



(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2016 118 620.1**

(22) Anmeldetag: **30.09.2016**

(43) Offenlegungstag: **05.04.2018**

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **02.10.2024**

(51) Int Cl.: **G01B 5/008** (2006.01)  
**G01B 11/00** (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

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

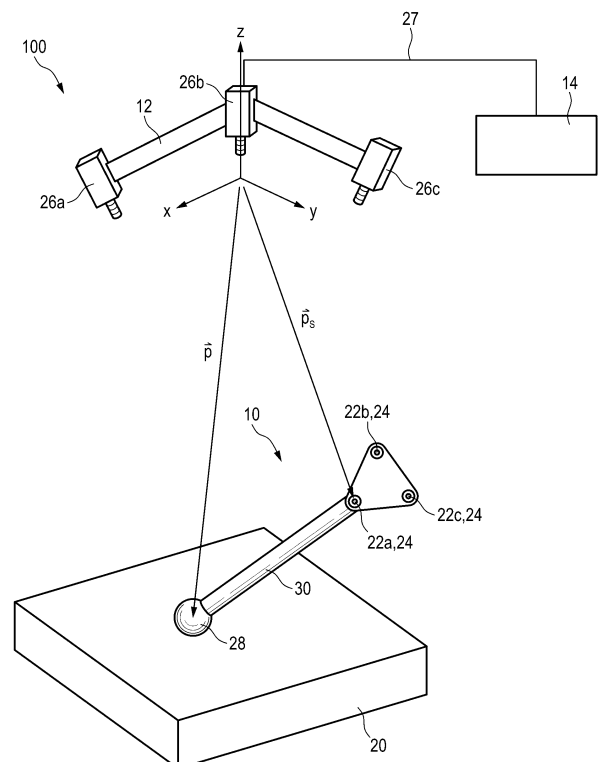
(74) Vertreter:  
**WITTE, WELLER & PARTNER Patentanwälte mbB,  
70173 Stuttgart, DE**

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

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

(54) Bezeichnung: **Messsystem und Messverfahren**

(57) Hauptanspruch: Messsystem (100) mit:  
- einem Messwerkzeug (10), welches einen Tastkörper (28) und einen optischen Marker (24) aufweist;  
- einer Kamera (12) zur Aufnahme von Bilddaten des Messwerkzeugs (10); und  
- einer Auswerte- und Steuereinheit (14), welche dazu eingerichtet ist, die von der Kamera (12) aufgenommenen Bilddaten auszuwerten und daraus eine Position und Lage des optischen Markers (24) zu bestimmen, wobei die Auswerte- und Steuereinheit (14) ferner dazu eingerichtet ist, aus der Position und Lage des optischen Markers (24) eine Position des Tastkörpers (28) für einen kraftfreien Zustand des Messwerkzeugs (10) zu berechnen, eine Verformung des Messwerkzeugs (10) aufgrund äußerer, auf das Messwerkzeug (10) einwirkender mechanischer Belastung zu berechnen, und räumliche Positionskoordinaten des Tastkörpers (28) durch Superposition von Positionsänderungs-Komponenten, welche aufgrund der berechneten Verformung zustande kommen, und der Position des Tastkörpers (28) im kraftfreien Zustand zu berechnen.



(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	100 66 470	B4
DE	26 05 772	A1
DE	102 58 579	A1
DE	10 2008 049 751	A1
DE	10 2015 205 615	A1
EP	0 703 517	B1
EP	1 984 695	B1
EP	2 172 735	B1
WO	93/ 07 443	A1
WO	2006/ 114 627	A1
WO	2013/ 007 285	A1

**LOTZE, Werner: Messende Taster mit mehreren Freiheitsgraden. In: TR Technische Rundschau, Heft 29/30, 1993, S. 20-25.**

**Beschreibung**

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Messsystem mit einem Messwerkzeug, welches einen Tastkörper und einen optischen Marker aufweist; mit einer Kamera zur Aufnahme von Bilddaten des Messwerkzeugs; und mit einer Auswerte- und Steuereinheit, welche dazu eingerichtet ist, die von der Kamera aufgenommenen Bilddaten auszuwerten und daraus eine Position und Lage des optischen Markers zu bestimmen.

**[0002]** Die vorliegende Erfindung betrifft ferner ein entsprechendes Messverfahren sowie ein Computerprogramm, das einen Programmcode aufweist, der dazu eingerichtet ist, bei Ausführung auf einem Computer zur Steuerung des oben genannten Messsystems das erfindungsgemäße Verfahren auszuführen.

**[0003]** Ein gattungsgemäßes Messsystem ist bereits aus der DE 102 58 579 A1 bekannt.

**[0004]** Die DE 102 58 579 A1 zeigt eine Messeinrichtung, die insbesondere zur punktweisen Vermessung von Werkstückoberflächen durch mechanische Antastung geeignet ist. Ein Kraftgenerator ist vorgesehen, um die Antastkraft zu definieren, mit der ein Sondenkörper die Oberfläche des Werkstücks berührt. Zur Bestimmung der räumlichen Position des Sondenkörpers oder eines die Sonde haltenden Trägers ist eine berührungslose Positionsmesseinrichtung vorgesehen, die sich nicht mit der Sonde bewegt.

**[0005]** Eine weitere beispielhafte Messvorrichtung und ein weiteres beispielhaftes Messsystem sind aus der DE 10 2015 205 615 A1 bekannt.

**[0006]** Messsysteme dieser Art dienen dazu, beispielsweise im Rahmen einer Qualitätssicherung, Werkstücke zu überprüfen oder die Geometrie eines Werkstücks vollständig im Rahmen eines sogenannten „Reverse Engineering“ zu ermitteln. Darüber hinaus sind vielfältige weitere Anwendungsmöglichkeiten denkbar, wie z.B. prozesssteuernde Anwendungen, bei denen die Messtechnik direkt zur Online-Überwachung und -Regelung von Fertigungs- und Bearbeitungsprozessen angewendet wird. Ein häufiges Anwendungsbeispiel ist die Überprüfung von Fahrzeugkarosseriebauteilen auf eventuelle Fertigungsfehler. Grundsätzlich können derartige Messsysteme jedoch zur Vermessung jeglicher Art von Messobjekten verwendet werden.

**[0007]** Messsysteme mit handgeführten Messwerkzeugen dienen als Alternative zu aufwendigeren Koordinatenmessgeräten, in denen die Werkstücke auf einer stationären bzw. fest installierten Maschine

mit relativ komplexem Aufbau entweder optisch und/oder taktil vermessen werden.

**[0008]** Aufgrund der mobilen Einsatzfähigkeit gewinnen Messsysteme mit handgeführten Messwerkzeugen zunehmend an Wichtigkeit, da diese das Einsatzspektrum im Vergleich zu stationären bzw. fest installierten Koordinatenmessgeräten allein aufgrund ihrer flexiblen Einsatzfähigkeit noch weiter ausdehnen würden. Gegen die Einsatzfähigkeit eines solchen mobilen Messsystems sprechen jedoch häufig die extrem hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit, welche diese liefern sollen. Zwar existieren mittlerweile mannigfaltige digital-optische Möglichkeiten, insbesondere Softwareverfahren, um aus Bildern bzw. Filmen von Objekten bzw. Szenen auf die räumliche Struktur der abgebildeten Objekte in der Szene zu schließen. Grundsätzlich haben diese Verfahren aber einige Defizite, welche dazu führen, dass sie für viele hochgenaue Messungen derzeit noch nicht in Frage kommen, sondern lediglich für Messungen verwendet werden, welche geringere Anforderungen an die Messgenauigkeit haben.

**[0009]** Bei dem aus der DE 10 2015 205 615 A1 bekannten Messsystem ist an einem von Hand tragbaren Messwerkzeug ein taktiler Tastkopf angeordnet, mit dem sich ein zu vermessendes Werkstück von Hand abtasten lässt. Des Weiteren sind an einem Griffteil des Messwerkzeugs mehrere optische Marker angeordnet, welche regelmäßig Infrarotstrahlen abstrahlen, die über ein Kamerasystem von außen erfasst werden. Die von dem Kamerasystem aufgenommenen Kamerabilder werden in einer Recheneinheit ausgewertet, wobei durch einen geeigneten Rechenalgorithmus die Position und Orientierung der Marker im Raum berechnet wird. Dies erfolgt meist anhand von optischen Triangulationsverfahren. Durch einen Kalibrierschritt kann die Lage und Position des Tastkopfs bzw. des Tastkörpers relativ zu den Markern bestimmt werden. Wenn ein Anwender das Messwerkzeug mit der Hand gegen ein Werkstück führt, so dass der Tastkörper das Werkstück berührt, kann damit ein Messpunkt auf dem Werkstück bestimmt werden. Form und Lage des Werkstücks relativ zu dem Kamerasystem ergeben sich letztendlich aus einer geeigneten Vielzahl solcher Messpunkte. Die erfindungsgemäße Lösung folgt im Wesentlichen dem gleichen Grundprinzip, wie es aus der DE 10 2015 205 615 A1 bekannt ist.

**[0010]** Das aus der DE 10 2015 205 615 A1 bekannte Messsystem hat jedoch zumindest zwei wesentliche Nachteile. Zum einen werden aktive Infrarotlichtquellen als Marker verwendet. Solche aktiven Marker, welche in das von Hand geführte Messwerkzeug integriert sind, haben den Nachteil, dass sie aufgrund der von ihnen verursachten Wärmeent-

wicklung Materialausdehnungen verursachen, welche zu Messfehlern führen können. In der optischen Messtechnik sind derartige Messfehler keineswegs zu vernachlässigen. Zum anderen muss der Anwender bei dem aus der DE 10 2015 205 615 A1 bekannten System von Hand einen Knopf an einer Betätigungseinheit betätigen, um der Recheneinheit zu signalisieren, dass ein Messpunkt erfasst werden soll bzw. um einen momentan erfassten Messpunkt abzuspeichern. Da der Anwender hierzu zwangsläufig eine Kraft ausübt, deren Größe und Richtung unbekannt sind, kann es ohne weiteres zu einer Verformung, einem Verwackeln oder Verrutschen des Tastkopfs kommen. Weitere Verformungen können aufgrund der auf das Messwerkzeug einwirkenden Gewichtskraft oder aufgrund von Trägheits- oder Kontaktkräften, die auf den Tastkörper einwirken, auftreten. Dadurch ergeben sich Messfehler, welche sich nicht ohne weiteres ausgleichen lassen.

**[0011]** Auch bei einem von der Firma Optinav unter dem Namen „OptiTrace“ vertriebenen System (<http://optinav.pl/en/info/products/optitrace.html>, aufgerufen am 22.12.2015) ergeben sich ähnliche Probleme.

**[0012]** In stationären bzw. fix installierten Koordinatenmessgeräten werden oben genannte Probleme häufig mittels Extrasensoren gelöst, die in den Tastkopf des Koordinatenmessgeräts integriert sind. Ein Beispiel für ein solches Messsystem ist aus der WO 2006/114627 A1 bekannt. Hierbei ist der Tastkörper bzw. die Messspitze über Federn des Tastkopfes an die Pinole des Koordinatenmessgeräts gekoppelt. Mit einem separaten Messsystem wird die Bewegung des Tastkopfes relativ zur Pinole bestimmt. Derartige Tastköpfe werden auch als passiv messende Sensoren für Koordinatenmessgeräte bezeichnet. Ein weiteres Beispiel für ein ähnliches System ist aus der WO 2013/007285 A1 bekannt.

