassungseinrichtungen ermitteln und berücksichtigen, ohne dass dieser fälschlicherweise als positionsabhängiger Rundlauffehler der Drehachse ermittelt und für eine Kalibrierung verwendet wird.

**[0067]** Im Fall einer nicht-konzentrischen Anordnung des Targets würde hingegen die Gefahr bestehen, dass sich der Fehleranteil der Erfassungseinrichtun-

gen teilweise nicht mehr mit der verdrehten Markieranordnung überlappt. Nur in bestimmten Fällen (bzw. bei bestimmten Bildaufnahmen der Markieranordnung), bei denen die Überlappung vorliegt, würde der Fehler daher zum Tragen kommen. Er wäre folglich nicht mehr entsprechend einfach feststellbar (und zum Beispiel herausrechenbar) und könnte fälschlicherweise als Rundlauffehler der Drehachse interpretiert werden, der nur in bestimmten Drehstellungen auftritt (nämlich nur dann, wenn die Überlappung vorliegt). Auch dies wird nachstehend noch anhand von Figuren erläutert.

**[0068]** Gleiches gilt aber auch, wenn die Markieranordnung zwar konzentrisch zur Drehachse angeordnet, aber selbst nicht drehsymmetrisch ist. Auch in diesem Fall kann anhand der Bildaufnahmen kein gleichbleibender (Kamera-) Fehleranteil der Erfassungseinrichtungen erkannt werden und könnte dieser Fehleranteil daher fälschlicherweise als Drehachsenfehler interpretiert werden.

**[0069]** Zusammengefasst wurde erfindungsgemäß erkannt, dass dann, wenn das Target bzw. die Markieranordnung nicht hinreichend drehsymmetrisch und/oder nicht hinreichend konzentrisch zur Drehachse angeordnet ist, Fehler des Kamerasystems (d. h. der Erfassungseinrichtungen) zu falschen Ergebnissen der Drehachsenkalibrierung führen können.

**[0070]** Ebenso wurde erkannt, dass bei realen Erfassungseinrichtungen (also zum Beispiel einem realen Kamerasystem) die Fehler oftmals nicht einen diskreten Ort betreffen, sondern eine gewisse Ausdehnung haben. Es hat sich daher als vorteilhaft erwiesen, wenn die Marker so klein und zahlreich sind, dass immer eine ganze Region von Markern um einen ähnlichen Fehler versetzt in den erfassten Bildern erkannt werden kann. Das Target sollte vorteilhafterweise aber auch in diesem Fall möglichst konzentrisch zur Drehachse angeordnet sein.

**[0071]** Die Anzahl von z.B. in einem einzelnen Kamerabild erfassbaren Markern kann basierend auf einer Bestimmung einer zulässigen Maximalgröße der Marker gewählt werden. Die Maximalgröße kann basierend auf Wiederholfrequenzen (insbesondere Wellenlängen) von beobachteten Fehlern bestimmt werden. Beispielsweise können Fehlerkomponenten des Erfassungssystems (bzw. von Erfassungseinrichtungen, wie Kameras) zum Beispiel in einzelnen Ebenen mit Wellen oder Splines beschrieben werden. In an sich bekannter Weise kann zum Beispiel aus einem Fehlermodell oder aber empirisch ermittelt werden, welche minimale Wellenlänge nötig ist, um die Fehler hinreichend zu beschreiben, wobei die Wellenlänge insbesondere eine Wiederholfrequenz des Fehlers bei Umdrehungen um die Drehachse beschreiben kann.

**[0072]** Mit der so ermittelten Wellenlänge kann die Maximalgröße der Marker bestimmt werden, wobei bevorzugt der Abstand zwischen benachbarten Markern und damit (zumindest indirekt) die Größe der Marker kleiner als die Hälfte dieser Wellenlänge ist. Als vorteilhaft hat sich als Marker-Größe ein Viertel der Wellenlänge erwiesen.

**[0073]** Ebenso bevorzugt aber nicht zwingend ist es, wenn die Erfassungseinrichtungen symmetrisch um die Rotationsachse verteilt werden. Letzteres wurde daher als vorteilhaft erkannt, da bei realen Erfassungs-Optiken (zum Beispiel Kameraobjektiven) Fehler in der Bildmitte (d. h. in der Mitte einer erfassten Aufnahme) in der Regel kleiner als am Rand sind. Außerdem steigt mit größeren aufgenommenen Bildern die Zahl der erfassten Pixel, was aufgrund einer größeren Informationsmenge günstig für die Kalibrierung ist. Ferner resultiert die Berechnung der Verkippung (auch als Taumel oder Tilt bezeichnet), wie für Rückprojektionsverfahren bekanntermaßen vorteilhaft, und gleichzeitig der Position der Markeranordnung relativ zu einer Erfassungseinrichtungen in einem Kompromiss hinsichtlich eines gewählten Betrachtungswinkels einer jeden Erfassungseinrichtung, für den es ebenfalls ein Optimum gibt. Die Verkippung wird bei den Drehachsen auch als Taumel oder Tilt bezeichnet.

**[0074]** Das Ermitteln der Verkippung ist insbesondere in folgenden Fällen vorteilhaft: Bei manchen Drehachsen soll (ggf. nur) der (Dreh-) Winkelfehler oder Rundlauf geprüft werden. In diesem Fall ist ein gemeinsamer und/oder steiler Blickwinkel der Kameras auf das Target günstig, was durch Ermitteln der Verkippung überprüft und ggf. korrigiert werden kann. Für andere Drehachsen soll dieser Kippfehler jedoch zum Zwecke der späteren Korrektur exakt erfasst werden. In diesem Falle ist ein flacherer (Blick-) Winkel günstiger, was wiederum durch Ermitteln der Verkippung überprüft und ggf. korrigiert werden kann. Der flachere Winkel ist auch zum Prüfen des Planlaufs günstig.

**[0075]** Je Erfassungseinrichtungen ergibt sich daher ein Optimum der Anordnung relativ zur Markeranordnung und/oder Drehachse, welches experimentell bestimmt werden kann (zum Beispiel mit dem Ziel, ein Signal-Rausch-Verhältnis zu minimieren). Wird eine Mehrzahl von Erfassungseinrichtungen verwendet, wiederholt sich dieses Optimum in der Regel periodisch, sodass eine entsprechend symmetrische Anordnung um die Drehachse resultiert und zum Erreichen optimaler Bilderfassungsbedingungen vorteilhaft ist. Dieser Zusammenhang wurde experimentell ermittelt und verifiziert, insbesondere für Anordnungen mit bis zu fünf Erfassungseinrichtungen.

**[0076]** Allgemein kann die Markeranordnung mehrere Einzelmarker umfassen. Diese sind bevorzugt

kreisförmig und/oder in jeweils gleichen Winkelabständen zueinander (oder alternativ ausgedrückt gleichmäßig) um einen Mittelpunkt der Markeranordnung verteilt. Der Mittelpunkt der Markeranordnung kann ein geometrischer Mittelpunkt und/oder Schwerpunkt sein, der sich zum Beispiel aus den Mittelpunkten der Mehrzahl von Einzelmarkern ergibt. Es kann sich auch um einen Mittelpunkt handeln, der konzentrisch zur Drehachse und insbesondere dessen Rotationsbewegungsachse positioniert wird.

**[0077]** Bezüglich der Winkelabstände der Einzelmarker können die vorstehenden Ausführungen zu Winkelabständen der Erfassungseinrichtungen ebenso zutreffen, beispielsweise in der Form, dass diese jeweils von unmittelbar benachbarten Einzelmarkern und/oder auf einem gemeinsamen Kreisumfang liegenden Einzelmarkern gleichartig beanstandet sind.

**[0078]** Gemäß einer Ausführungsform umfasst die Markeranordnung eine Mehrzahl von jeweils kreisförmig angeordneten Gruppen von Einzelmarkern. Jede Gruppe kann dabei entlang eines eigenen Kreisumfang verteilt sein, bevorzugt mit entsprechend gleichmäßigen Winkelabständen zueinander. Diese Winkelabstände können für die Gruppen auch gleich sein, sodass (virtuelle) radiale Geraden gebildet werden können, die Einzelmarker aus unterschiedlichen Gruppen schneiden. Die Kreisumfänge bzw. dazugehörigen Kreise können voneinander abweichende Radien aufweisen. Bevorzugt sind sie konzentrisch zueinander angeordnet.

**[0079]** Wie erwähnt, kann allgemein vorgesehen sein, dass die Markeranordnung drehsymmetrisch angeordnete Einzelmarker umfasst und/oder allgemein rotationssymmetrisch ist, zum Beispiel bezogen auf einen (geometrischen) Mittelpunkt der Markeranordnung. Erneut kann unter einer Drehsymmetrie verstanden werden, dass die Markeranordnung bei einer (gedanklichen) Drehung zum Beispiel um die vorstehend erwähnten Winkelabstände wieder auf sich selbst abgebildet wird. Insbesondere können Einzelmarker der Markeranordnung auf gleichartige und vormalig an gleicher Stelle positionierte Einzelmarker abgebildet werden.

**[0080]** Bevorzugt wird ferner, dass mehr als zwei Kameras verwendet werden. Da jede Messung voraussetzt ist, kann mit einer gesteigerten Anzahl von Kameras das Signal-zu-Rausch-Verhältnis verbessert werden.

**[0081]** Andererseits resultiert aus dem Verwenden von mehr als zwei Kameras eine Überbestimmung: Für jeden (Einzel-) Marker sind mehrere Triangulationsergebnisse möglich. Für die üblichen photogrammetrischen Anwendungen haben sich das Bündelblockverfahren sowie die Verwendung des

Median als besonders robust zum Auflösen dieser Überbestimmung erwiesen.