**[0013]** Eine ähnliche Messsonde mit einem darin integrierten Lastsensor, der die zwischen Tastkörper und Werkstück wirkende Kraft misst und die Messerfassung in Abhängigkeit des von dem Lastsensor erzeugten Signals steuert, ist aus der EP 1 984 695 B1 bekannt. Zwar könnten derartige Sensoren auch in handgeführten Messsystemen eingesetzt werden, allerdings würde dies die Gesamtkomplexität des Messsystems deutlich erhöhen. Insbesondere wären durch die Extrasensoren weitere aktive Komponenten in das Messsystem aufgenommen, so dass eine zeitliche Synchronisierung der Sensorsignale mit den Signalen des optischen Tracking-Systems erforderlich wäre.

**[0014]** Ein weiteres Beispiel für ein handgeführtes Koordinatenmessgerät ist aus der EP 0 703 517 B1 bekannt. Abgesehen von der relativ hohen Komplexität dieses Systems ist die mobile Einsatzfähigkeit

hier dadurch eingeschränkt, dass der Tastkopf über einen beweglich gelagerten Träger mit einer fix angebrachten Säule verbunden ist.

**[0015]** Aus der EP 2 172 735 B1, der DE 10 2008 049 751 A1 und der DE 100 66 470 B4 sind ferner mehrere Verfahren zum Einsatz in stationären bzw. fix installierten Koordinatenmessgeräten bekannt, bei denen durch eine geeignete Kalibrierung versucht wird, die durch die Gewichtskraft, Messkraft oder andere äußere Kräfte bewirkte Auslenkung des Tastkörpers des Koordinatenmessgeräts mit Hilfe einer entsprechenden Steuerung bzw. Positionsverstellung des Tastkörpers auszugleichen. Diese Verfahren sind in der bisherigen Form jedoch lediglich für stationäre bzw. fix installierte Koordinatenmessgeräte bekannt und geeignet. Entsprechende Lösungen für handgeführte Messsysteme existieren bisher nicht.

**[0016]** Vor diesem Hintergrund ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein optisches Messsystem der oben genannten Art bereitzustellen, welches im Gegensatz zu den oben genannten handgeführten Messsystemen aus dem Stand der Technik einfacher aufgebaut ist, möglichst ohne aktive Komponenten in dem Messwerkzeug auskommt und mit dem sich eine höhere Messgenauigkeit erzielen lässt.

**[0017]** Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung wird diese Aufgabe durch ein Messsystem der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass die Auswerte- und Steuereinheit dazu eingerichtet ist, aus der Position und Lage des optischen Markers eine Position des Tastkörpers für einen kraftfreien Zustand des Messwerkzeugs zu berechnen, eine Verformung des Messwerkzeugs aufgrund äußerer, auf das Messwerkzeug einwirkender mechanischer Belastung zu berechnen, und räumliche Positionskordinaten des Tastkörpers durch Superposition von Positionsänderungs-Komponenten, welche aufgrund der berechneten Verformung zustande kommen, und der Position des Tastkörpers im kraftfreien Zustand zu berechnen.

**[0018]** Die oben genannte Aufgabe wird ferner durch ein Messverfahren mit den folgenden Schritten gelöst:

- Aufnehmen von Bilddaten eines Messwerkzeugs, welches einen Tastkörper und einen optischen Marker aufweist;
- Auswerten der aufgenommenen Bilddaten;
- Bestimmen einer Position und Lage des optischen Markers anhand der ausgewerteten Bilddaten;
- Berechnen einer Position des Tastkörpers für einen kraftfreien Zustand des Messwerkzeugs

aus der Position und Lage des optischen Markers;

- Berechnen einer Verformung des Messwerkzeugs aufgrund äußerer, auf das Messwerkzeug einwirkender mechanischer Belastung; und

- Berechnen räumlicher Positionskordinaten des Tastkörpers durch Superposition von Positionsänderungs-Komponenten, welche aufgrund der berechneten Verformung zustande kommen, und der Position des Tastkörpers im kraftfreien Zustand.

**[0019]** Ferner wird die oben genannte Aufgabe durch ein Computerprogramm gelöst, das einen Programmcode aufweist, der dazu eingerichtet ist, bei Ausführungen auf einem Computer zur Steuerung des erfindungsgemäßen Messsystems, das erfindungsgemäße Verfahren auszuführen.

**[0020]** Es versteht sich, dass die nachfolgend erwähnten und/oder in den Patentansprüchen definierten Ausführungsbeispiele und Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung sich nicht nur auf das erfindungsgemäße Messsystem, sondern in äquivalenter Art und Weise auch auf das erfindungsgemäße Messverfahren und das erfindungsgemäße Computerprogramm beziehen.

**[0021]** Mit Hilfe der vorliegenden Erfindung lässt sich auch bei handgeführten Messsystemen der vorliegenden Art, bei denen ein mit Markern versehenes Messwerkzeug über ein optisches Tracking-System erfasst wird, die durch äußere Belastung bewirkte Verformung des Messwerkzeugs korrigieren. Die Korrektur erfolgt auf rechnerische Art und Weise innerhalb der Auswerte- und Steuereinheit. Aufgrund der rechnerischen Korrektur sind zusätzliche Bauteile für das Messsystem nicht zwingend notwendig. Das erfindungsgemäße Messsystem ist somit vergleichsweise günstig in der Herstellung.

**[0022]** Es sei darauf hingewiesen, dass das Messwerkzeug, welches in dem erfindungsgemäßen Messsystem zum Einsatz kommt, nicht nur von Hand geführt werden kann, sondern auch in eine Maschine, beispielsweise einen Roboter, eingespannt werden kann. Beispielsweise lässt sich das Messsystem auch in Werkstückbearbeitungsmaschinen einsetzen, wobei das Messwerkzeug in einer entsprechenden Einspannvorrichtung der Maschine eingespannt ist.

**[0023]** Unabhängig von der Art der Anwendung des erfindungsgemäßen Messsystems geschieht die Auswertung prinzipiell jeweils folgendermaßen: Die Kamera des Messsystems, welche grundsätzlich als einzelne Kamera ausgestaltet sein kann, vorzugsweise jedoch mehrerer Kameras aufweist, ist

dazu eingerichtet, ein Bild bzw. eine Bildsequenz aufzunehmen, die das Messwerkzeug und dessen optischen Marker aufweist. Um eine Bildauswertung gewährleisten zu können, sollte dabei zumindest der optische Marker im Bild sein. Das Messwerkzeug selbst muss nicht zwangsläufig vollständig im Bild sein. Die Auswerte- und Steuereinheit ist dazu eingerichtet, die von der Kamera aufgenommenen Bilddaten auszuwerten und daraus mit Hilfe des optischen Markers Positionsdaten des Markers zu bestimmen, welche die räumlichen Positionskordinaten des optischen Markers, vorzugsweise in Form von dreidimensionalen Koordinaten, beinhalten. Auf Basis dieser durch die optische Auswertung bestimmten Positionskordinaten des optischen Markers lassen sich letztendlich die Positionskordinaten des Tastkörpers bestimmen. Für den kraftfreien Zustand kann die Position und Lage des Tastkörpers relativ zu dem optischen Marker beispielsweise in einem vorgelagerten Kalibrierschritt bestimmt werden. Der Tastkörper und der optische Marker sind vorzugsweise über einen starren Körper miteinander verbunden. Ist die Position und Lage des optischen Markers bekannt, so lässt sich aus dieser also auch die Position des Tastkörpers des Messwerkzeugs berechnen, zumindest für den kraftfreien Zustand des Messwerkzeugs. Die aufgrund der äußeren, auf das Messwerkzeug einwirkenden mechanischen Belastung auftretenden Verformung des Messwerkzeugs lässt sich in diese Rechnung durch einfache Superposition mit einbeziehen, so dass die kraftfreie Position des Tastkörpers entsprechend korrigiert wird um die Positionsänderungs-Komponenten, welche aufgrund der genannten Verformung zustande kommen.

**[0024]** Zur Messung der auf das Messwerkzeug einwirkenden, äußeren mechanischen Belastung weist das Messsystem vorzugsweise eine Kraftmesseinrichtung auf. Diese Kraftmesseinrichtung kann auf vielfältige Art und Weise ausgeführt sein. Gemäß einer Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung weist die Kraftmesseinrichtung einen Kraftsensor auf, welcher in das Messwerkzeug integriert ist oder an diesem angeordnet ist. Ein solcher Kraftmessensor kann beispielsweise kapazitiv oder mit Hilfe eines Dehnmessstreifens ausgestaltet sein, wobei dies lediglich zwei von vielen Beispielen sind.

**[0025]** In einer alternativen Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung sind die Kamera und die Auswerte- und Steuereinheit Teil der Kraftmesseinrichtung, wobei die Auswerte- und Steuereinheit dazu eingerichtet ist, die auf das Messwerkzeug einwirkende, äußere mechanische Belastung anhand den von der Kamera aufgenommenen Bilddaten zu berechnen. Um eine solche optische Berechnung der Kraft gewährleisten zu können, sollte das Messwerkzeug entsprechend ausgestaltet sein. In einer zu dieser Patentanmeldung am selbigen Tag eingereichten parallelen Patentanmeldung des gleichen Anmelders

ist ein solches Messwerkzeug beschrieben, mit Hilfe dessen sich die auf das Messwerkzeug bei einer Messung einwirkende Messkraft berechnen lässt. Das Messwerkzeug besteht darin nämlich aus zwei verschiedenen Teilen, welche als starre Körper ausgestaltet sind und über ein Federelement miteinander verbunden sind. An beiden Teilen ist ein optischer Marker angeordnet, so dass sich über die Auswertung der von der Kamera aufgenommenen Bilddaten die durch die Messkraft verursachte relative Verschiebung beider Teile bestimmen lässt. Aus der relativen Verschiebung beider Teile des Messwerkzeugs lässt sich die Messkraft bestimmen, sofern die elastischen Eigenschaften (Steifigkeitseigenschaften) des Federelements bekannt sind.

**[0026]** Es versteht sich, dass in der Praxis eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten existiert, um die auf das Messwerkzeug während einer Messung einwirkenden äußeren Kräfte bestimmen zu können. Der Rahmen der vorliegenden Erfindung soll deshalb nicht auf die zuvor genannten Beispiele zur Kraftmessung beschränkt sein.

**[0027]** Gemäß einer Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung ist die Auswerte- und Steuereinheit dazu eingerichtet, die Verformung des Messwerkzeugs anhand eines vereinfachten mechanischen Ersatzmodells zu errechnen, indem das Messwerkzeug als mechanisches System modelliert ist, welches mindestens zwei starre Körper und einen ersten elastischen Knoten aufweist, der die zwei starren Körper miteinander verbindet.

**[0028]** Vorzugsweise ist der optische Marker in dem mechanischen Ersatzmodell als Teil des ersten starren Körpers und der Tastkörper als Teil des zweiten starren Körpers modelliert. Der elastische Knoten ist in dem mechanischen Ersatzmodell also vorzugsweise örtlich zwischen dem Tastkörper und dem optischen Marker angeordnet. Um die Komplexität des mechanischen Ersatzmodells möglichst gering zu halten, lassen sich beide starren Körper beispielsweise als im Wesentlichen stab- bzw. balkenförmige Körper modellieren.

**[0029]** Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung ist die Verformung in dem mechanischen Ersatzmodell als Translation und/oder Rotation der beiden starren Körper relativ zueinander modelliert und lässt sich mittels der Gleichung  $\vec{u} = \mathbf{N} + \vec{b}$  berechnen, wobei  $\vec{u}$  die Verformung und  $\vec{b}$  die äußere mechanische Belastung, jeweils in vektorieller Form, beschreiben und  $\mathbf{N}$  eine Nachgiebigkeitsmatrix ist, welche Nachgiebigkeitseigenschaften des elastischen Knotens infolge der äußeren mechanischen Belastung beschreibt.

**[0030]** Dieses mechanische Ersatzmodell wurde von Herrn Prof. Dr. Werner Lotze entwickelt und ist

beispielsweise aus der Veröffentlichung mit dem Titel „Messende Taster mit mehreren Freiheitsgraden“ von Werner Lotze, TR Technische Rundschau, Heft 29/30, 1993, S. 20-25 bekannt. Ähnliche Modelle werden auch bei den aus der DE 100 66 470 B4 und der EP 2 172 735 B1 bekannten Verfahren angewendet.

**[0031]** Das mechanische Ersatzmodell geht von einer strengen Linearität zwischen äußerer Belastung und Verformung des Messwerkzeugs aus. Der Zusammenhang zwischen dem Verformungsvektor  $\vec{u}$  und dem Belastungsvektor  $\vec{b}$  wird durch die Nachgiebigkeitsmatrix  $\mathbf{N}$  ausgedrückt. Die äußere Belastung  $\vec{b}$  wird gemäß diesem Ersatzmodell reduziert auf den Kraftvektor  $\vec{f}$  und den Momentenvektor  $\vec{m}$  im Zentrum des elastischen Knotens. Der Verformungsvektor  $\vec{u}$  besteht üblicherweise aus einem Translationsvektor  $\vec{v}_0$  und einem Rotationsvektor  $\vec{\delta}$  und wird mit nachfolgender Grundgleichung ausgedrückt.

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} \vec{v}_0 \\ \vec{\delta} \end{pmatrix} = \mathbf{N} * \vec{b} = \begin{pmatrix} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{21} & \mathbf{N}_{22} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \vec{f} \\ \vec{m} \end{pmatrix},$$

wobei  $\vec{v}_0$  und  $\vec{\delta}$  wie folgt definiert sind:

$$\vec{v}_0 = \begin{pmatrix} v_{0x} \\ v_{0y} \\ v_{0z} \end{pmatrix}$$

$$\vec{\delta} = \begin{pmatrix} \delta_{rx} \\ \delta_{ry} \\ \delta_{rz} \end{pmatrix}$$

**[0032]** Die Nachgiebigkeitsmatrix  $\mathbf{N}$  enthält als Hypermatrix die Nachgiebigkeitsmatrizen  $\mathbf{N}_{11}$ , ...,  $\mathbf{N}_{22}$ , deren Bedeutung aus der ausführlichen Form folgender Gleichung ersichtlich wird:

$$\vec{v}_0 = \mathbf{N}_{11} * \vec{f} + \mathbf{N}_{12} * \vec{m}$$

$$\vec{\delta} = \mathbf{N}_{21} * \vec{f} + \mathbf{N}_{22} * \vec{m}$$

**[0033]** In dieser Gleichung bedeuten die Untermatrizen  $\mathbf{N}_{ij}$  Folgendes:

- $\mathbf{N}_{11}$  Translation infolge des Kraftvektors  $\vec{f}$
- $\mathbf{N}_{12}$  Translation infolge des wirkenden Momentenvektors  $\vec{m}$
- $\mathbf{N}_{21}$  Rotation infolge des Kraftvektors  $\vec{f}$  und
- $\mathbf{N}_{22}$  Rotation infolge des wirkenden Momentenvektors  $\vec{m}$

**[0034]** Insgesamt wird die Verformung in dem mechanischen Ersatzmodell somit also als proportional zu den im Zentrum wirkenden Kräften und

Momenten beschrieben. Es gilt das Superpositionsprinzip. Der Verformungsvektor  $\vec{u}$  besteht im allgemeinen Fall aus Translations- und Rotationskomponenten. Je nach Vereinfachung können jedoch auch die Rotationskomponenten  $\vec{\delta}$  oder die Translationskomponenten  $\vec{v}_0$  weggelassen werden. Allgemein wird die Translation wie auch die Rotation jeweils einerseits infolge der wirkenden Kräfte und andererseits infolge der wirkenden Momente beschrieben.

**[0035]** Das oben genannte Modell lässt sich zur Lösung des vorliegenden Problems der Berechnung der Verformung aufgrund äußerer Belastung auf das Messwerkzeug relativ gut anwenden. Aufgrund der relativ geringen Komplexität des mechanischen Ersatzmodells bleibt der Rechenaufwand überschaubar.

**[0036]** Bei Anwendung des oben genannten mechanischen Ersatzmodells werden die räumlichen Positionskoordinaten des Tastkörpers vorzugsweise mittels folgender Gleichung berechnet:

$$\vec{p} = \vec{p}_s + M_s * (\vec{p}_{N1} + f(\vec{u}, \vec{t}_{N1}));$$

$$\text{mit } \vec{u} = \begin{pmatrix} v_{0x} \\ v_{0y} \\ v_{0z} \\ \delta_{rx} \\ \delta_{ry} \\ \delta_{rz} \end{pmatrix};$$

und

$$f(\vec{u}, \vec{t}_{N1}) = R_z(\delta_{rz}) * R_y(\delta_{ry}) * R_x(\delta_{rx}) * \vec{t}_{N1} + \begin{pmatrix} v_{0x} \\ v_{0y} \\ v_{0z} \end{pmatrix};$$

wobei  $\vec{p}$  die räumlichen Positionskoordinaten des Tastkörpers und  $\vec{p}_s$  die räumlichen Positionskoordinaten des optischen Markers, jeweils in vektorieller Form in einem ortsfesten Inertialsystem, beschreiben, wobei  $M_s$  eine Transformationsmatrix zur Transformation von Vektoren aus einem zu dem Messwerkzeug körperfesten Koordinatensystem in das ortsfeste Inertialsystem ist, wobei  $\vec{p}_{N1}$  räumliche Positionskoordinaten des elastischen Knotens in vektorieller Form in dem körperfesten Koordinatensystem beschreibt, wobei  $\vec{t}_{N1}$  einen Vektor von dem elastischen Knoten zu dem Tastkörper in dem körperfesten Koordinatensystem beschreibt, wobei  $v_{0x}$ ,  $v_{0y}$ ,  $v_{0z}$  Translationskomponenten des Verformungsvektors  $\vec{u}$  und  $\delta_{rx}$ ,  $\delta_{ry}$ ,  $\delta_{rz}$  Rotationskomponenten des Verformungsvektors  $\vec{u}$  sind, und wobei  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  Rotationsmatrizen zur Drehung der Rotationskompo-

nenten  $\delta_{rx}$ ,  $\delta_{ry}$ ,  $\delta_{rz}$  im euklidischen Raum beschreiben.

**[0037]** Bei der zuletzt erwähnten Ausgestaltung ist der Ursprung des ortsfesten Inertialsystems vorzugsweise im Zentrum des optischen Sensors der Kamera bzw. bei zwei Kameras in der Mitte zwischen beiden Kameras gewählt. Der Ursprung des körperfesten Koordinatensystems, welches mit dem Messwerkzeug mitbewegt wird, kann, wie weiter unten noch näher erläutert wird, beispielsweise im Zentrum des optischen Markers gewählt werden.

**[0038]** Die Translations- und Rotationskomponenten  $v_{0x}$ ,  $v_{0y}$ ,  $v_{0z}$ ,  $\delta_{rx}$ ,  $\delta_{ry}$ ,  $\delta_{rz}$  beschreiben jeweils die Translations- und Rotationskomponenten entlang der drei orthogonalen Hauptachsen des körperfesten Koordinatensystems. Die Rotationsmatrizen  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  werden üblicherweise wie folgt definiert:

$$R_x(\delta_{rx}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\delta_{rx}) & -\sin(\delta_{rx}) \\ 0 & \sin(\delta_{rx}) & \cos(\delta_{rx}) \end{pmatrix}$$

$$R_y(\delta_{ry}) = \begin{pmatrix} \cos(\delta_{ry}) & 0 & \sin(\delta_{ry}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\delta_{ry}) & 0 & \cos(\delta_{ry}) \end{pmatrix}$$

$$R_z(\delta_{rz}) = \begin{pmatrix} \cos(\delta_{rz}) & -\sin(\delta_{rz}) & 0 \\ \sin(\delta_{rz}) & \cos(\delta_{rz}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

**[0039]** Es versteht sich, dass die oben genannten Rotationsmatrizen  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  auch als Projektionsmatrizen definiert werden können, wie sie üblicherweise im amerikanischen Sprachraum verwendet werden. Das Ergebnis bleibt jedoch das Gleiche. Ebenso ist es möglich diese als 4 x 4 Matrix zu definieren, oder aber diese zu vereinfachen. Durch Annahme kleiner Winkel, welche für den vorliegenden Fall durchaus sinnvoll ist, lassen sich die einzelnen Kosinus-Komponenten in den oben genannten Matrizen durch 1 ersetzen und die Sinus-Komponenten durch den jeweiligen Winkel  $\delta$ , ersetzen.

**[0040]** Die äußere, auf das Messwerkzeug einwirkende mechanische Belastung, welche die Auswerte- und Steuereinheit zur Berechnung der Verformung des Messwerkzeug gemäß oben genanntem mechanischen Ersatzmodell berücksichtigt, umfasst vorzugsweise die auf das Messwerkzeug einwirkende Gewichtskraft, eine auf das Messwerkzeug einwirkende Trägheitskraft, und/oder eine auf den Tastkörper einwirkende Kontaktkraft, welche beispielsweise bei einem Messvorgang, bei dem der Tastkörper auf ein Messobjekt gedrückt wird, entsteht.

**[0041]** Es versteht sich, dass je nach Grad der gewünschten Genauigkeit eine oder mehrere der zuvor genannten Kräfte unberücksichtigt bleiben kann. Die zu berücksichtigenden äußeren Kräfte können gemäß dem Superpositionsprinzip einander überlagert werden. Die Gewichtskraft lässt sich durch vorherige Messung, beispielsweise durch Wiegen oder mit Hilfe von FEM Methoden, im Vorwege zumindest betragsmäßig bestimmen. Die auf den Tastkörper während einer Messung wirkende Kontaktkraft lässt sich, wie oben bereits erwähnt, mit Hilfe einer entsprechenden Kraftmesseinrichtung bestimmen. Die Beschleunigung für die Bestimmung der Trägheitskraft ( $F = m \cdot a$ ) lässt sich ebenfalls anhand eines speziellen Sensors bestimmen, beispielsweise anhand eines Beschleunigungssensors, der in das Messwerkzeug integriert ist. Alternativ kann die Beschleunigung auch aus dem optischen Tracking-System berechnet werden. Dazu wird für jede Einzelkomponente mit zu berücksichtigender Masse der Schwerpunkt berechnet oder gemessen und im körperfesten Koordinatensystem des Messwerkzeugs gespeichert. Mit  $\bar{p}_s$  und  $M_s$  kann die Position dieser Schwerpunkte berechnet werden. Die Beschleunigung der Einzelkomponente ergibt sich dann in guter Näherung aus der 2. Ableitung der so berechneten Position über der Zeit.

**[0042]** Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung weist der optische Marker zumindest drei, an dem Messwerkzeug verteilt angeordnete, optische Markerelemente auf.

**[0043]** Wenngleich grundsätzlich ein Markerelement ausreichend ist, lässt sich anhand dreier, verteilt angeordneter Markerelemente die Position und Lage noch einfacher bestimmen als anhand nur eines optischen Markerelementes. Die einzelnen Markerelemente können somit auch vergleichsweise einfacher ausgestaltet sein.

**[0044]** Gemäß einer weiteren Ausgestaltung sind die Markerelemente passive, optische Markerelemente, die in unverformten Zustand des Messwerkzeugs in einer gemeinsamen Ebene angeordnet sind.

**[0045]** Dies hat den Vorteil, dass passive Markerelemente keinen Wärmeeintrag in das Messwerkzeug verursachen, der die Messgenauigkeit negativ beeinflussen könnte. Im Übrigen hat dies im Vergleich zu aktiven Markerelementen auch Vorteile bezüglich der Herstellkosten des Messwerkzeugs.