**[0082]** Beim Bündelblockverfahren wird aus allen möglichen Triangulationen implizit über Fehlerquadratminimierung ein Optimum berechnet. Fehler einer einzelnen Erfassungseinrichtung (d. h. Kamera) werden dadurch implizit stärker gewichtet, was nachteilig sein kann.

**[0083]** Häufig wird daher auch der Median verwendet: Aus allen möglichen Triangulationen werden Objektpunkte berechnet (d. h. Koordinaten der Marker, zum Beispiel als Triangulationsergebnis). Der Median wird dann zum Beispiel achsweise berechnet (d. h. je Achse eines Koordinatensystems, in dem die Koordinaten der Marker beziehungsweise des Objekts ermittelt werden). Ein berechneter Median kann dann direkt als Objektpunkt verwendet werden. Alternativ kann der Median zum Filtern der Messdaten verwendet werden: Über einen maximalen Abstand zu diesem Median (Medianfilter) wird ausgewählt, welche Objektpunkte für das Bündelblockverfahren verwendet werden sollen, die Bündelblockberechnung wird dann also nur mit einem Teil der Marker-Abbildungskordinaten durchgeführt.

**[0084]** In beiden Fällen kann es vorkommen, dass sich durch leichtes Rauschen oder auch geringe Abweichung von den hierin offenbarten Symmetrie- und Konzentritätsbedingungen der Median unerwünscht und vor allem sprunghaft ändert. Damit sich die ortsfesten Fehler der Kameras, wie oben beschrieben, auch dann noch nahezu aufheben, sollten die Markerinformationen (d.h. erfassten Koordinaten) von jeder Kamera bevorzugt stets linear und gleich gewichtet werden. Das lässt sich durch Ausmitteln der erfassten Markerkoordinaten erreichen (z.B. über mehrere erfasste Winkelpositionen hinweg). Damit sich in diesem Zusammenhang etwaiges Bildrauschen nicht negativ auswirkt, sollten die Aufnahmen entsprechend sorgfältig auf bzw. innerhalb der Bildebene gefiltert werden (z.B. mittels eines Rauschfilters mit Deblurring, einer Subpixel-Kantendetektion oder durch Mitteln von mehreren Bildern auf Pixelebene).

**[0085]** Wie erwähnt, ist die Markeranordnung bevorzugt konzentrisch relativ zu der Drehachse (und insbesondere dessen Rotationsbewegungsachse) angeordnet wird. Insbesondere kann die Anordnung derart erfolgen, dass das ein erwähnter Mittelpunkt (oder auch geometrischer Schwerpunkt) der Markeranordnung, um den bevorzugt mehrere Einzelmarker rotationssymmetrisch angeordnet sind, von einer Rotationsbewegungsachse der Drehachse geschnitten wird.

**[0086]** Wenn die Erfassungseinrichtungen ebenfalls drehsymmetrisch und/oder konzentrisch zu der

Drehachse (und insbesondere dessen Rotationsbewegungsachse) angeordnet sind, kann dann auch eine allgemein bevorzugte Relativausrichtung der Erfassungseinrichtungen und Markeranordnung erreicht werden. Beispielsweise können diese dann jeweils drehsymmetrisch zu und/oder konzentrisch zu der Drehachse positioniert sein.

**[0087]** Wie erwähnt, kann die Drehachse in einem Multi-Drehachsen-Gelenk (z.B. einem Dreh-Schwenk-Gelenk) des Koordinatenmessgeräts verbaut sein. Unter einem Multi-Drehachsen-Gelenk kann ein Gelenk mit mehreren z.B. als eine kinematische Kette angeordneten Drehachsen verstanden werden. Die Drehachsen können jeweils um unterschiedliche Rotationsbewegungsachsen drehbar sein. Beispielsweise können innerhalb des Gelenks wenigstens zwei oder drei Drehachsen vorgesehen sein und die Rotationsbewegungsachsen hiervon können jeweils paarweise zueinander orthogonal verlaufen.

**[0088]** Die Drehachse kann, insbesondere wenn sie von einem Multi-Drehachsen-Gelenk umfasst ist, dazu eingerichtet sein, einen (zum Beispiel taktilen oder optischen) Messsensor und/oder einen taktilen Messtaster aktiv zu bewegen und insbesondere relativ zu einem zu vermessenden Bauteil zu verdrehen. Insbesondere kann die Drehachse an einem Koordinatenmessgerät (zum Beispiel an dessen Pinole) angeordnet sein und/oder von diesem in einem Arbeitsraum bevorzugt linear verfahren werden.

**[0089]** Insbesondere in letzterem Fall (aber auch unabhängig hiervon, d. h. als ein allgemeiner Aspekt dieser Offenbarung) können die Erfassungseinrichtungen unbeweglich sein und beispielsweise in einem Arbeitsraum und/oder an einem Arbeitstisch oder einer Grundplatte des Koordinatenmessgeräts positioniert sein. Die Markeranordnung kann dann an der Drehachse positioniert sein. Hierfür kann sie eine Schnittstelle aufweisen, die zum Beispiel in eine Wechselschnittstelle des Koordinatenmessgeräts einwechselbar ist (zum Beispiel in eine standardisierte Tasterschnittstelle). Dies ist insbesondere für die nachstehende Ausführungsform relevant, bei der jeder Drehachse aus einer Mehrzahl von Drehachsen eine eigene Markeranordnung zugeordnet wird. Je nach aktuell bewegter bzw. vermessenen Drehachse kann dann die dazugehörige Markeranordnung eingewechselt werden.

**[0090]** Alternativ kann die Drehachse in einem Drehtisch des Koordinatenmessgeräts verbaut sein. Der Drehtisch kann allgemein dazu eingerichtet sein, ein Bauteil relativ zu einem Messsensor und insbesondere einem taktilen Messtaster des Koordinatenmessgeräts zu verdrehen.

**[0091]** Eine Weiterbildung sieht vor, dass eine Mehrzahl von Drehachsen bereitgestellt ist und für jede Drehachse eine gesonderte Markeranordnung bereitgestellt ist und wobei das Verfahren umfasst:

- konzentrisches Relativanordnen einer jeweiligen Drehachse und einer zugeordneten Markeranordnung und anschließendes Erzeugen der Relativbewegung zwischen einer jeden Drehachse und zugeordneten Markeranordnung.

**[0092]** Dies kann insbesondere dann relevant sein, wenn ein Multi-Drehachsen-Gelenk mit mehreren Drehachsen vorgesehen ist, wobei für jede der Drehachse Kalibrierinformationen ermittelt werden sollen.

**[0093]** Unter dem konzentrischen Relativanordnen kann insbesondere verstanden werden, dass ein gemeinsames Zentrum und insbesondere ein jeweils entlang einer gemeinsamen Achse liegendes Zentrum von Drehachse und Markeranordnung gebildet wird. Bei dieser Achse kann es sich wiederum um die Rotationsbewegungsachse der Drehachse handeln, die zum Beispiel infolge des konzentrischen Relativanordnens ein Zentrum der Markeranordnung schneiden kann.

**[0094]** Diese Variante besitzt den Vorteil, dass die Markeranordnungen für die dazugehörigen Drehachsen bevorzugt innerhalb des Arbeitsraums positioniert werden können, insbesondere derart, dass sie mittels der bevorzugt von den Drehachsen bewegten Erfassungseinrichtungen zum Beispiel bei einer vollständigen Rotation der jeweiligen Drehachsen präzise erfassbar sind. Das Relativanordnen erfolgt bevorzugt zumindest teilweise mittels anderweitiger Bewegungsachsen (insbesondere Linearachsen) des Koordinatenmessgeräts.

**[0095]** Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass für eine Drehachse zwei Markeranordnungen bereitgestellt sind und Relativbewegungen dieser Markeranordnungen ausgeführt und/oder erfasst werden. Insbesondere können diese Markeranordnungen konzentrisch zueinander und bevorzugt auch zu einer gemeinsamen Rotationsachse (vorzugsweise derjenigen der betrachteten Drehachse) angeordnet sein. Weiter können die Markeranordnungen gemäß jeglicher hierin geschilderter Varianten ausgebildet sein und beispielsweise drehsymmetrisch um die Rotationsachse verteilte Einzelmarker umfassen. Vorteilhafterweise wird hierdurch ermöglicht, dass anhand der Relativbewegungen dann auch die Kalibrierung stattfindet und/oder die Fehlerkomponenten der Drehachse bestimmt werden.

**[0096]** Fehleranteile, welche die Markeranordnungen gemeinsam zum Beispiel relativ zu einem System von Erfassungseinrichtungen erfahren, wie im Fall der nachstehend erläuterten Relativbewegungen, können dann unberücksichtigt bleiben. Anders

ausgedrückt kann die Kalibrierung auf Basis der Relativbewegungen der Markeranordnungen zueinander und bevorzugt ausschließlich basierend auf diesen Relativbewegungen stattfinden und können anderweitige Bewegungen und insbesondere gemeinsame Bewegungen der Markeranordnungen (zum Beispiel relativ zu wenigstens einer Erfassungseinrichtung) nicht ermittelt werden und/oder nicht in die Kalibrierung einfließen.

**[0097]** Wie nachstehend noch anhand der Figuren erläutert, kann die Variante mit einer Mehrzahl von Markeranordnungen zum Beispiel zum Kalibrieren von Drehachsen eines Industrieroboters verwendet werden. Allgemein können die Erfassungseinrichtungen neben der Drehachse bzw. dem Roboter stehen, zum Beispiel auf einem Stativ.

**[0098]** Relativbewegungen des Stators der zu kalibrierenden Drehachse relativ zu den Erfassungseinrichtungen können allgemein in einem oder sämtlichen der folgenden Fällen auftreten:

- Die Erfassungseinrichtungen und/oder das Stativ wackeln zum Beispiel infolge einer Berührung.
- Nach dem Anordnen erfahren die Erfassungseinrichtungen und/oder das Stativ eine Positionsänderung aufgrund eines Temperaturdrifts.
- Durch Verlagerung des Schwerpunkts der weiteren Roboterachsen deformieren sich in einer kinematischen Kette vorgelagerte Vorrichtungskomponenten (zum Beispiel Roboterglieder) bis zum Stator der zu kalibrierenden Drehachse.