**[0046]** Der elastische Knoten, welcher in oben genanntem, vereinfachten mechanischen Ersatzmodell verwendet wird, wird vorzugsweise an der weichsten bzw. elastischsten Stelle des Messwerkzeugs angeordnet. Je nach gewünschter Genauigkeit kann in dem genannten mechanischen Ersatzmodell

auch mehr als nur ein elastischer Knoten modelliert werden. Dies erhöht neben der Genauigkeit lediglich den Rechenaufwand, ändert an der prinzipiellen Berechnung der Verformung bzw. der prinzipiellen Berechnung der letztendlichen räumlichen Positionskordinaten des Tastkörpers allerdings nichts.

**[0047]** Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung ist das Messwerkzeug in dem mechanischen Ersatzmodell als mechanisches System modelliert, welches einen ersten, einen zweiten und einen dritten starren Körper sowie einen ersten und einen zweiten elastischen Knoten aufweist, wobei der erste elastische Knoten den ersten und den zweiten starren Körper miteinander verbindet und der zweite elastische Knoten den zweiten und den dritten starren Körper miteinander verbindet, und wobei ein erstes der drei optischen Markerelemente als Teil des ersten starren Körpers, ein zweites der drei optischen Markerelemente als Teil des zweiten starren Körpers und der Tastkörper als Teil des dritten starren Körpers modelliert ist.

**[0048]** Dies hat den Vorteil, dass auch eine Verformung des Messwerkzeugs innerhalb des Markerelements ausgeglichen werden kann. Dies erlaubt eine weitere Erhöhung der Messgenauigkeit.

**[0049]** Je nach Anwendung kann der Tastkörper als Tastkugel oder Tastspitze ausgestaltet sein. Bei einem Einsatz des Messsystems innerhalb einer Werkzeugmaschine kann der Tastkörper beispielsweise auch als ein Werkzeugkopf ausgestaltet sein.

**[0050]** Es versteht sich, dass die vorstehend genannten und die nachstehend noch zu erläuternden Merkmale nicht nur in der jeweils angegebenen Kombination, sondern auch in anderen Kombinationen oder in Alleinstellung verwendbar sind, ohne den Rahmen der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

**[0051]** Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt und werden in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigen:

**Fig. 1** eine vereinfachte, schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Messsystems;

**Fig. 2** eine schematische Darstellung zur Veranschaulichung einer Verformung eines zu dem Messsystem gehörenden Messwerkzeugs aufgrund der auf dieses wirkenden Gewichtskraft;

**Fig. 3** eine schematische Darstellung zur Veranschaulichung eines vereinfachten mechanischen Ersatzmodells, mit Hilfe dessen das zu dem Messsystem gehörende Messwerkzeug gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung modelliert wird;



**Fig. 4** eine Prinzipdarstellung eines ersten Teils der auf das Messwerkzeug wirkenden Belastung sowie die gemäß dem mechanischen Ersatzmodell angenommene, dadurch entstehende Verformung;

**Fig. 5** eine Prinzipdarstellung eines zweiten Teils der auf das Messwerkzeug wirkenden Belastung sowie die gemäß dem mechanischen Ersatzmodell angenommene, dadurch entstehende Verformung;

**Fig. 6** eine vereinfachte, schematische Darstellung zur Veranschaulichung eines ersten beispielhaften Kalibriervorgangs; und

**Fig. 7** eine vereinfachte, schematische Darstellung zur Veranschaulichung eines zweiten beispielhaften Kalibriervorgangs.

**[0052]** **Fig. 1** zeigt eine vereinfachte Darstellung eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Messsystems. Das Messsystem ist darin in seiner Gesamtheit mit der Bezugsziffer 100 gekennzeichnet. Teil des Messsystems 100 ist ein Messwerkzeug, welches mit der Bezugsziffer 10 gekennzeichnet ist.

**[0053]** Das Messsystem umfasst neben dem Messwerkzeug 10 ein Kamerasystem 12 sowie eine Auswerte- und Steuereinheit 14.

**[0054]** Das Messwerkzeug 10 dient zur taktilen Abtastung eines Werkstücks 20. Diese Abtastung kann manuell, also handgeführt, oder automatisch mit Hilfe einer geeigneten Maschine, z.B. einem Roboter erfolgen. Während der Abtastung des Werkstücks 20 wird die Position des Messwerkzeugs 10 mit Hilfe des aus Kamerasystem 12 und Auswerte- und Steuereinheit 14 bestehenden Tracking-Systems erfasst. Die Positionserfassung erfolgt vorzugsweise dauerhaft bzw. mit einer Abtastfrequenz, welche vorzugsweise 200 Hz oder größer ist. Die Positionserfassung erfolgt anhand der von dem Kamerasystem 12 aufgenommenen Kamerabilder innerhalb der Auswerte- und Steuereinheit 14 mit Hilfe bekannter Auswertungsalgorithmen, in denen üblicherweise Triangulationsverfahren angewendet werden. Die Detektierung des Messwerkzeugs 10 innerhalb der Kamerabilder wird vorliegend durch mehrere optische Markerelemente 22a-22c vereinfacht, die an dem Messwerkzeug 10 zu deren Identifikation, Positions- und Lagebestimmung angebracht sind. Die Markerelemente 22a-22c werden vorliegend gesamthaft als optischer Marker 24 bezeichnet.

**[0055]** Bei dem Kamerasystem 12 handelt es sich in dem vorliegenden Ausführungsbeispiel um ein aus drei Kameras 26a-26c bestehendes System. Grundsätzlich würde jedoch auch eine einzige Kamera genügen, um das hier beschriebene Verfahren aus-

zuführen. Es versteht sich jedoch, dass auch mehr als drei Kameras eingesetzt werden können.

**[0056]** Bei der Auswerte- und Steuereinheit 14 handelt es sich vorzugsweise um eine Rechneinheit, beispielsweise einen Computer, auf dem eine entsprechende Software installiert ist, mittels dessen die von dem Kamerasystem 12 gelieferten Bilder in entsprechender Art und Weise ausgewertet werden können, um die Position des Messwerkzeugs 10 als Koordinaten in einem beliebigen, ortsfesten Koordinatensystem ermitteln zu können.

**[0057]** Die Verbindung 27 zwischen Kamerasystem 12 und Auswerte- und Steuereinheit 14 kann, wie in **Fig. 1** dargestellt, über ein entsprechendes Kabel erfolgen. Alternativ dazu kann das Kamerasystem 12 jedoch auch über eine kabellose Verbindung mit der Auswerte- und Steuereinheit 14 verbunden sein. Ebenso wäre es möglich, das Kamerasystem 12 und die Auswerte- und Steuereinheit 14 in einem gemeinsamen Gehäuse unterzubringen, in dem die Auswerte- und Steuereinheit 14 in Form eines Prozessor-Chips implementiert ist. Des Weiteren kann ein Bildschirm und eine entsprechende Eingabeeinheit (z.B. eine Tastatur) zu dem Messsystem 10 gehören, um die Messergebnisse entsprechend grafisch darzustellen bzw. um Steuerbefehle eingeben zu können.

**[0058]** Das Messwerkzeug 10 weist neben dem optischen Marker 24 (Markerelemente 22a-22c) einen Tastkörper 28 auf, welcher in dem vorliegenden Ausführungsbeispiel als Tastkugel ausgestaltet ist. Der Tastkörper 28 muss jedoch nicht zwingend notwendigerweise kugelförmig ausgestaltet sein. Je nach Messaufgabe kann der Tastkörper 28 auch beispielsweise als Messspitze ausgestaltet sein.

**[0059]** Der Tastkörper 28 ist über einen starren Körper 30 mit dem optischen Marker 24 verbunden. Der starre Körper 30 ist vorliegend im Wesentlichen stabförmig ausgestaltet. Im Bereich eines ersten Endes des starren Körpers 30 sind die Markerelemente 22a-22c angeordnet. An dem gegenüberliegenden zweiten Ende des starren Körpers 30 ist der Tastkörper 28 angeordnet. Der starre Körper 30 dient jedoch nicht nur als starre Verbindung zwischen den optischen Marker 24 und dem Tastkörper 28, sondern auch als Griffteil, an dem der Anwender das Messwerkzeug 10 von Hand festhalten kann. Grundsätzlich lässt sich dieses Griffteil auch in eine Maschine einspannen. Grundsätzlich ist es ebenso denkbar, dass unterschiedliche Arten von Tastkörpern 28 über einen entsprechenden Adapter und Verbindungsmechanismus mit dem starren Körper 30 verbunden werden.

**[0060]** Die Markerelemente 22a-22c des optischen Markers 24 sind in **Fig. 1** vereinfacht als kreisförmige

Elemente dargestellt. Hierbei handelt es sich jedoch lediglich um ein Beispiel der Ausgestaltung der Markerelemente 22a-22c. Grundsätzlich können diese beliebige Formen aufweisen, welche sich mit Hilfe des Kamerasystems 12 eindeutig als Marker identifizieren lassen. Es handelt sich jedoch vorzugsweise um passive Markerelemente.

**[0061]** Mit Hilfe des optischen Markers 24 lässt sich anhand der Kamerabilder die Position und Lage des Bereichs des starren Körpers 30 bestimmen, an dem die Markerelemente 22a-22c des optischen Markers 24 angeordnet sind. Mit Hilfe einer geeigneten, zuvor vorgenommenen Kalibrierung des Messwerkzeugs 10 ist bei bekannter Position und Lage des optischen Markers 24 somit auch die Position und Lage des Tastkörpers 28 bekannt. Diese Position und Lage des Tastkörpers 28 wird vorzugsweise mit Hilfe von räumlichen Positionskoordinaten ausgedrückt, wobei die Lage vorzugsweise mit Hilfe einer 3x3 Matrix ausgedrückt wird, die die Orientierung des Messwerkzeugs 10 im Raum beschreibt.

**[0062]** Die Positionskoordinaten werden vorzugsweise in einem ortsfesten Koordinatensystem ausgedrückt, dessen Ursprung im Zentrum des Kamerasystems 12 liegt. In **Fig. 1** ist die Position des Markers 24 bzw. die Position des ersten Markerelements 22a mit Hilfe eines Vektors  $\vec{p}_s$  angedeutet und die Position des Tastkörpers 28 mit Hilfe eines Vektors  $\vec{p}$  angedeutet.

**[0063]** Die Genauigkeit eines Messsystems 100, wie es in **Fig. 1** dargestellt ist, wird unter anderem durch die elastische Verformung des Messwerkzeugs 10 beeinträchtigt, welche durch äußere mechanische Belastung des Messwerkzeugs 10 verursacht wird. **Fig. 2** zeigt rein schematisch eine mögliche Verformung des Messwerkzeugs 10 aufgrund der Gewichtskraft  $G$ . In der in **Fig. 2** dargestellten Situation wird das Messwerkzeug 10 beispielsweise an der mit der Bezugsziffer 16 gekennzeichneten Stelle von Hand festgehalten. Da es sich in der Praxis bei dem Messwerkzeug 10 nicht um einen, aus mechanischer Sicht idealen, starren Körper handelt, verbiegt sich das Messwerkzeug 10 aufgrund dieser Belastung etwas. Diese Verformung ist in **Fig. 2** übertrieben dargestellt.

**[0064]** Zu der äußeren mechanischen Belastung, welche auf das Messwerkzeug 10 üblicherweise einwirkt, gehören neben der Gewichtskraft  $G$  beispielsweise die Kräfte, welche der Nutzer durch Halten des Messwerkzeugs 10 verursacht. Des Weiteren entstehend bei der Bewegung des Messwerkzeugs 10 Trägheitskräfte. Nicht zu vergessen ist die Antastkraft, die üblicherweise während eines Messvorgangs entsteht, bei der das Messwerkzeug 10 mit seinem Tastkörper 28 auf das zu vermessende Werkstück 20 gedrückt wird. Ist der Tastkörper 28

als Werkzeugkopf ausgestaltet sollte eine entsprechende Kontaktkraft berücksichtigt werden, wie sie beispielsweise durch ein Werkzeug an einem Roboter verursacht werden kann.

**[0065]** Die hier vorgestellte, erfindungsgemäße Lösung zeigt ein Modell auf, mit Hilfe dessen eine durch derartige mechanische Belastungen verursachte Verformung des Messwerkzeugs 10 in einem solchen Messsystem 100 ausgeglichen bzw. korrigiert werden können. Diese Korrektur erfolgt auf rechnerische Art und Weise innerhalb der Auswerte- und Steuereinheit 14. Die Auswerte- und Steuereinheit 14 ist erfindungsgemäß dazu eingerichtet, die Verformung des Messwerkzeugs 10 aufgrund äußerer, auf das Messwerkzeug 10 einwirkender mechanischer Belastung zu berechnen, und basierend auf den räumlichen Positionskoordinaten des Markers 24 und der berechneten Verformung die räumlichen Positionskoordinaten des Tastkörpers 28 zu bestimmen.

**[0066]** In anderen Worten und unter Berücksichtigung der in **Fig. 1** eingezeichneten Vektoren bedeutet dies Folgendes: Ziel der von der Auswerte- und Steuereinheit 14 ausgeführten Auswertung ist die Bestimmung des Vektors  $\vec{p}$  also der Koordinaten des Tastkörpers 28 in dem ortsfesten Koordinatensystem, und zwar unter Berücksichtigung der Verformung des Messwerkzeugs 10. Hierzu werden zunächst die Positionskoordinaten des Markers 24 bestimmt. Die Positionskoordinaten des Markers 24 bzw. des ersten Markerelements 22a sind in **Fig. 1** mit Hilfe des Vektors  $\vec{p}_s$  dargestellt. Des Weiteren wird die Verformung des Messwerkzeugs 10 berechnet, so dass auf Basis der Verformung des Messwerkzeugs 10 und dem Vektor oder Vektor  $\vec{p}$  berechnet werden kann.

**[0067]** Im Detail erfolgt die Berechnung des Vektors  $\vec{p}$  erfindungsgemäß wie folgt: Gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird die Verformung des Messwerkzeugs 10 anhand eines vereinfachten mechanischen Ersatzmodells berechnet, in dem das Messwerkzeug als mechanisches System modelliert ist, welches aus zumindest zwei starren Körpern und einem zwischen diesen befindlichen, elastischen Knoten besteht, der die zumindest zwei starren Körper miteinander verbindet. **Fig. 3** zeigt ein solches mechanisches Ersatzmodell für das Messwerkzeug 10 in schematischer Form.

**[0068]** In dem in **Fig. 3** gezeigten Beispiel ist das Messwerkzeug 10 als ein aus zwei starren Einzelkörpern 36, 38 bestehender Körper modelliert, wobei die beiden starren Einzelkörper 36, 38 in dem Modell über einen elastischen Knoten  $N1$  verbunden sind. Gemäß diesem Modell verhalten sich die Einzelkörper 36, 38 als ideale starre Körper. Der elastische

Knoten erlaubt dagegen eine Bewegung der beiden starren Körper 36, 38 relativ zueinander. Diese Bewegung wird gemäß dem von Prof. Dr. Werner Lotze bekannten Modell als einander überlagerte translatorische und rotatorische Relativbewegung der beiden Körper 36, 38 beschrieben (siehe „Messende Taster mit mehreren Freiheitsgraden“ von Werner Lotze, TR Technische Rundschau, Heft 29/30, 1993, S. 20-25 und DE 100 66 470 B4).

**[0069]** Es versteht sich, dass **Fig. 3** den einfachsten Fall eines solchen mechanischen Ersatzmodells veranschaulicht, bei dem lediglich ein elastischer Knoten  $N_1$  verwendet wird, der zwei starre Körper 36, 38 miteinander verbindet. Zur Steigerung der Genauigkeit der vorliegend vorgestellten Berechnung lassen sich selbstverständlich auch mehrere solcher elastischer Knoten in dem Modell aufnehmen, um das Messwerkzeug 10 nicht nur aus zwei starren Körpern, sondern aus mehreren starren Körpern bestehend zu modellieren. Wenn beispielsweise die Verbindungen zwischen den einzelnen Markerelementen 22a, 22b, 22c unterschiedlich steif ausgeführt sein sollten und daher eine Verschiebung und/oder Verkippung der einzelnen Markerelemente 22a-22d berücksichtigt werden muss, so können in dem mechanischen Ersatzmodell weitere elastische Knoten vorgesehen werden, welche zwischen den Markerelementen 22a-22c angeordnet werden. Beispielsweise kann für jedes der drei Markerelemente 22a-22c ein eigener Schwerpunkt, ein eigenes Gewicht und eine eigene Nachgiebigkeit des jeweiligen elastischen Knotens in das Modell aufgenommen werden. Die weitere Erläuterung erfolgt zur Vereinfachung jedoch anhand des in **Fig. 3** dargestellten Modells mit nur einem elastischen Knoten  $N_1$ .

**[0070]** Wie bereits erwähnt, geht das in diesem Ausführungsbeispiel verwendete mechanische Ersatzmodell von einer Verformung des elastischen Knotens  $N_1$  aus, welche streng linear und abhängig von der äußeren Belastung ist. Diese Verformung ist proportional zu den im elastischen Knoten  $N_1$  wirkenden Kräften und Momenten. Es gilt das Superpositionsprinzip. Die äußere Belastung  $\vec{b}$  wird reduziert auf den Kraftvektor  $\vec{f}$  und den Momentenvektor  $\vec{m}$  welche im elastischen Knoten  $N_1$  wirken. Der Verformungsvektor  $\vec{u}$  besteht aus einem Translationsvektor  $\vec{v}_0$ , welcher die Translationskomponenten  $v_{0x}$ ,  $v_{0y}$ ,  $v_{0z}$  enthält, und einem Rotationsvektor  $\vec{\delta}$ , welcher die Rotationskomponenten  $\delta_{rx}$ ,  $\delta_{ry}$ ,  $\delta_{rz}$  enthält. Für den Verformungsvektor  $\vec{u}$  gilt:

$$\vec{u} = N * \vec{b} = \begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \vec{f} \\ \vec{m} \end{pmatrix} \quad (1)$$

**[0071]** In Gleichung 1 bezeichnet N eine Nachgiebigkeitsmatrix, welche die Nachgiebigkeitseigen-

schaften des elastischen Knotens  $N_1$  beschreibt. Diese Nachgiebigkeitsmatrix N enthält als Hypermatrix die Nachgiebigkeitsmatrizen  $N_{11}$ , ...,  $N_{22}$ , wobei  $N_{11}$  die Translation des elastischen Knotens infolge des Kraftvektors  $f$  beschreibt,  $N_{12}$  die Translation infolge des im elastischen Knoten wirkenden Momentenvektors  $m$ ,  $N_{21}$  die Rotation infolge des im elastischen Knoten wirkenden Kraftvektors  $f$  beschreibt, und  $N_{22}$  die Rotation infolge des im elastischen Knoten wirkenden Momentenvektors  $m$  beschreibt. Die translatorische Verformung des elastischen Knotens  $N_1$  ergibt sich somit als

$$\vec{v}_0 = N_{11} * \vec{f} + N_{22} * \vec{m} \quad (2)$$

**[0072]** Die rotatorische Verformung des elastischen Knoten  $N_1$  ergibt sich als

$$\vec{\delta} = N_{21} * \vec{f} + N_{22} * \vec{m} \quad (3)$$

**[0073]** Der Vektor  $\vec{p} = \vec{p}_s + M_s * (\vec{p}_{N1} + f(\vec{u}, \vec{t}_{N1}))$ ; (siehe **Fig. 1**) lässt sich mit Hilfe dieses mechanischen Ersatzmodells somit mit folgender Formel berechnen:

$$\vec{p} = \vec{p}_s + M_s * (\vec{p}_{N1} + f(\vec{u}, \vec{t}_{N1})); \quad (4)$$

$$\text{mit } \vec{u} = \begin{pmatrix} v_{0x} \\ v_{0y} \\ v_{0z} \\ \delta_{rx} \\ \delta_{ry} \\ \delta_{rz} \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$f(\vec{u}, \vec{t}_{N1}) = R_z(\delta_{rz}) * R_y(\delta_{ry}) * R_x(\delta_{rx}) * \vec{t}_{N1} + \begin{pmatrix} v_{0x} \\ v_{0y} \\ v_{0z} \end{pmatrix} \quad (6)$$

wobei  $\vec{p}$  die räumlichen Positionskoordinaten des Tastkörpers 28 und  $\vec{p}$  die räumlichen Positionskoordinaten des optischen Markers 24 bzw. 22a, jeweils in vektorieller Form in dem ortsfesten Inertialsystem (siehe **Fig. 1**) beschreiben, und wobei  $M_s$  eine Transformationsmatrix ist, welche zur Transformation der übrigen Vektoren in oben genannter Gleichung aus einem zu dem Messwerkzeug 10 körperfesten Koordinatensystem in das ortsfeste Inertialsystem verwendet wird. Die übrigen Komponenten der oben genannten Gleichung werden nämlich vorzugsweise in einem ortsfesten Koordinatensystem  $x', y', z'$  ausgedrückt, welches vorzugsweise in das Zentrum des ersten Markerelements 22a gelegt wird. Bei  $\vec{p}_{N1}$  handelt es sich um die räumlichen Positionskoordinaten des elastischen Knotens in vektorieller Form in dem körperfesten Koordinatensystem  $x', y', z'$ . Bei  $\vec{t}_{N1}$

handelt es sich um einen Vektor von dem elastischen Knoten  $N_1$  zu dem Tastkörper 28 in besagtem körperfesten Koordinatensystem.

**[0074]** Die einzelnen Komponenten der Gleichungen (4) bis (6) sind in den **Fig. 4** und **5** zur Veranschaulichung nochmals einzeln dargestellt, wobei **Fig. 4** die Verformung in Form der translatorischen Verschiebung  $\vec{v}_0$  zeigt und **Fig. 5** die rotatorische Verkippung  $\vec{\delta}$  veranschaulicht, welche in dem hier vorgestellten Modell gemäß dem Superpositionsprinzip einander überlagert werden.  $N_1$  deutet, wie bereits erwähnt, den Ort des elastischen Knotens an. Dieser wird vorzugsweise empirisch aus einer FEM-Berechnung oder einer Kalibrierrechnung bestimmt.  $\vec{p}_{N1}$  deutet den Vektor vom Mittelpunkt des körperfesten Koordinatensystems zum elastischen Knoten  $N_1$  an.  $G_S$  deutet die Gewichtskraft des Werkzeugs als Vektor mit drei Komponenten an. Dieser Vektor  $G_S$  wird vorzugsweise ebenfalls im körperfesten Koordinatensystem  $x', y', z'$  ausgedrückt. Man erhält ihn beispielsweise aus einer FEM-Berechnung, durch Wiegen oder durch Benutzereingabe.  $M_S$  ist, wie bereits erwähnt, die Transformationsmatrix um Transformation aus dem körperfesten Koordinatensystem  $x', y', z'$  in das ortsfeste Inertialsystem  $x, y, z$ . Diese erhält man durch die Auswertung des optischen Tracking-Systems bestehend aus Marker 24, Kamera 12 und Auswerte- und Steuereinheit 14.  $\vec{p}_s$  (siehe **Fig. 1**) deutet die Position des optischen Markers 24 bzw. des ersten Markerelements 22a im Inertialsystem an. Auch diesen Vektor erhält man durch Auswertung des optischen Tracking-Systems.  $\vec{f}$  (siehe **Fig. 5**) deutet den Vektor vom körperfesten Koordinatensystem  $x', y', z'$  zum Mittelpunkt des Tastkörpers 28 an.