**[0099]** Es hat sich gezeigt, dass derartige Relativbewegungen in der Regel derart groß sind, dass sie bei der Bestimmung der Drehachsenfehler nicht vernachlässigt werden dürfen und zugleich so klein, dass sie die hierin geschilderten vorteilhaften Symmetrie- und Konzentritätsbedingungen nicht unzulässig stark verletzen.

**[0100]** Zum Kalibrieren der Drehachse mit obiger Mehrzahl von Markeranordnungen kann diese bewegt werden. Eine Relativbewegung zwischen den Markeranordnungen tritt dann auf, wenn sich bei einer Rotation der Drehachse eine davon in einem größeren Ausmaß bewegt (d. h. mehr verdreht wird als die andere). Die sich weniger stark oder auch gar nicht verdrehende Markeranordnung kann an einem Stator der Drehachse angeordnet sein.

**[0101]** In betrachteten Winkelstellungen kann für die Markeranordnung am Stator (z.B. eine äußere Markeranordnung, welche eine innere Markeranordnung umschließt und/oder bevorzugt konzentrisch aufnimmt) ein Koordinatensystem bestimmt werden. Anschließend können die Markeranordnungs-Daten des Rotors (z.B. einer inneren Markeranordnung, die

von der äußeren umgeben und bevorzugt konzentrisch umgeben ist) in das Stator-Koordinatensystem transformiert werden. Letzteres kann gleichbedeutend mit dem Bilden einer Differenz von Koordinatenwerten sein, die anhand der äußeren und inneren Markeranordnung ermittelt wurden.

**[0102]** Auf diese Weise können die reinen kinematischen Fehler der Drehachsen bestimmt werden, ohne dass die Relativbewegung der Kamera zum Stator die Kalibrierung bzw. das Messergebnis signifikant beeinflusst. Dies wird nachstehend noch anhand von Figuren erläutert. Bildlich gesprochen liegt ein Vorteil dieses Vorgehens darin, dass das zugrunde gelegte Koordinatensystem sozusagen gemeinsam mit den fehlerverursachenden Relativbewegungen verfährt beziehungsweise diesen folgt, sodass ermittelte Fehleranteile in diesem Koordinatensystem ermittelbar sind, ohne selbst Relativbewegungsanteile zu umfassen.

**[0103]** Gemäß einer Weiterbildung erfolgt auch ein extrinsisches Kalibrieren (oder, mit anderen Worten, Bestimmen der äußeren Orientierung oder allgemein der relativen Anordnung) der Erfassungseinrichtungen durch Erfassen der Markeranordnung. Zum exzentrischen Kalibrieren einer Mehrzahl von Erfassungseinrichtungen existieren verschiedene Ansätze im Stand der Technik. Ein Vorteil dieser Weiterbildung ist, dass auf die auch im Anschluss verwendete Markeranordnung zurückgegriffen wird. Der Einrichtungsaufwand, die Kosten und die allgemeine Komplexität verringern sich entsprechend.

**[0104]** Prinzipiell wäre es auch möglich, während einem erstmaligen Erfassen der Markeranordnung sowohl die extrinsische Kalibrierung als auch eine Ermittlung der Kalibrierinformationen vorzunehmen. Hierdurch kann sich eine erforderliche Rechenzeit, nicht aber zwingend eine Messzeit vergrößern. Es ist aber vorteilhaft, die extrinsische Kalibrierung vor eigentlichen Objektvermessungen und/oder Kalibriervorgängen durchzuführen, da dann zum Beispiel unmittelbar während dem Vermessen bereits Zwischenergebnisse ausgegeben werden können.

**[0105]** Liegen für die Markeranordnung Referenzdaten vor, können diese mit bekannten Ansätzen direkt zur Berechnung der extrinsischen Parameter verwendet werden. Hintergründe hierzu finden sich zum Beispiel in dem Fachbuch „Nahbereichsphotogrammetrie“, Thomas Luhmann, VDE Verlag, 4. Auflage (2018). Vorliegend wurde jedoch erkannt, dass anschließend noch eine Transformation in KMG-Koordinaten vorteilhaft ist, zum Beispiel um zukünftig in KMG-Koordinaten ermittelte Koordinatenwerte mittels der Kalibrierinformationen korrigieren zu können. Hierfür wird vorgeschlagen, eine Position der Markeranordnung in Kamerakoordinaten zu ermitteln und anschließend zum Beispiel mittels Rigid Body

Transformation oder einem Block Matching Algorithmus in KMG-Koordinaten transformiert.

**[0106]** Liegen für die Markeranordnung keine Referenzdaten vor, kann die Markeranordnung bevorzugt von anderen Bewegungsachsen außer der zu kalibrierenden Drehachse (insbesondere von etwaigen Linearachsen eines Koordinatenmessgeräts) in verschiedene Positionen bewegt und von den Erfassungseinrichtungen dort erfasst werden. Insbesondere kann stets ein vorbestimmter Einzelmarker in diesen Positionen erfasst werden. Je nach Wahl der angefahrenen Positionen, kann somit eine Art virtuelle Markeranordnung aus dem in den verschiedenen Positionen aufgenommenen Einzelmarkererfassungen erstellt werden (zum Beispiel ein 3x3 Gitter aus Aufnahmen des Einzelmakers, wenn dieser nach Art eines 3x3 Gitters positioniert und erfasst wird). Auf diese Weise kann eine referenzierte virtuelle Markeranordnung sozusagen künstlich erstellt werden und für eine extrinsische Kalibrierung mittels an sich bekannter Algorithmen verwendet werden.

**[0107]** Bei üblichen Tracking-Verfahren, welche räumliche Bewegungen optischer Marker entlang zunächst unbekannter Pfade verfolgen, ist die Qualität der Referenzdaten einer Markeranordnung sehr wichtig. Die Referenzdaten beschreiben die relative Lage der Marker zueinander. Bei den vorliegenden Kalibrierungen der Drehachse können derartige Referenzdaten aber vorteilhafterweise auch mitbestimmt (d.h. erst im Kalibrierprozess generiert) werden.

**[0108]** Die Generierung der Referenzdaten ist dahingehend vorteilhaft, als dass grobe Abweichungen bei der Bildauswertung (insbesondere während der Rückprojektion) zu Fehlern führen könnten. Daher kann zumindest eine neue (z.B. erstmals betrachtete) Markeranordnung zumindest einmalig vor bzw. bei dem Durchführen einer Kalibrierung aus unterschiedlichen Winkeln photogrammetrisch vermessen werden. Hierunter wird auch verstanden, dass zunächst nur provisorische bzw. initiale Referenzdaten durch messtechnisch erfasste Referenzdaten ergänzt und/oder ersetzt werden.

**[0109]** Erfindungsgemäß kann also auch die Maßnahme vorgesehen sein, Referenzdaten der Markeranordnung zu ermitteln, bevorzugt in der nachstehend erläuterten Weise. Insbesondere kann es dabei vorkommen, dass in einzelnen Winkelstellungen nicht alle Marker einer Markeranordnung erfasst und/oder im Rahmen einer Bildauswertung detektiert wurden. Dann kann wie folgt vorgegangen werden, wobei die nachstehenden Maßnahmen auch einzeln und/oder in beliebiger Kombination vorgesehen und beansprucht werden können:

- Ermitteln einer günstigen Startwinkelstellung (zum Beispiel mit demjenigen Bilddatensatz,

mit den meisten bspw. anhand von initialen Referenzdaten erkannten Markern);

- Ersetzen der Referenzdaten durch Objektkoordinaten der erkannten Marker, die in der Startwinkelstellung bspw. per Triangulation bestimmt wurden;

- Für nicht erkannte Marker werden initiale Koordinaten bzw. Referenzdaten aus der Startwinkelstellung weiter behalten;

- Wiederholen der Marker-Berechnung und Objektkoordinatenberechnung mit Rückprojektionsverfahren und aktuellen (d.h. teilweise ersetzten) Referenzdaten;

- Transformieren der Objektkoordinaten aller Marker in ein gemeinsames Koordinatensystem (z.B. mit Transformationsmatrix für jede Winkelstellung aus sogenannter Rigid-Body-Transformation mit aktuellen Referenzdaten der Marker in dieser Winkelstellung);

- Daraus ergeben sich für die meisten Marker mehrere nahe beieinander liegende Koordinaten. Diese werden gemittelt und als neue, verbesserte Referenzdaten gespeichert.

- Bevorzugtes Wiederholen der wiederholten Markerberechnungen (vorzugsweise samt anschließender Transformation und Mittelung) solange, bis die Wiederholung der Marker-Berechnung keine neuen Marker-Objektkoordinaten mehr ergibt.

**[0110]** Da dieses Vorgehen robust und sicher ist und eine vergleichsweise kurze Rechenzeit benötigt, kann es in jegliche Drehachs-Vermessung integriert werden.

**[0111]** Die Erfindung betrifft auch eine Anordnung zum Kalibrieren einer Drehachse für Koordinatenmessungen, wobei die Anordnung die Merkmale des beigefügten Anspruchs 11 aufweist und u.a. eine Drehachse (von einem Koordinatenmessgerät und insbesondere ein Koordinatenmessgerät mit einer solchen Drehachse), wenigstens zwei Markeranordnungen und wenigstens zwei Erfassungseinrichtungen umfasst, wobei eine Relativbewegung zwischen wenigstens einer Markeranordnung und den Erfassungseinrichtungen mittels der Drehachse erzeugbar ist, während die Erfassungseinrichtungen die Markeranordnungen jeweils optisch erfassen; und wobei die Anordnung eine Computereinrichtung umfasst, die dazu eingerichtet ist

- Koordinaten der Markeranordnung auf Basis von Erfassungsinformationen der optischen Erfassungseinrichtungen zu ermitteln; und

- Kalibrierinformationen zum Kalibrieren der Drehachse anhand der ermittelten Koordinaten zu bestimmen.

**[0112]** Allgemein können sämtliche Ausführungen von und Weiterbildungen zu den Verfahrensmerkmalen auch auf die gleichlautenden Anordnungsmerkmale zutreffen bzw. bei diesen vorgesehen sein. Insbesondere kann die Anordnung dazu eingerichtet sein, sämtliche Schritte, Maßnahmen und Betriebszustände der hierin geschilderten Art vorzunehmen und/oder auszuführen. Dies kann zum Beispiel mittels der Computereinrichtung erfolgen.

**[0113]** Allgemein kann die Computereinrichtung wenigstens eine Prozessoreinrichtung und/oder wenigstens eine Speichereinrichtung umfassen. Die Prozessoreinrichtung kann dazu eingerichtet sein, auf der Speichereinrichtung hinterlegte Programmweisungen, Algorithmen und/oder Instruktionen auszuführen. Hierdurch kann sie dann die vorstehend geschilderten, aber auch jegliche anderweitigen hierin offenbarten erfindungsgemäßen Maßnahmen ausführen oder veranlassen.

**[0114]** Allgemein kann die Computereinrichtung über eine Datenverbindung mit den Erfassungseinrichtungen verbunden sein und von diesen Erfassungsinformationen erhalten oder aber anderweitige Informationen, auf deren Basis dann Erfassungsinformationen von der Computereinrichtung ermittelt werden.

**[0115]** Weiter kann die Computereinrichtung dazu eingerichtet sein, die Kalibrierinformationen beispielsweise zwecks zukünftiger Messwertkorrekturen an eine Steuereinrichtung der Drehachse und/oder eines die Drehachse umfassenden Koordinatenmessgeräts zu übermitteln. Insbesondere kann aber die Computereinrichtung dazu eingerichtet sein, eine solche Messwertkorrektur selbst durchzuführen. Gemäß einer Ausführungsform ist die Computereinrichtung von einer Steuereinrichtung eines Koordinatenmessgeräts umfasst bzw. bildet diese Steuereinrichtung.

**[0116]** Ausführungsbeispiele der Erfindung werden im Folgenden anhand der beigefügten schematischen Figuren erläutert. Gleichwirkende oder gleichartige Merkmale können dabei figurenübergreifend mit den gleichen Bezugszeichen versehen sein.

**Fig. 1:** zeigt ein Koordinatenmessgerät umfassend eine Anordnung gemäß einem ersten (hierin offenbarten, aber nicht beanspruchten) Ausführungsbeispiel, die ein Verfahren gemäß einem ersten (hierin offenbarten, aber nicht beanspruchten) Ausführungsbeispiel ausführt.

**Fig. 2:** zeigt ein Koordinatenmessgerät umfassend eine Anordnung gemäß einem zweiten (hierin offenbarten, aber nicht beanspruchten) Ausführungsbeispiel, die ein Verfahren gemäß einem zweiten (hierin offenbarten, aber nicht beanspruchten) Ausführungsbeispiel ausführt.

**Fig. 3A-C:** zeigen Beispiele für Markeranordnungen, wie sie bei den Varianten der **Fig. 1** und **2** verwendet werden können;

**Fig. 4** zeigt ein Ablaufschema für ein Verfahren, wie es mit den Anordnungen aus **Fig. 1** und **2** ausführbar ist;

**Fig. 5A-D** zeigen Beispiele zur Erläuterung einer vorteilhaften konzentrischen und dreh-symmetrischen Markeranordnung;

**Fig. 6A-C** zeigen eine weitere erfindungsgemäße und beanspruchte Ausführungsform mit einer Mehrzahl von Markeranordnungen die beispielhaft zur Kalibrierung einer Roboter-Drehachse eingesetzt werden.

**[0117]** **Fig. 1** zeigt ein Koordinatenmessgerät (KMG) 1 in Portalbauweise. Auf einem Messtisch 2 des KMG 1 ist das in X-Richtung eines kartesischen Koordinatensystems des KMG 1 bewegliche Portal 3 angeordnet. Ein Schlitten 5 kann in Y-Richtung des Koordinatensystems entlang einem Querträger 4 des Portals 3 bewegt werden. Ferner ist eine Pinole 6 in Z-Richtung des Koordinatensystems beweglich an dem Schlitten 5 angeordnet. Am unteren Ende der Pinole 6 ist ein lediglich beispielhaft taktile Messkopf 7, d.h. ein Sensor, befestigt, der einen Taster 8 zumindest mittelbar über ein nachfolgend erläutertes Dreh-Schwenk-Gelenk 32 trägt. In der vereinfachten Darstellung sind keine Antriebe dargestellt.

**[0118]** Das Koordinatenmessgerät 1 ist bevorzugt vollständig (zumindest aber dessen Gelenk 32) von einer erfindungsgemäßen Anordnung 20 des gezeigten Beispiels umfasst. Die Anordnung 20 umfasst auch eine schematisch dargestellte Computereinrichtung 10, die beispielsweise Teil eines handelsüblichen oder speziell für den Betrieb des KMG ausgestalteten Computers ist, der mit Software für den Betrieb des KMG 1 ausgestattet ist (insbesondere Teil einer KMG-Steuer-einrichtung).

**[0119]** Die Computereinrichtung 10 kann, wie durch eine gepunktete Linie dargestellt ist, mit den beweglichen Teilen des KMG 1 verbunden sein, insbesondere wenn es sich um eine KMG-Steuer-einrichtung handelt. Sie ist aber, wie ebenfalls durch gepunktete Linien dargestellt, mit zwei Erfassungseinrichtungen (im Folgenden auch lediglich als Kameras bezeichnet) 13a, 13b datenübertragend verbunden, wobei die Erfassungseinrichtungen 13a, 13b digitale Kameras sind, die digitale Bilddateien an die Computereinrichtung 10 übertragen.

**[0120]** Die Position der Kameras 13a, 13b ist lediglich beispielhaft. Sie könnten auch an dem Messtisch 2 angeordnet sein und sozusagen von unten auf die Pinole 6 sowie die daran angebrachten Drehachsen 30 blicken. Eine extrinsische und intrinsische Kalibrierung der Kameras 13a, 13b hat bevorzugt vor Aus-

führen des erfindungsgemäßen Verfahrens bereits stattgefunden. Im allgemeinen Beschreibungsteil sind jedoch auch Varianten zur extrinsischen Kalibrierung als Bestandteil der erfindungsgemäßen Lösung genannt.

**[0121]** Die Kameras 13a, 13b sind in einer horizontalen Ebene (d.h. in einer zu den X-Y-Achsen parallelen Ebene) einander gegenüberliegend positioniert oder, anders ausgedrückt, um 180° voneinander beanstandet. Bei einer höheren Anzahl von Kameras 13a, 13b kann ebenfalls das Anordnen in einer gemeinsam horizontalen Ebene und/oder eine gleichmäßige Verteilung vorgesehen sein. Insbesondere können die Kameras 13a, 13b jeweils zu einer unmittelbar benachbarten Kamera gleichartige Winkelabstände aufweisen (zum Beispiel 120° bei drei Kameras 13a, 13b, 90° bei 4 Kameras 13a, 13b usw.). Dies resultiert in einer kreisförmigen Anordnung der Kameras 13a, 13b, die entsprechend gleichmäßig um einen (virtuellen) Mittelpunkt bzw. ein Kreiszentrum verteilt sind.

**[0122]** Dies ist vorteilhaft für eine rotationssymmetrische Anordnung um die Drehachse 30 (oder auch dreh-symmetrische Anordnung) der Kameras 13a, 13b, bei der die Kameras 13a, 13b bei gedanklichen Drehungen um die entsprechenden Winkelabstände sowie eine orthogonal auf der horizontalen Ebene sowie mittig darin positionierte (zum Beispiel durch einen geometrischen Schwerpunkt der Kamerapositionen) Rotationsachse wieder auf Kameras 13a, 13b abgebildet, welche sich vormals dort befunden haben.

**[0123]** Diese Rotationsachse fällt bevorzugt mit einer Rotationsbewegungsachse R der zu kalibrierenden Drehachse 30 zusammen, wofür die Drehachse 30 von dem KMG 1 entsprechende relativ zu den (ortsfesten) Kameras 13a, 13b angeordnet werden kann. Allgemein ausgedrückt sind zumindest während der Kalibrierung die Kameras 13a, 13b folglich dreh-symmetrisch um die zu kalibrierende Drehachse 30 und insbesondere deren Rotationsbewegungsachse R verteilt.

**[0124]** Die Anordnung 20 umfasst ferner auch eine Drehachse 30 des Koordinatenmessgeräts 1. Im Fall von **Fig. 1** ist diese Drehachse 30 in ein Dreh-Schwenk-Gelenk 32, welches ein Beispiel für ein Multi-Drehachsen-Gelenk ist, integriert. Dieses Gelenk 32 umfasst genauer gesagt zwei Drehachsen 30, die jeweils Rotationen um eine individuelle Rotationsbewegungsachse R ermöglichen. Eine erste Drehachse 30 ist an dem Messkopf 7 angebracht und um eine in **Fig. 1** vertikal (d. h. in Z-Richtung) verlaufende Rotationsbewegungsachse R drehbar. Dabei rotiert sie auch die zweite Drehachse 30 entsprechend, die an der ersten Drehachse 30 angeordnet ist und den Messtaster 8 unmittelbar trägt. Die

zweite Drehachse 30 ist selbst über eine horizontal (in Y-Richtung) verlaufende Rotationsbewegungsachse R drehbar.