**[0075]** Dieser Vektor  $\vec{f}$  ist das Ergebnis der vorliegenden Korrekturrechnung aufgrund Verformung des Messwerkzeugs 10.  $\vec{t}_{N1}$  deutet den Vektor vom elastischen Knoten  $N_1$  zum Punkt des Tastkörpers 28 an. Auch dieser ist im körperfesten Koordinatensystem  $x', y', z'$  ausgedrückt. Man erhält ihn durch eine Kalibrierrechnung, welche weiter unten im Detail vorgestellt ist.  $\vec{s}$  deutet den Schwerpunktvektor relativ zum elastischen Knoten  $N_1$  an, ebenfalls im körperfesten Koordinatensystem  $x', y', z'$  ausgedrückt. Die Position des Schwerpunktes wird vorzugsweise mit Hilfe eines FEM-Modells ermittelt. Alternativ dazu kann die Position des Schwerpunkts mit Hilfe einer Wippe gemessen werden.  $\vec{f}$  deutet den Kraftvektor im körperfesten Koordinatensystem  $x', y', z'$  an. Ein Beispiel für diesen Kraftvektor  $\vec{f}$  ist die Gewichtskraft  $G_S$  vektoriell ausgedrückt.  $\vec{v}_0$  deutet die translatorische Verschiebung infolge der äußeren Belastung des Messwerkzeugs 10 an (siehe **Fig. 4**).  $\vec{\delta}$  deutet die rotatorische Verkippung infolge der äußeren Belastung des Messwerkzeugs 10 an (siehe **Fig. 5**).

**[0076]** Bei den in oben genannter Gleichung 6 verwendeten Komponenten  $R_x, R_y, R_z$  handelt es sich um Rotationsmatrizen zur Drehung der Rotationskomponenten  $\delta_{rx}, \delta_{ry}, \delta_{rz}$  im euklidischen Raum. Diese können beispielsweise wie folgt ausgedrückt werden

$$R_x(\delta_{rx}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\delta_{rx}) & -\sin(\delta_{rx}) \\ 0 & \sin(\delta_{rx}) & \cos(\delta_{rx}) \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$R_y(\delta_{ry}) = \begin{pmatrix} \cos(\delta_{ry}) & 0 & \sin(\delta_{ry}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\delta_{ry}) & 0 & \cos(\delta_{ry}) \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$R_z(\delta_{rz}) = \begin{pmatrix} \cos(\delta_{rz}) & -\sin(\delta_{rz}) & 0 \\ \sin(\delta_{rz}) & \cos(\delta_{rz}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

**[0077]** Es versteht sich, dass diese Drehmatrizen mathematisch auch anders ausgedrückt werden können, was insbesondere im amerikanischen Sprachraum häufig der Fall ist. Ebenso können sie, wie eingangs erwähnt, für kleine Winkel vereinfacht werden.

**[0078]** Für die oben genannte Korrekturrechnung muss also entweder die Nachgiebigkeitsmatrix  $N$  in den Koordinaten des Inertialsystems  $x, y, z$  ausgedrückt werden oder der Kraftvektor  $\vec{f}$  in das körperfeste Koordinatensystem  $x', y', z'$  transformiert werden. Als Beispiel wird nachfolgend zur Vereinfachung lediglich die Gravitationskraft  $G$  berücksichtigt. Der Gravitationsvektor  $\vec{g}$  in Koordinaten des körperfesten Koordinatensystems  $x', y', z'$  und die Masse  $m_S = |G_S|$  ergeben also den Kraftvektor  $\vec{f}$  im körperfesten Koordinatensystem  $x', y', z'$ :

$$\vec{f} = m * \vec{g} \quad (10)$$

**[0079]** Der Momentenvektor  $\vec{m}$  ergibt sich aus dem Kreuzprodukt des Schwerpunktvektors  $\vec{s}$  und des Kraftvektors  $\vec{f}$

$$\vec{m} = \vec{s} \times \vec{f} \quad (11)$$

**[0080]** Der Belastungsvektor  $\vec{u}$  kann für diesen Fall also wie folgt ausgedrückt werden:

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} \vec{v}_0 \\ \vec{\delta} \end{pmatrix} = N * \begin{pmatrix} \vec{f} \\ \vec{m} \end{pmatrix} = N * \begin{pmatrix} \vec{f} \\ \vec{s} \times \vec{f} \end{pmatrix} \quad (12)$$

**[0081]** Weitere Vereinfachungen der oben genannten Gleichungen können durch folgende Überlegungen vorgenommen werden. Wenn die Konstruktion dies erlaubt, kann auf die meisten Freiheitsgrade ver-

richtet werden. In dem oben bekannten Modell kann die Verformung beispielsweise lediglich auf eine Verschiebung durch die Kraft quer zu dem Messwerkzeug 10 reduziert werden. Dies ergäbe folgende Nachgiebigkeitsmatrix N:

$$N = \begin{bmatrix} \frac{\delta t_x}{s f_x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\delta t_y}{\delta f_y} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

wobei  $t_x, t_y$  die Translationen in x- bzw. y-Richtung sind und  $f_x, f_y$  die Kraftkomponenten in x- bzw. y-Richtung sind. Die beiden verbleibenden Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix N können weiter vereinfacht werden, wenn die Nachgiebigkeit des Messwerkzeugs 10 als symmetrisch angenommen wird. Damit wären die beiden verbleibenden Komponenten von N gleich groß.

**[0082]** Eine weitere Vereinfachung kann dadurch vorgenommen werden, dass der Ort des Nachgiebigkeitsknotens  $N_1$  in den Ursprung des körperfesten Koordinatensystems  $x', y', z'$  gesetzt wird. Hiermit wird der Vektor  $\overline{p_{N1}}$  zu null. Oben genannte Gleichung (4) für den Vektor  $\overline{p}$  würde sich dann vereinfachen lassen auf die folgende Beziehung:

$$\overline{p} = \overline{p_s} + M_s * (\overline{t_{N1}} + \overline{v_0}) \quad (14)$$

**[0083]** Für eine realistischere Rechnung können neben der Gewichtskraft jedoch auch die dynamische Last sowie die Messkraft berücksichtigt werden. Die dynamische Last ( $F = m \cdot a$ ) kann der Gewichtskraft überlagert werden. Bei der Berechnung des Summenmoments um den elastischen Knoten  $N_1$  muss dabei jeweils der Angriffsort der Kraft bekannt sein. Bei der Messkraft, oder falls anstelle des Tastkörpers 28 ein Werkzeugkopf bei einem Werkzeug verwendet wird, ist dies der Mittelpunkt des Tastkörpers 28. Es ist auch möglich, die Beschleunigung  $a$  direkt mit dem Gravitationsvektor  $g$  zu verrechnen. Für die Korrektur der Verformung durch Messkraft kann beispielsweise die Verkipfung durch Moment berücksichtigt werden. Bei einfachen Tastkörpern 28, die beispielsweise als eine Tastkugel ausgestaltet sind, ist auch eine Berechnung der Verschiebung durch Kraft möglich. Wenn jedoch lediglich die Verkipfung durch Moment berücksichtigt wird, müssen in der Nachgiebigkeitsmatrix N die entsprechenden Koeffizienten in der Unter-matrix  $N_{22}$  gesetzt werden. Diese können sich aus Labormessungen, einer FEM-Berechnung oder einer indivi-

duellen Kalibriermessung am Messwerkzeug 10 ergeben. Oben genannte Gleichung (12) würde sich somit auf folgende vereinfachte Gleichung reduzieren lassen:

$$\overline{\delta} = N_{22} * \overline{m} = N_{22} * (\overline{t_{N1}} \times \overline{f}) \quad (15)$$

**[0084]** In den bisherigen Erläuterungen wurden die Verschiebungsvektoren  $\overline{v_0}$  und die Verkipfungsvektoren  $\overline{\delta}$  als Vektoren mit drei Komponenten bzw. die Rotationsmatrizen  $R_{x,y,z}$  als 3 x 3 Matrizen beschrieben. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die oben genannten Formeln auch mit homogenen 4 x 4 Matrizen ausgedrückt werden können.

**[0085]** Ebenfalls sei darauf hingewiesen, dass bei obigen Betrachtungen durchgehend davon ausgegangen wurde, dass der optische Marker 24 an dem Messwerkzeug 10 angeordnet ist und die Kamera bzw. das Kamerasystem 12 diesen von außen aufnimmt. Grundsätzlich wäre es jedoch auch möglich, eine oder mehrere Kameras an dem Messwerkzeug 10 anzubringen und den optischen Marker 24 davon getrennt im Raum anzubringen, so dass die Positionen von Marker und Kamera quasi getauscht würden. Das Messprinzip bliebe jedoch das Gleiche.

**[0086]** Im Übrigen sei noch erwähnt, dass der Tastkörper 28 nicht nur taktil, sondern alternativ dazu auch berührungslos arbeiten kann. Der Tastkörper 28 kann beispielsweise auch als optischer oder kapazitiver Sensor ausgestaltet sein. Zum Beispiel kann der Tastkörper 28 als Laserscanner ausgebildet sein, der dazu geeignet ist, ein Werkstück optisch zu vermessen. Alternativ dazu kann der Tastkörper 28 auch eine oder mehrere Kameras aufweisen. Auch diese Beispiele sollen erfindungsgemäß unter den hier allgemein verwendeten Begriff „Tastkörper“ fallen. Die Positions- und Lagebestimmung des Tastkörpers 28 erfolgt auch bei den zuvor genannten Beispielen in der vorliegend beschriebenen Art und Weise.

**[0087]** Abschließend sollen anhand der Fig. 6 und 7 zwei beispielhafte Varianten zur Kalibrierung des Messwerkzeugs 10 erläutert werden. Gemäß der in Fig. 6 gezeigten Kalibrierungsvariante wird ein sogenanntes Kugel-Tripel verwendet. Während der Kalibrierung wird der ebenfalls kugelförmige Tastkörper 28 mit den drei Testkugeln 32 des Kugel-Tripels in Kontakt gebracht und danach hin- und her bewegt. Während dieser Bewegung wird die Position der Markerelemente 22a-22c des optischen Markers 24 mit Hilfe des Kamerasystems 12 und der Auswert- und Steuereinheit 14 ermittelt. Die Positionskoordinaten lassen sich beispielsweise vektoriell mit drei translatorischen und drei rotatorischen Komponenten ausdrücken. Alternativ lassen sich die Positions-

koordinaten, wie bereits erwähnt, auch als 4 x 4 Transformationsmatrix mit einer 3 x 3 orthogonal und orthonormal Rotationsuntermatrix oder als Positionsvektor und einer 3 x 3 Rotations-Matrix ausdrücken. Der Positionsvektor  $\bar{p}$  kann gemäß obigem Modell wieder wie folgt ausgedrückt werden

$$\bar{p} = \bar{p}_s + M_s * \bar{t} \quad (16)$$

wobei die Komponenten die Gleichen sind, die bereits oben erläutert wurden. Im Gegensatz zu oben erläuteter Gleichung ist hier lediglich der Vektor von dem körperfesten Koordinatensystem x', y', z' zum Mittelpunkt des Tastkörpers 28 mit dem Vektor t zusammengefasst und nicht in seinen Einzelkomponenten ausgedrückt.