**[0125]** Um die zweite Drehachse 30 zu kalibrieren, gegebenenfalls aber auch die erste Drehachse 30, wird anstelle des Tasters 8 eine Markieranordnung 100, die zum Beispiel auf einem geeigneten Träger angebracht ist, automatisch durch Verbinden mit einer dann freien Taster-Schnittstelle eingewechselt. Dies erfolgt bevorzugt derart, dass eine Symmetrieachse der Markieranordnung 100, die nachstehend insbesondere anhand von **Fig. 3C** noch erläutert wird, mit einer Rotationsbewegungsachse R der Drehachse 30, die zu kalibrieren ist, zusammenfällt oder zumindest parallel hierzu.

**[0126]** Zur Kalibrierung wird die Markieranordnung 100 von der zweiten Drehachse 30 relativ zu den feststehenden Kameras 13a, 13b um die horizontale Drehachse R verdreht. Dabei erfolgen kontinuierliche Aufnahmen und Bilderzeugungen durch die Kameras 13a, 13b. Die dabei gewonnenen Bilddaten werden an die Computereinrichtung 10 gesendet.

**[0127]** Die Computereinrichtung 10 ist dazu eingerichtet, mittels bekannter Bildauswertelgorithmen (zum Beispiel Mustererkennungsalgorithmen) die Position nachstehend erläuterten Einzelmarker 102 in einem jeweiligen Bildkoordinatensystem zu ermitteln. Anders ausgedrückt können also die zweidimensionalen Koordinaten der Einzelmarker 102 in Abbildungskoordinaten bestimmt werden.

**[0128]** Durch Auswerten einer Mehrzahl von Kamerabildern für jede Drehstellung der Drehachse 30 (d. h. eine Mehrzahl von Bildern je Drehstellung und/oder Winkelposition mit der jeweils darin optisch erfassten Markieranordnung 100) und insbesondere der darauf basierend identifizierten zweidimensionalen Marker-Koordinaten eines jeden Bildes können auch die dreidimensionalen Koordinaten der Markieranordnung 100 und genauer gesagt von deren Einzelmarkern 102 bestimmt werden. Geeignete Algorithmen hierfür sind im allgemeinen Beschreibungsteil genannt.

**[0129]** Diese werden von der Computereinrichtung 10 dann dazu verwendet werden, um mittels der vorstehend erwähnten bekannten Ansätze und erneut drehstellungsabhängig die Fehleranteile oder auch Abweichungen der Drehachse 30 von einer idealen Drehbewegung zu bestimmen. Diese stellen die schlussendlich gewonnenen Kalibrierinformationen dar, die in einer nicht gesondert dargestellten Speichereinrichtung der Computereinrichtung 10 oder aber einer anderweitigen Speichereinrichtung des Koordinatenmessgeräts 1 abgespeichert werden. In sich bekannter Weise kann bei zukünftigen Messungen auf diese abgespeicherten Informationen bzw.

Werte zurückgegriffen werden, um eine Messwertkorrektur und genauer gesagt eine Kompensation der ermittelten Abweichungen vornehmen zu können.

**[0130]** In **Fig. 2** ist eine weitere Ausführungsform gezeigt, die auf einem gleichartigen Koordinatenmessgerät 1 und insbesondere einer gleichartigen Steuereinrichtung 10 basiert. Ein Unterschied liegt jedoch dahingehend vor, dass in diesem Fall die Drehachse 30 in einem auf dem Messtisch 2 positionierten ortsfesten Drehtisch 30 des Koordinatenmessgeräts 1 integriert ist. Eine Rotationsbewegungsachse R dieses Drehtisches 30 verläuft in vertikaler Richtung bzw. in Z-Richtung.

**[0131]** Auf dem Drehtisch 100 ist eine Markieranordnung 100 angedeutet, wie sie insbesondere anhand der nachfolgend **Fig. 3A-3B** noch näher erläutert wird. Diese zweidimensionale Markieranordnung 100 wird zum Beispiel als ein Papierausdruck auf einem zweidimensionalen und insbesondere einem tellerförmigen Träger aufgebracht, der dann an einer Oberseite des Drehtisches 100 drehfest befestigt wird, sodass die Markieranordnung 100 nach oben weist (also der Pinole 6 zugewandt ist).

**[0132]** An der Pinole 6 sind hingegen die wiederum drehsymmetrisch angeordneten Kameras 13a, 13b angeordnet. Lediglich beispielhaft sind dabei Erfassungsbereiche der Kameras 13a, 13b strichliert eingetragen, die sich bevorzugt deutlich überschneiden und ferner bevorzugt derart von dem KMG 1 positioniert werden, dass sie jeweils die Markieranordnung 100 vollständig erfassen können.

**[0133]** Nach einem Ausrichten der Kameras 13a, 13b, und zwar bevorzugt derart, dass diese konzentrisch zur Rotationsbewegungsachse R angeordnet sind (d. h. die (Dreh-) Symmetrieachse der Kamera-Anordnung, die in dem gezeigten Beispiel entlang der Pinole 6 bzw. Z-Achse verläuft, mit der Rotationsbewegungsachse R zusammenfällt oder zumindest parallel hierzu verläuft), wird die Drehachse 30 und damit auch Markieranordnung 100 relativ zu den feststehenden Kameras 13a, 13b verdreht.

**[0134]** Analog, wie zur **Fig. 1** geschildert, erfassen diese dann winkelpositionsabhängige Bilder der Markieranordnung 100, die von der Computereinrichtung 10 zum Bestimmen der Kalibrierinformationen ausgewertet werden.

**[0135]** In den **Fig. 3A-3C** Beispiele für Markieranordnungen 100 gezeigt. Die Markieranordnungen 100 der **Fig. 3A-3B** sind eben bzw. zweidimensional und kommen bevorzugt bei der Ausführungsform aus **Fig. 2** zum Einsatz, d. h. werden auf einem Drehtisch positioniert.

**[0136]** Die Markeranordnung 100 der **Fig. 3C** ist als ein dreidimensionaler Körper ausgebildet und kommt bevorzugt bei der Variante aus **Fig. 1** zum Einsatz. Dort kann sie zum Beispiel an der zweiten Drehachse 30 anstelle des Tasters 8 angebracht werden.

**[0137]** Sämtliche Markeranordnungen 100 umfassen eine Mehrzahl von Einzelmarkern 102, von denen jeweils nur einzelne mit einem gesonderten Bezugszeichen versehen sind. Im Fall der **Fig. 3A-3B** handelt es sich hierbei um ausgefüllte schwarze Kreise (im Fall von **Fig. 3B** unterschiedlicher Dimensionen) sowie auch einen zentralen Aruco-Einzelmarker 102 in **Fig. 3A**.

**[0138]** Im Fall von **Fig. 3C** sind die Einzelmarker 102 ringcodiert, wobei in der gezeigten Ansicht einige verdeckt und lediglich beispielhaft vier erkennbar sind.

**[0139]** Jeder Einzelmarker 102 ist als ein gesonderter Marker optisch erfassbar und für jeden Einzelmarker 102 können von der Computereinrichtung 10 dann zweidimensionale Abbildungskordinaten sowie dreidimensionale Koordinatenwerte ermittelt werden.

**[0140]** Zunächst Bezug nehmend auf **Fig. 3A** erkennt man, dass die kreisförmigen Einzelmarker 102 kreisförmig um den zentralen Aruco-Einzelmarker 102 verteilt sind. Genauer gesagt sind sie gleichmäßig um diesen verteilt und zwar entlang dreier einzelner konzentrisch angeordneter Kreisumfänge, für die die dazugehörigen Radien  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  in **Fig. 3A** angedeutet sind.

**[0141]** Sämtliche dieser Einzelmarker 102 sind von einem auf dem demselben Kreisumfang liegenden und unmittelbar benachbarten Einzelmarker 102 um den jeweils gleichen Winkelabstand beanstandet. Dies führt dazu, dass jeder Einzelmarker 102 auf einer radial verlaufenden Geraden  $G$  liegt, welche zwei weitere Einzelmarker 102 von jeweils einem anderen Kreisumfang schneidet.

**[0142]** Die Anzahl und Verteilung der kreisförmigen Einzelmarker 102 ist lediglich beispielhaft gewählt. Beispielsweise kann auch lediglich ein Kreisumfang mit entlang diesem verteilten Einzelmarkern 102 vorgesehen sein. Es wird jedoch bevorzugt, dass die um den zentralen Einzelmarker 102 verteilten Einzelmarker 102 kreisförmig und insbesondere drehsymmetrisch angeordnet sind. Letzteres bedeutet wiederum, dass bei einer (gedanklichen) Drehung um vorbestimmte Winkelwerte (und insbesondere um die Winkelabstände zwischen zwei Einzelmarkern 102 auf demselben Kreisumfang) ein Einzelmarker 102 auf einen vormals sich an identischer Position befindlichen Einzelmarker 102 abgebildet wird. Da die kreisförmig verteilten Einzelmarker 102 im

gezeigten Beispiel identisch zueinander sind, wird folglich die kreisförmige Verteilung der Einzelmarker 102 bei einer entsprechend Drehung auf sich selbst abgebildet.

**[0143]** Eine Symmetrieachse, um die die Einzelmarker 102 drehsymmetrisch verteilt sind, steht in **Fig. 3A** normal auf der Blattebene und verläuft durch den Mittelpunkt der Kreisumfänge. Wie erwähnt, wird die Markeranordnung 100 bevorzugt derart positioniert, dass diese Symmetrieachse mit der Rotationsbewegungsachse  $R$  einer zu kalibrierenden Drehachse 30 zusammenfällt.