**[0088]** Da die Position des Tastkörpers 28 während der in Fig. 6 schematisch angedeuteten Kalibrierung aufgrund des Kugel-Tripels 32 im Gegensatz zu dem Rest des Werkzeugs 10 nicht bewegt wird, ist der Positionsvektor  $\bar{p}$  des Tastkörpers 28 konstant. Anhand der oben genannten Gleichung lässt sich mit Hilfe mehrerer Testmessungen während der Kalibrierung somit die Unbekannte t lösen. Da auch der Positionsvektor  $\bar{p}$  des Tastkörpers 28, welcher sich während der Kalibrierung nicht ändert, zunächst unbekannt ist, muss auch dieser bestimmt werden. Berücksichtigt man nun jedoch zusätzlich die Verformung des Messwerkzeugs 10 durch äußere Belastung gemäß oben genanntem Modell so ergibt sich für  $\bar{p}$  der weitaus komplexere Zusammenhang wie in den obigen Gleichung (4) bis (6).

**[0089]** Dieser Zusammenhang kann jedoch beispielsweise wiederum dadurch vereinfacht werden, dass lediglich eine Verschiebung durch Kraft berücksichtigt wird. Die Komponenten der Unter-Matrix  $N_{11}$  der Nachgiebigkeitsmatrix N werden während der Kalibrierrechnung zweckmäßigerweise gleichzeitig mit dem Tastvektor  $\bar{t}$  und dem Tasterradius errechnet. Es hat sich gezeigt, dass dabei eine zwangsweise Symmetriesierung (symmetrische 3 x 3 Matrix), also eine Rechnung mit sechs Freiheitsgraden für  $N_{11}$  günstig ist. Für die Kalibrierrechnung ergeben sich dann mit weiteren vier für den Tastvektor  $\bar{t}$  und den Tasterradius zehn Freiheitsgrade. Diese können mit Bestfit-Rechnung (Minimierung der kleinsten Fehlerquadrate) errechnet werden. Dazu werden neben oben genannter Gleichung in einer entsprechend vereinfachten Form noch die Kugelfunktion benötigt. Für die Kalibrierung mit dem Kugel-Tripel ergeben sich also folgende Vereinfachungen:

- Kalibriert wird die Verformung des Messwerkzeugs 10, wobei lediglich die Verschiebung durch Kraft (Unter-Matrix  $N_{11}$ ) berücksichtigt wird;

-  $N_{11}$  soll mit sechs Freiheitsgraden (zwangsweise Symmetrie) berechnet werden;

- das Messwerkzeug 10 weist als Tastkörper 28 eine Tastkugel auf;

- die Messkraft, welche während der Kalibrierung auf das Messwerkzeug 10 ausgeübt wird, kann über eine Kraftmesseinrichtung erfasst und hinreichend synchron zu den Positionsinformationen ausgelesen werden;

- während der Messung wird die Tastkugel in dem Kugel-Tripel gehalten (die Messkraft zeigt daher also immer in Richtung des Kugel-Tripels);

es werden n Messpunkte mit unterschiedlichen Messkräften, Positionen und Orientierungen aufgenommen;

- der Radius r der Tastkugel ist bekannt oder wird in einem nachgelagerten Schritt ermittelt.

**[0090]** Unter diesen Betrachtungen ergibt sich unter Zuhilfenahme der oben genannten Gleichung und der erwähnten Überlegungen folgende Zielfunktion

$$\sum_{i=1}^n \left[ \left( \bar{p}_{s,i} + M_{s,i} * (\bar{t}_{N1} + N_{11} * \bar{t}_i) - \bar{p}_K \right) \right]^2 \rightarrow \text{Min.} \quad (17)$$

**[0091]** Diese Funktion enthält neben den bereits bekannten Komponenten auch die Position des Kugel-Tripels  $\bar{p}_K$ , welche mit jeweils drei Freiheitsgraden ebenfalls gesucht ist.

**[0092]** Alternativ kann zur Kalibrierung mit einem Kugel-Tripel 32 auch eine Testkugel 34 verwendet werden, wie sie in der Messtechnik häufig für solche Kalibrierungen verwendet wird. Derartige Testkugeln, welche in der Koordinatenmesstechnik üblicherweise als Einmesskugeln bezeichnet werden, besitzen einen exakt bekannten Durchmesser (hier bezeichnet als 2R). Auch bei dieser Kalibrierungsvariante mit der Testkugel 34 wird das Messwerkzeug 10 während der Kalibrierung verschwenkt, wobei der Kontakt zwischen dem Tastkörper 28 und der Testkugel 34 dauerhaft aufrecht erhalten bleibt und die auf die Testkugel 34 ausgeübte Kraft variiert wird (siehe Fig. 7). Die Berechnung läuft dabei ähnlich ab, wie oben bereits bezüglich der ersten, in Fig. 6 dargestellten Kalibrierungsvariante erläutert. Die oben genannte Formel kann auch hier angewendet werden, wobei der Positionsvektor p des Tastkörpers nicht konstant ist. Hierdurch ergibt sich ein Freiheitsgrad mehr. Es ergibt sich somit folgende Zielfunktion:

$$\sum_{i=1}^n \left[ \left( \bar{p}_{s,i} + M_{s,i} * (\bar{t}_{N1} + N_{11} * \bar{t}_i) - \bar{p}_K \right) - (R+r) \right]^2 \rightarrow \text{Min.} \quad (18)$$

wobei R der Radius der Einmesskugel 34 ist und r der Radius des Tastkörpers 28 ist.

**[0093]** Der Vollständigkeit halber sei zuletzt noch eine Möglichkeit der Kalibrierung des Kamerasystems 12 und der Auswerte- und Steuereinheit 14 nachfolgend kurz anhand eines möglichen Beispiels erläutert. Beispielsweise wird ein Kamerasystem 12 mit zwei Kameras verwendet. Als Marker 24 wird ein Marker bestehend aus neun kreisförmigen Markerelementen verwendet, die auf einem quadratischen Raster mit bekanntem Abstand angeordnet sind und zusätzliche Identifikationsmerkmale zum Unterscheiden von drei diskreten Kreisen (z.B. Farben: Blau, rot, grün) aufweisen. Der erste Kreis definiert den Ursprung des Marker-Koordinatensystems (Position  $\vec{p}_s$  siehe obige Gleichung (4)). Die Richtung der Matrix  $M_s$  ergibt sich aus den anderen beiden Markierungen, z.B. Richtung für Matrix  $M_s$  x-Achse aus Richtung von Kreis 1 zu Kreis 2. Die Kameras werden im einfachsten Ansatz mit einem sogenannten Pinhole-Modell beschrieben. In

[http://docs.o-pencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera\\_calibration\\_and\\_3d\\_reconstruction.html](http://docs.o-pencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html) ist ein solches Modell und eine Implementierung beschrieben. Zunächst wird für jede Kamera einzeln eine intrinsische Kamerakalibrierung durchgeführt. Dabei wird mindestens die Fokusslänge, allgemein eine Kameramatrix bestimmt. Dazu wird ein Kalibrierobjekt - eine Platte mit regelmäßig angeordneten Merkmalen mit bekanntem Abstand - verwendet. Von diesem Kalibrierobjekt werden Bilder in verschiedenen Abständen, Winkeln und Orientierungen gemacht. Danach wird eine sog. extrinsische Kalibrierung durchgeführt, bei der die Lage der Kameras zueinander (Winkel, Abstand) ermittelt werden. Nach dieser Prozedur kann dieses Stereokamerasystem prinzipiell aus jedem gleichzeitig aufgenommenen Bildpaar mit hinreichender Bildüberlappung und irgendeinem Bildinhalt ein 3D-Bild berechnen. Hierzu wird üblicherweise der so „blockmatching algorithmus“ verwendet. Dieser berechnet eine sog. „disparity map“. Disparität bedeutet dabei: Größe der Verschiebung zwischen den beiden Kamera Bildern. Große Verschiebung bedeutet große Entfernung, kleine Verschiebung bedeutet kleine Entfernung. Mit dem Ergebnis von extrinsischer und intrinsischer Kalibrierung kann daraus der Abstand in metrischen Einheiten berechnet werden. Wenn die Marker wie hier angenommen kreisförmig sind, erscheinen sie in beiden Bildern zunächst als Ellipsen. Die Bildpaare können daher mit bekannten Algorithmen nach diesen Ellipsen durchsucht werden. In oben genanntem Beispiel mit 9 Markerelementen erhält man also 9 Positionspaare für die beiden Bilder. Damit kann die Disparität und damit die 3D Position jedes Kreismittelpunktes berechnet werden. Durch die Markierung von 3 der Markerelemente kann eindeutig ein Koordinatensystem aufgespannt werden.

**[0094]** Es versteht sich, dass die oben genannten Kalibrierungen üblicherweise lediglich einmal im Vorfeld zu der eigentlichen Vermessung des Werkstücks 20 durchgeführt werden.

### Patentansprüche

1. Messsystem (100) mit:
  - einem Messwerkzeug (10), welches einen Tastkörper (28) und einen optischen Marker (24) aufweist;
  - einer Kamera (12) zur Aufnahme von Bilddaten des Messwerkzeugs (10); und
  - einer Auswerte- und Steuereinheit (14), welche dazu eingerichtet ist, die von der Kamera (12) aufgenommenen Bilddaten auszuwerten und daraus eine Position und Lage des optischen Markers (24) zu bestimmen, wobei die Auswerte- und Steuereinheit (14) ferner dazu eingerichtet ist, aus der Position und Lage des optischen Markers (24) eine Position des Tastkörpers (28) für einen kraftfreien Zustand des Messwerkzeugs (10) zu berechnen, eine Verformung des Messwerkzeugs (10) aufgrund äußerer, auf das Messwerkzeug (10) einwirkender mechanischer Belastung zu berechnen, und räumliche Positionskoordinaten des Tastkörpers (28) durch Superposition von Positionsänderungskomponenten, welche aufgrund der berechneten Verformung zustande kommen, und der Position des Tastkörpers (28) im kraftfreien Zustand zu berechnen.
2. Messsystem nach Anspruch 1, wobei die Auswerte- und Steuereinheit (14) dazu eingerichtet ist, die Verformung des Messwerkzeugs (10) anhand eines vereinfachten mechanischen Ersatzmodells zu errechnen, in dem das Messwerkzeug (10) als mechanisches System modelliert ist, welches mindestens zwei starre Körper (36, 38) und einen ersten elastischen Knoten ( $N_1$ ) aufweist, der die zwei starren Körper (36, 38) miteinander verbindet.
3. Messsystem nach Anspruch 2, wobei die Verformung in dem mechanischen Ersatzmodell als Translation und/oder Rotation der beiden starren Körper (36, 38) relativ zueinander modelliert ist und mittels der Gleichung  $\vec{u} = N * \vec{b}$  berechnet wird, wobei  $\vec{u}$  die Verformung und  $\vec{b}$  die äußere mechanische Belastung, jeweils in vektorieller Form, beschreiben und N eine Nachgiebigkeitsmatrix ist, welche Nachgiebigkeitseigenschaften des elastischen Knotens ( $N_1$ ) infolge der äußeren mechanischen Belastung beschreibt.
4. Messsystem nach Anspruch 3, wobei die räumlichen Positionskoordinaten des Tastkörpers (28) mittels folgender Gleichung berechnet werden:

$$\bar{p} = \bar{p}_s + M_s * (\overline{p_{N1}} + f(\bar{u}, \overline{t_{N1}})); \text{ mit } \bar{u} = \begin{pmatrix} v_{0x} \\ v_{0y} \\ v_{0z} \\ \delta_{rx} \\ \delta_{ry} \\ \delta_{rz} \end{pmatrix};$$

und

$$\text{wobei } f(\bar{u}, \overline{t_{N1}}) = R_z(\delta_{rz}) * R_y(\delta_{ry}) * R_x(\delta_{rx}) \cdot \overline{t_{N1}} + \begin{pmatrix} v_{0x} \\ v_{0y} \\ v_{0z} \end{pmatrix};$$

wobei  $\bar{p}$  die räumlichen Positionskoordinaten des Tastkörpers (28) und  $\bar{p}$  die räumlichen Positionskoordinaten des optischen Markers (24), jeweils in vektorieller Form in einem ortsfesten Inertialsystem, beschreiben, wobei  $M_s$  eine Transformationsmatrix ist zur Transformation von Vektoren aus einem zu dem Messwerkzeug (10) körperfesten Koordinatensystem in das ortsfeste Inertialsystem, wobei  $\overline{p_{N1}}$  räumliche Positionskoordinaten des elastischen Knotens ( $N_1$ ) in vektorieller Form in dem körperfesten Koordinatensystem beschreibt, wobei  $\overline{t_{N1}}$  einen Vektor von dem elastischen Knoten ( $N_1$ ) zu dem Tastkörper (28) in dem körperfesten Koordinatensystem beschreibt, wobei  $v_{0x}$ ,  $v_{0y}$ ,  $v_{0z}$  Translationskomponenten des Verformungsvektors  $\bar{u}$  und  $\delta_{rx}$ ,  $\delta_{ry}$ ,  $\delta_{rz}$  Rotationskomponenten des Verformungsvektors  $\bar{u}$  sind, und wobei  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  Rotationsmatrizen zur Drehung der Rotationskomponenten  $\delta_{rx}$ ,  $\delta_{ry}$ ,  $\delta_{rz}$  im euklidischen Raum beschreiben.