**[0144]** Der zentrale Aruco-Einzelmarker 102, der in einem Mittelpunkt der Markeranordnung 100 liegt, dient in an sich bekannter Weise zum Identifizieren einer Orientierung der Markeranordnung 100 z.B. relativ zu einem Kamera-Koordinatensystem. Dies kann, wie vorstehend allgemein erläutert, dazu verwendet werden, um Identitäten der Einzelmarker 102 festzustellen und insbesondere gleiche Marker in von verschiedenen Kameras 13a, 13b erfassten Bildern zu identifizieren.

**[0145]** Im Folgenden wird auf die Markeranordnung 100 aus **Fig. 3B** eingegangen. Hier sind die Einzelmarker 102 in Form eines Gitters verteilt. Drei mittig positionierte Einzelmarker 102, von denen einer mit einem gesonderten Bezugszeichen versehen ist, sind größer als die anderen Einzelmarker 102 dimensioniert. Sie sind in an sich bekannter Weise derart relativ zueinander angeordnet, dass wiederum eine Orientierung der Markeranordnung 100 identifizierbar ist, zum Beispiel relativ zu einem Kamera-Koordinatensystem.

**[0146]** Um die bevorzugte drehsymmetrische Eigenschaft der Markeranordnung 100 zu erreichen, kann vorgesehen sein, anhand der ermittelten Orientierung dann lediglich einzelne der Einzelmarker 102 auszuwerten (d. h. hierfür Koordinaten zu ermitteln). Genauer gesagt können nur solche Einzelmarker 102 im Rahmen einer weiteren Auswertung betrachtet werden, die drehsymmetrisch zum Beispiel um die drei zentralen Orientierungs-Einzelmarker 102 und/oder einen nicht gesondert dargestellten Mittelpunkt dieser kreisförmigen Verteilung verteilt sind. Eine entsprechende drehsymmetrische Auswahl von Einzelmarker 102 ist in **Fig. 3B** durch eine jeweilige Umrandung hervorgehoben.

**[0147]** Die Drehsymmetrie liegt erneut in Bezug auf eine orthogonal auf der Blattebene stehende Symmetrieachse vor. Diese fällt, wie zur **Fig. 3** erläutert, bevorzugt mit einer Rotationsbewegungsachse  $R$  zu kalibrierenden Drehachse 30 zusammenfallen.

**[0148]** Im Folgenden wird auf die Markeranordnung 100 aus **Fig. 3C** eingegangen. Hierbei kann es sich

zum Beispiel um einen Kunststoffkörper handeln. Dieser umfasst lediglich beispielhaft zwei Ringabschnitte 104, auf denen mehrere ringcodierte Einzelmarker 102 gleichmäßig (d. h. vergleichbaren Abstände zueinander) in Umfangsrichtung verteilt sind. Folglich sind einige der Einzelmarker 102 in der dargestellten Ansicht vom Betrachter abgewandt.

Gezeigt ist eine Längsachse L der Markeranordnung 100. Um diese Längsachse L sind die Einzelmarker 102 eines jeden Ringabschnitts 104 drehsymmetrisch verteilt. Ein Mittelpunkt einer entsprechend Verteilung liegt dabei auf der Längsachse L. Da die Einzelmarker 102 vorliegend jeweils voneinander abweichen, ist die Drehsymmetrie derart zu verstehen, dass bei einer gedanklichen Drehung um die Längsachse L um den Betrag der Winkelabstände zwischen den Einzelmarkern 102 die Einzelmarker 102 auf Positionen abgebildet werden, auf denen sich vorher ein anderer Einzelmarker 102 befunden hat. Die Drehsymmetrie ist also bezogen auf die Positionen bzw. Anordnung und nicht zwingend bezogen auf die Art der Einzelmarker 102 zu verstehen.

**[0149]** Bevorzugt wird auch in diesem Fall die Markeranordnung 102 derart an der Drehachse 30 angeordnet, dass die Längsachse L mit der Rotationsbewegungsachse R zusammenfällt oder zumindest parallel hierzu verläuft. Hierfür kann zum Beispiel einen in die Tasterschnittstelle des zweiten Drehgelenks 30 aus **Fig. 1** einsetzbarer Winkelabschnitt 106 vorgesehen sein.

**[0150]** In **Fig. 4** ist ein Ablaufschema eines Verfahrens gezeigt, wie es vorstehend bereits in Bezug auf die **Fig. 1** und **2** erläutert wurde. Nicht sämtliche der Schritte S1-S4 sind dabei zwingend. Auch die Reihenfolge ist, sofern nicht anders erläutert oder ersichtlich, nur beispielhaft gewählt. Insbesondere können die Schritte S1-S4 zumindest auch teilweise parallel ablaufen.

**[0151]** In einem Schritt S1 wird die Markeranordnung 100 derart an der Drehachse 30 angeordnet (zum Beispiel per automatischem Einwechseln ggf. samt Verbinden mit einer Tasterschnittstelle), dass eine Symmetrieachse hiervon, um die die Einzelmarker 102 drehsymmetrisch verteilt sind, mit der Rotationsbewegungsachse R zusammenfällt oder zumindest parallel hierzu verläuft.

**[0152]** In einem Schritt S2 wird die Markeranordnung 100 von der Drehachse 30 relativ zu den Kameras 13a, 13b um die Rotationsbewegungsachse R rotiert. Dabei wird die Markeranordnung 100 kontinuierlich optisch erfasst. Jede der Kameras 13a, 13b liefert winkelpositionsabhängige Bilder der Markeranordnung 100, sodass für jede im Folgenden betrachtete Winkelposition Bilder von jeder der Kameras 13a, 13b vorliegen.

**[0153]** In einem Schritt S3 werden in jedem erfassten Bild zweidimensionale Koordinaten von zumindest ausgewählten Einzelmarkern 102 in z.B. einem Bildkoordinatensystem ermittelt

**[0154]** In einem Schritt S4 werden aus der Mehrzahl von Bildern dreidimensionale Koordinaten der Einzelmarker 102 winkelpositionsabhängig erfasst. Hieraus können dann die Drehabweichungen und Fehleranteile, welche Kalibrierinformationen bilden, der Drehachse 30 ermittelt und abgespeichert werden.

**[0155]** Insbesondere können die Kalibrierinformationen in einer Korrekturmatrix oder Korrekturdatei gespeichert werden. Diese können auf einem Datenträger, einer Datenbank oder einem Speicherbaustein gespeichert werden, welche jeweils der Drehachse zugeordnet oder in dieser eingebaut sein können.

**[0156]** Analog zu bekannten Verfahren können diese Kalibrierinformationen vor oder bei der Verwendung der Drehachse im Zielsystem (zum Beispiel einem Messroboter oder einer Drehachse eines KMGs) in eine Recheneinheit (zum Beispiel von einer Steuereinrichtung) geladen und zur Korrektur der gewonnenen Messdaten verwendet werden.

**[0157]** In den **Fig. 5A-D** sind jeweils in einer Draufsicht-Perspektive Ansichten einer Drehachse 30 mit einer darauf positionierten Markeranordnung 100 gezeigt. Die Rotationsachse R, um die die Drehachse 30 rotiert, steht senkrecht auf der Blattebene. Die Ansicht entspricht einer Bildebene, wie durch das X-Y-Bildkoordinatensystem (oder auch Kamerakoordinatensystem) angedeutet.

**[0158]** Die **Fig. 5A-B** bilden den Fall einer konzentrischen Anordnung der Markeranordnung 100 auf der Drehachse 30 ab (d. h. konzentrisch zu deren Rotationsachse R), wohingegen die **Fig. 5C-D** den nicht konzentrischen Fall abbilden. Letzteres erkennt man daran, dass ein für jede der Markeranordnung 100 eingetragenes Markerkoordinatensystem, das im Mittelpunkt der Markeranordnung 100 liegt, versetzt zur Rotationsachse R der Drehachse 30 ist.

**[0159]** Jede der Markeranordnungen 100 umfasst eine Mehrzahl von Einzelmarkern 102, die drehsymmetrisch um den Mittelpunkt der Markeranordnungen 100 verteilt sind. Bei konzentrischer Anordnung zur Rotationsachse R ergibt sich somit auch eine drehsymmetrische Verteilung der Einzelmarker 102 um diese Rotationsachse R.

**[0160]** Die Einzelmarker 102 sind beispielhaft von 1 bis 8 durchnummeriert. Der Zustand aus **Fig. 5B** bzw. **5D** stellt somit einen gegenüber dem Zustand auf **5A** bzw. **5C** um  $90^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn verdrehten Zustand dar.

**[0161]** Ferner gezeigt sind Fehlerkomponenten FM, FK, die in bei einer Messung erfassten Verschiebungen gegenüber dem abgebildeten Idealzustand (oder, mit anderen Worten, dem Referenzzustand) der Einzelmarker 102 resultieren. Die Fehlerkomponente FM geht dabei auf einen Fehler innerhalb der Markeranordnung 100 zurück (zum Beispiel auf einen wenig qualitativen Ausdruck des mit 2 markierten Makers). Die Fehlerkomponente FK resultiert aus Fehlern der Erfassungseinrichtungen, zum Beispiel aufgrund einer fehlerhaften intrinsischen Kalibrierung.

**[0162]** Im Fall der konzentrischen Anordnung gemäß den **Fig. 5A-B** erkennt man, dass bei der Drehung um  $90^\circ$  stets einer der Marker 102 an derselben Position in gleicher Weise (d. h. mit derselben Fehlerkomponente FK) erfasst wird. Diese Fehlerkomponenten FK kann anschließend bei Lageberechnungen der Marker 102 rechnerisch kompensiert werden. Die markerbedingte Fehlerkomponente FM rotiert hingegen gemeinsam mit der Markeranordnung 100.

**[0163]** Bei den nicht-konzentrischen Anordnung der **Fig. 5C-D** fällt hingegen die Fehlerkomponente FK nicht in jedem Fall mit einem erfassten Marker 102 zusammen. Nur in bestimmten Winkelstellungen wird dann einer der Marker 102 als entsprechend verschoben erfasst. Dies würde fälschlicherweise als drehpositionsabhängiger Drehachsenfehler interpretiert werden.

**[0164]** In den **Fig. 6A-C** ist ein Beispiel der Kalibrierung einer Drehachse 30 mit zwei konzentrischen angeordneten Markeranordnungen 107, 109 gezeigt. Gezeigt ist ein Basisabschnitt eines Industrieroboters 200. Dieser ist nach Art eines gewöhnlichen 6-Achsen-Knickarmroboters ausgebildet. Kalibriert werden soll im gezeigten Beispiel die sogenannte dritte Achse (von der Basis an betrachtet), die im folgenden lediglich als Drehachse 30 bezeichnet wird und deren Rotationsachse R eingetragen ist. In der Ansicht der **Fig. 6B-C** steht diese Rotationsachse R senkrecht auf der Blattebene, ist aber nicht noch immer gesondert markiert.

**[0165]** **Fig. 6A** enthält eine perspektivische Teilsicht der Gesamtanordnung. Die **Fig. 6 B-C** enthalten eine Frontalansicht der betrachteten Drehachse 30, die einer Blickrichtung eines Kamerasystems 210 entspricht, das mehrere (im gezeigten Fall vier) Erfassungseinrichtungen 13a, 13b umfasst.

**[0166]** Aus den **Fig. 6 B-C** verdeutlicht sich, dass die Markeranordnung 100 in diesem Fall mehrteilig aufgebaut ist. Eine äußere Markeranordnung 107, die kreisringförmig ausgebildet ist und lediglich beispielhaft vier Einzelmarker 102 aufweist, umgibt eine kreisförmige innere Markeranordnung 109, die ledig-

lich beispielhaft eine größere Anzahl von Einzelmarkern 102 aufweist (nicht sämtliche sind mit einem eigenen Bezugszeichen versehen). Die äußere und innere Markeranordnung 107, 109 sind konzentrisch zueinander und konzentrisch zur Rotationsachse R angeordnet. Die Einzelmarker 102 sind drehsymmetrisch um die Rotationsachse R verteilt.

**[0167]** Jede der Markeranordnungen 107, 109 umfasst auch einen Marker 111, der als Referenz zur Identifizierung der weiteren Marker 102 dient. Bei diesen Markern 111 ist auch jeweils Marker-Koordinatensystem eingetragen, aus dem sich eine Verdrehung der Markeranordnung 107, 109 ergibt. Folglich erkennt man, dass in **Fig. 6C** die innere Markeranordnung 107 gegenüber der äußeren Markeranordnung 109 um  $90^\circ$  im Uhrzeigersinn verdreht wurde.

**[0168]** Gezeigt sind auch verschiedene Fehlerkomponenten, die Relativbewegungen zwischen dem Kamerasystem 210 und der Drehachse 30 hervorgerufen, ohne dass dies auf die eigentlich zu bestimmenden Fehler bzw. Ungenauigkeiten der Drehachse 30 zurückzuführen ist. Dies betrifft zum Beispiel einen mit TD bezeichneten Temperaturdrift des Kamerasystems 10 bzw. eines optionalen Stativs 212 hiervon (siehe **Fig. 6A**).

**[0169]** Ebenso angedeutet ist, dass im kinematische Sinne nachgelagerte Glieder des Roboters Kräfte  $F_G$  und Momente M auf die Drehachse 30 aufbringen. Diese sind aber drehstellungsabhängig, sodass es auch zu drehstellungsabhängigen Deformationen der Drehachse 30 kommen kann.

**[0170]** Beispielsweise wirkt im Fall von **Fig. 6B** primär eine Druckkraft in Form der Gravitationskraft  $F_G$  auf die Drehachse 30 ein. Bei der Rotation in die Stellung von **Fig. 6C** erzeugt diese aufgrund eines dann auftretenden Hebelarms zur Drehachse 30 hingegen ein Moment M, was in abweichenden Deformationen und somit Relativbewegungen der Markeranordnungen 107, 109 zum Kamerasystem 210 resultieren kann. Die resultierende Fehlerkomponente FD dieser Relativbewegung ist in **Fig. 6C** eingetragen. In dem gezeigten Beispiel betrifft sie das Absinken gegenüber der ursprünglichen Stellung aus **Fig. 6B** aufgrund des einwirkenden Moments M und/oder eines unabhängig davon auftretenden etwaigen Temperaturdrifts der Roboterglieder.

**[0171]** Wie im allgemeinen Beschreibungsteil bereits erläutert, kann deshalb vorgesehen sein, die äußere Markeranordnung 107 als eine mit der Fehlerkomponente FD mitbewegte Referenz zu nutzen und Bewegungen der inneren Markeranordnung 109 relativ zur äußeren Markeranordnung 107 zu betrachten. Diese Relativbewegungen werden von der Fehlerkomponente FD nicht beeinträchtigt,

sodass im Wesentlichen einzig die auf tatsächlichen Drehachsenfehler zurückzuführenden Bewegungen und Fehlerkomponenten bestimmt werden können.

**[0172]** Genauer gesagt können die bei den Referenzmarkern 111 eingetragenen Koordinatensysteme der Markieranordnungen 107, 109 zugrunde gelegt werden und können Relativbewegungen und insbesondere -verdrehungen hiervon zueinander ermittelt werden. Auf diese Weise können Bewegungen der äußeren Markieranordnung 107 in das Koordinatensystem der inneren Markieranordnung 109, dessen Lage per Bildauswertung ermittelbar ist, transformiert werden.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Kalibrieren einer Drehachse (30) für Koordinatenmessungen, wobei wenigstens eine Drehachse (30) sowie zwei Markieranordnungen (100, 107, 109) und wenigstens zwei Erfassungseinrichtungen (13a, 13b) bereitgestellt sind, und wobei das Verfahren umfasst:

- Erzeugen einer Relativbewegung zwischen wenigstens einer der Markieranordnungen (100, 107, 109) und den Erfassungseinrichtungen (13a, 13b) und von den Markieranordnungen (100, 107, 109) zueinander mittels der Drehachse (30), während die Erfassungseinrichtungen (13a, 13b) die Markieranordnungen (100, 107, 109) jeweils optisch erfassen;

- Ermitteln von Koordinaten der Markieranordnungen (100, 107, 109) auf Basis von Erfassungsinformationen der optischen Erfassungseinrichtungen (13a, 13b);

- Bestimmen von Kalibrierinformationen zum Kalibrieren der Drehachse (30) anhand der ermittelten Koordinaten.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Kalibrierinformationen Abweichungen der Drehachse (30) von einer fehlerfreien Drehbewegung beschreiben.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei als Abweichungen wenigstens zwei Fehlerkomponenten der Drehbewegung erfasst werden.

4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Erfassungseinrichtungen (13a, 13b) gleichmäßig um eine Rotationsbewegungsachse der Drehachse (30) verteilt sind.

5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei wenigstens eine der Markieranordnungen (100, 107, 109) mehrere Einzelmarker (102) umfasst, die kreisförmig sowie bevorzugt in jeweils gleichen Winkelabständen zueinander um einen Mittelpunkt der Markieranordnung (100) verteilt sind.

6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei wenigstens eine der Markieranordnungen (100, 107, 109) konzentrisch relativ zu der Drehachse (30) angeordnet wird.

7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Drehachse (30) in einem Multi-Drehachsen-Gelenk (32) und insbesondere in einem Dreh-Schwenk-Gelenk eines Koordinatenmessgeräts (1) verbaut ist.

8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Drehachse (30) in einem Drehtisch (12) des Koordinatenmessgeräts (1) verbaut ist.

9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei wenigstens eine weitere Drehachse (30) bereitgestellt ist und für jede weitere Drehachse (30) eine gesonderte Markieranordnung (100) bereitgestellt ist und wobei das Verfahren umfasst:

- konzentrisches Relativanordnen einer jeweiligen Drehachse (30) und der dieser zugeordneten Markieranordnung(en) (100, 107, 109) und anschließendes Erzeugen der Relativbewegung zwischen einer jeden Drehachse (30) und der zugeordneten Markieranordnung(en) (100, 107, 109).

10. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, ferner umfassend:

- extrinsisches Kalibrieren der Erfassungseinrichtungen (13a, 13b) durch Erfassen der Markieranordnungen (100, 107, 109).

11. Anordnung (20) zum Kalibrieren einer Drehachse (30) für Koordinatenmessungen, wobei die Anordnung wenigstens eine Drehachse (30), wenigstens zwei Markieranordnungen (100, 107, 109) und wenigstens zwei Erfassungseinrichtungen (13a, 13b) umfasst,

wobei eine Relativbewegung zwischen wenigstens einer Markieranordnung (100, 107, 109) und den Erfassungseinrichtungen (13a, 13b) sowie von den Markieranordnungen (100, 107, 109) zueinander mittels der Drehachse (30) erzeugbar ist, während die Erfassungseinrichtungen (13a, 13b) die Markieranordnungen (100, 107, 109) jeweils optisch erfassen;

und wobei die Anordnung eine Computereinrichtung (10) umfasst, die dazu eingerichtet ist

- Koordinaten der Markieranordnungen (100, 107, 109) auf Basis von Erfassungsinformationen der optischen Erfassungseinrichtungen (13a, 13b) zu ermitteln; und

- Kalibrierinformationen zum Kalibrieren der Drehachse (30) anhand der ermittelten Koordinaten zu bestimmen.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen



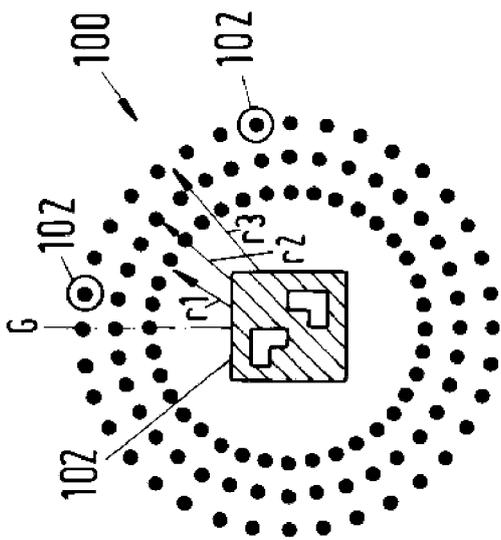


Fig. 3A

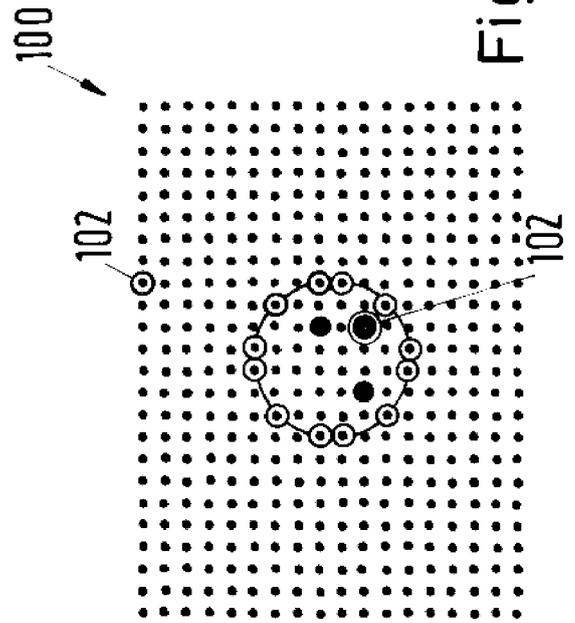


Fig. 3B

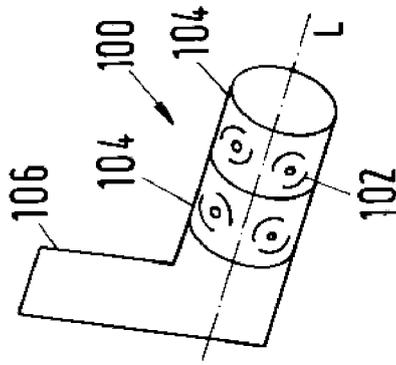


Fig. 3C

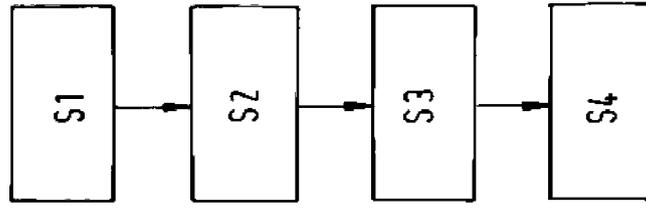


Fig. 4

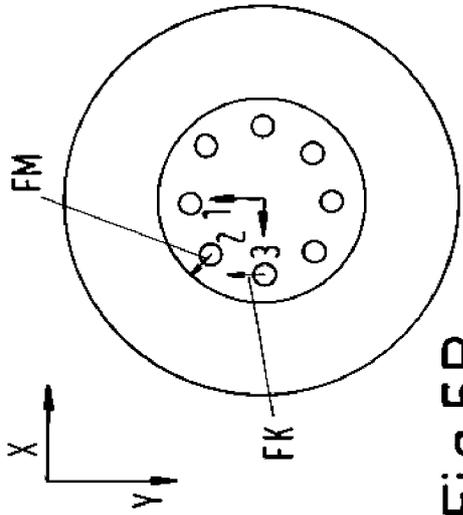


Fig. 5B

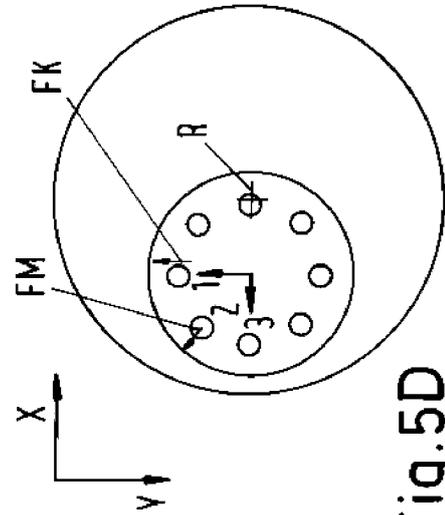


Fig. 5D

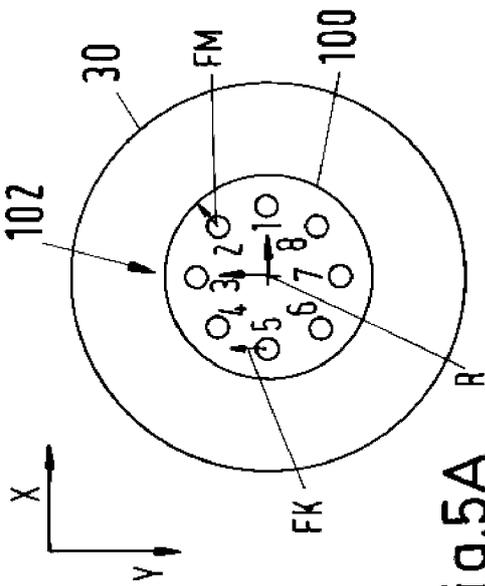


Fig. 5A

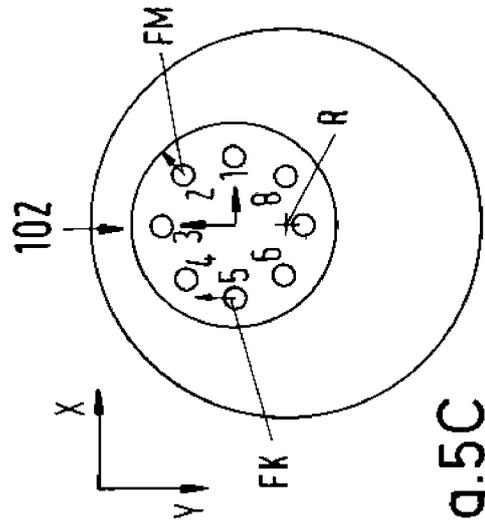


Fig. 5C

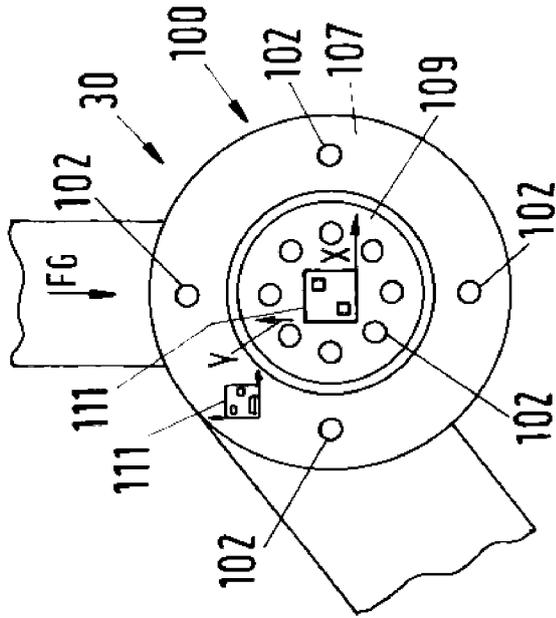


Fig.6B

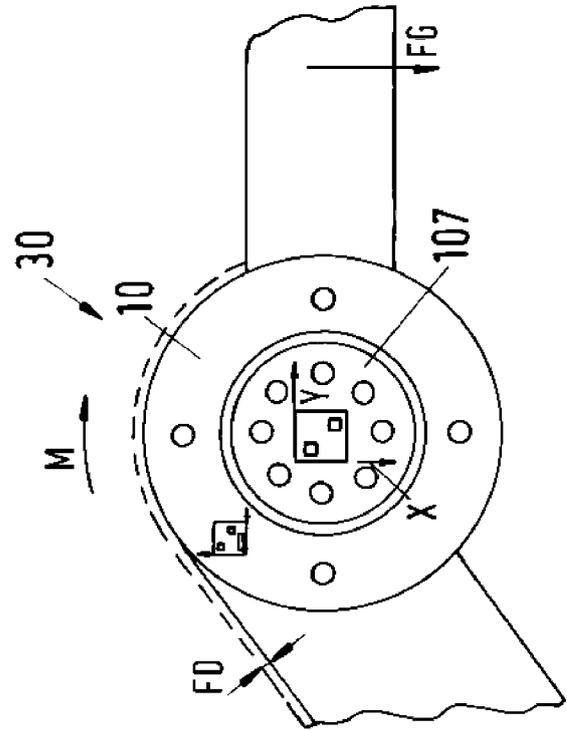


Fig.6C

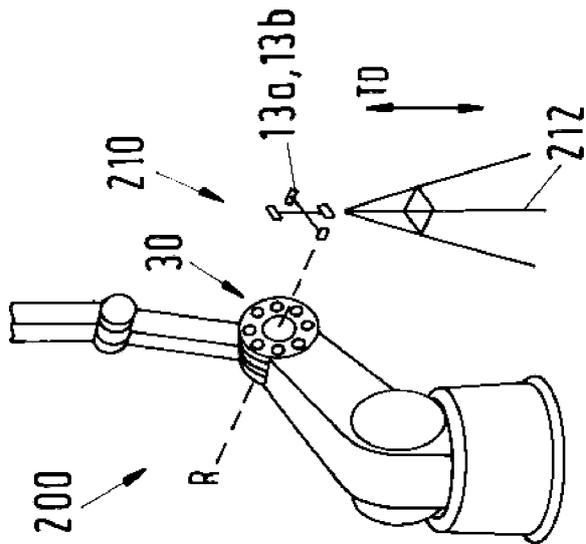


Fig.6A