5. Messsystem nach einem der Ansprüche 2 bis 4, wobei der elastische Knoten ( $N_1$ ) in dem mechanischen Ersatzmodell örtlich zwischen dem Tastkörper (28) und dem optischen Marker (24) angeordnet ist.

6. Messsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die äußere, auf das Messwerkzeug (10) einwirkende mechanische Belastung, welche die Auswerte- und Steuereinheit (14) zur Berechnung der Verformung des Messwerkzeugs (10) berücksichtigt, eine auf das Messwerkzeug (10) einwirkende Gewichtskraft, eine auf das Messwerkzeug (10) einwirkende Trägheitskraft, und/oder eine auf den Tastkörper (28) einwirkende Kontaktkraft umfasst.

7. Messsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das Messsystem (100) eine Kraftmesseinrichtung zur Messung der auf das Messwerkzeug einwirkenden, äußeren mechanischen Belastung aufweist.

8. Messsystem nach Anspruch 7, wobei die Kraftmesseinrichtung einen Kraftsensor aufweist, welcher in das Messwerkzeug (10) integriert ist oder an diesem angeordnet ist.

9. Messsystem nach Anspruch 7, wobei die Kamera (12) und die Auswerte- und Steuereinheit (14) Teil der Kraftmesseinrichtung sind, wobei die Auswerte- und Steuereinheit (14) dazu eingerichtet ist, die auf das Messwerkzeug (10) einwirkende, äußere mechanische Belastung anhand den von der Kamera (12) aufgenommenen Bilddaten zu berechnen.

10. Messsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei der optische Marker (24) zumindest drei, an dem Messwerkzeug verteilt angeordnete, optische Markerelemente (22a-22c) aufweist.

11. Messsystem nach einem der Ansprüche 2 bis 5, wobei der optische Marker (24) zumindest drei, an dem Messwerkzeug verteilt angeordnete, optische Markerelemente (22a-22c) aufweist, wobei das Messwerkzeug (10) in dem mechanischen Ersatzmodell als mechanisches System modelliert ist, welches einen ersten, einen zweiten und einen dritten starren Körper sowie einen ersten und einen zweiten elastischen Knoten aufweist, wobei der erste elastische Knoten den ersten und den zweiten starren Körper miteinander verbindet und der zweite elastische Knoten den zweiten und den dritten starren Körper miteinander verbindet, und wobei ein erstes der drei optischen Markerelemente (22a-22c) als Teil des ersten starren Körpers, ein zweites der drei optischen Markerelemente (22a-22c) als Teil des zweiten starren Körpers und der Tastkörper (28) als Teil des dritten starren Körpers modelliert ist.

12. Messsystem nach Anspruch 10 oder 11, wobei die Markerelemente (22a-22c) passive, optische Markerelemente sind, die in unverformtem Zustand des Messwerkzeugs (10) in einer gemeinsamen Ebene angeordnet sind.

13. Messsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei der Tastkörper (28) als Tastkugel oder Tastspitze ausgestaltet ist.

14. Messverfahren mit den folgenden Schritten:  
 - Aufnehmen von Bilddaten eines Messwerkzeugs (10), welches einen Tastkörper (28) und einen optischen Marker (24) aufweist;  
 - Auswerten der aufgenommenen Bilddaten;  
 - Bestimmen einer Position und Lage des optischen Markers (24) anhand der ausgewerteten Bilddaten;  
 - Berechnen einer Position des Tastkörpers (28) für einen kraftfreien Zustand des Messwerkzeugs (10) aus der Position und Lage des optischen Markers (24);



- Berechnen einer Verformung des Messwerkzeugs (10) aufgrund äußerer, auf das Messwerkzeug (10) einwirkender mechanischer Belastung; und
- Berechnen räumlicher Positionskordinaten des Tastkörpers (28) durch Superposition von Positionsänderungs-Komponenten, welche aufgrund der berechneten Verformung zustande kommen, und der Position des Tastkörpers (28) im kraftfreien Zustand.

15. Computerprogramm, das einen Programmcode aufweist, der dazu eingerichtet ist, bei Ausführung auf einem Computer zur Steuerung des Messsystems gemäß Anspruch 1, das Verfahren gemäß Anspruch 14 auszuführen.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

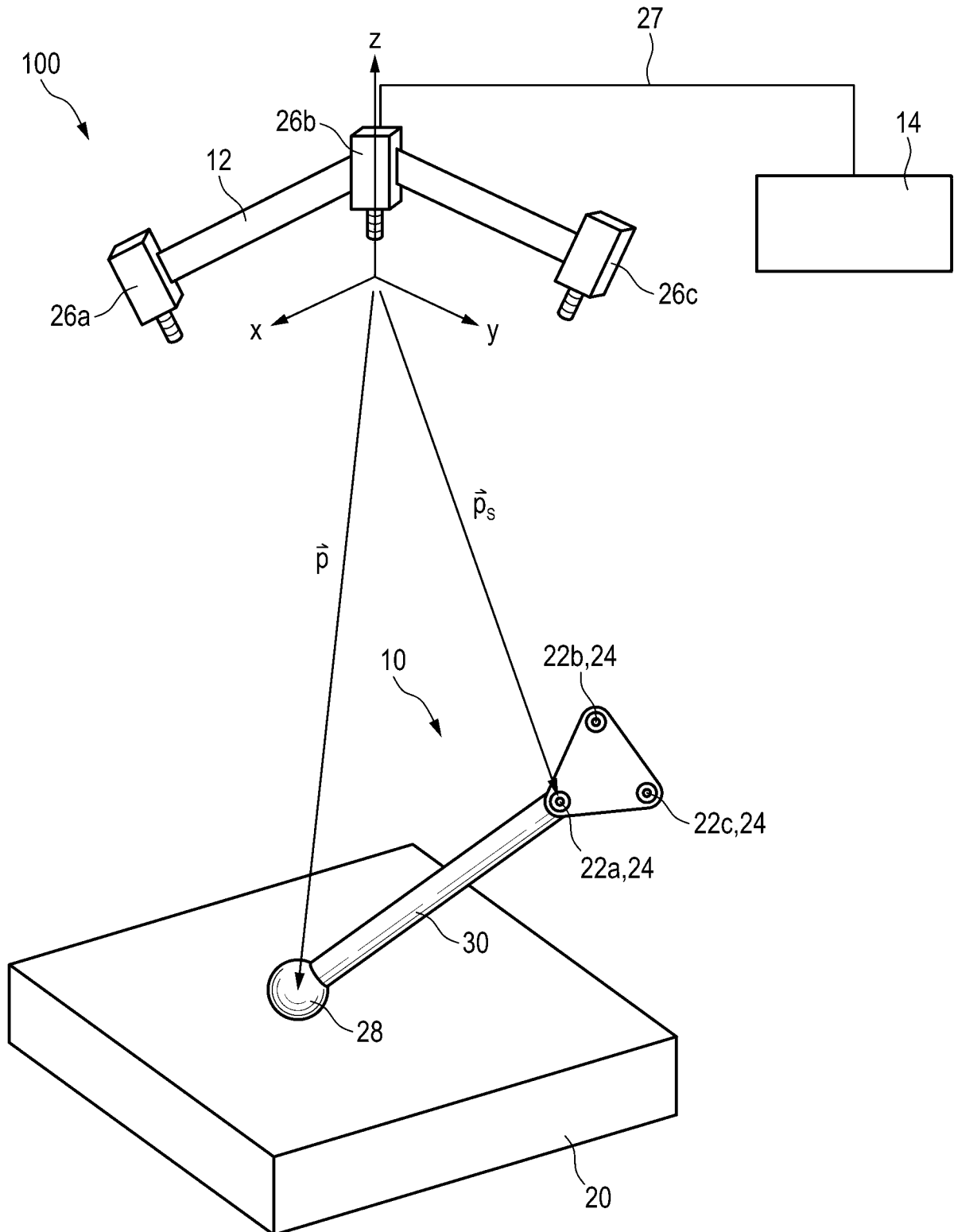
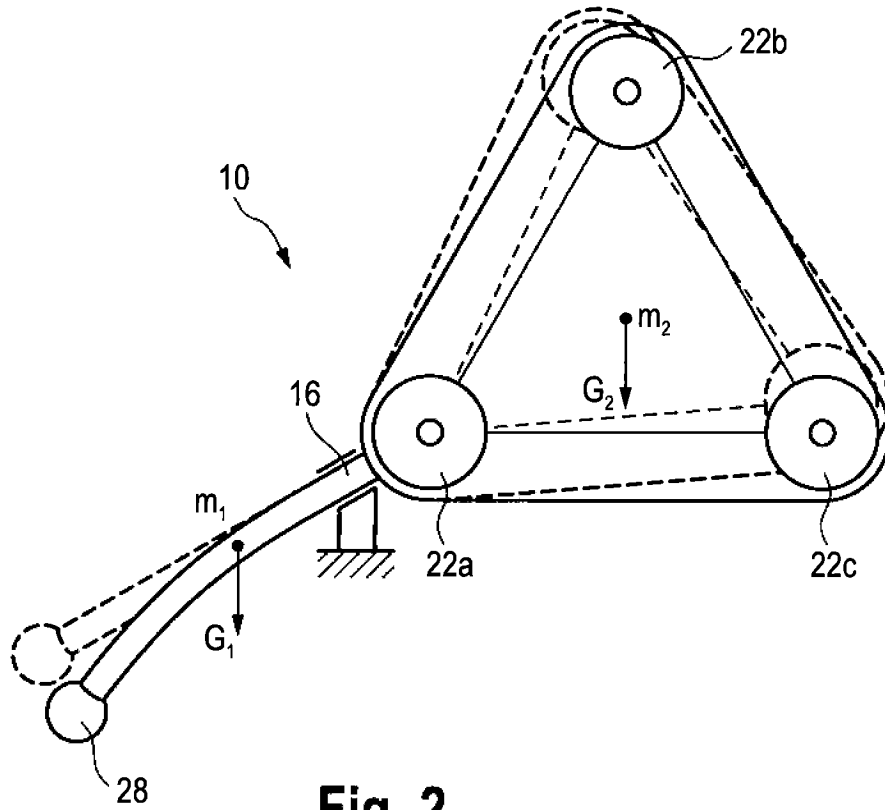
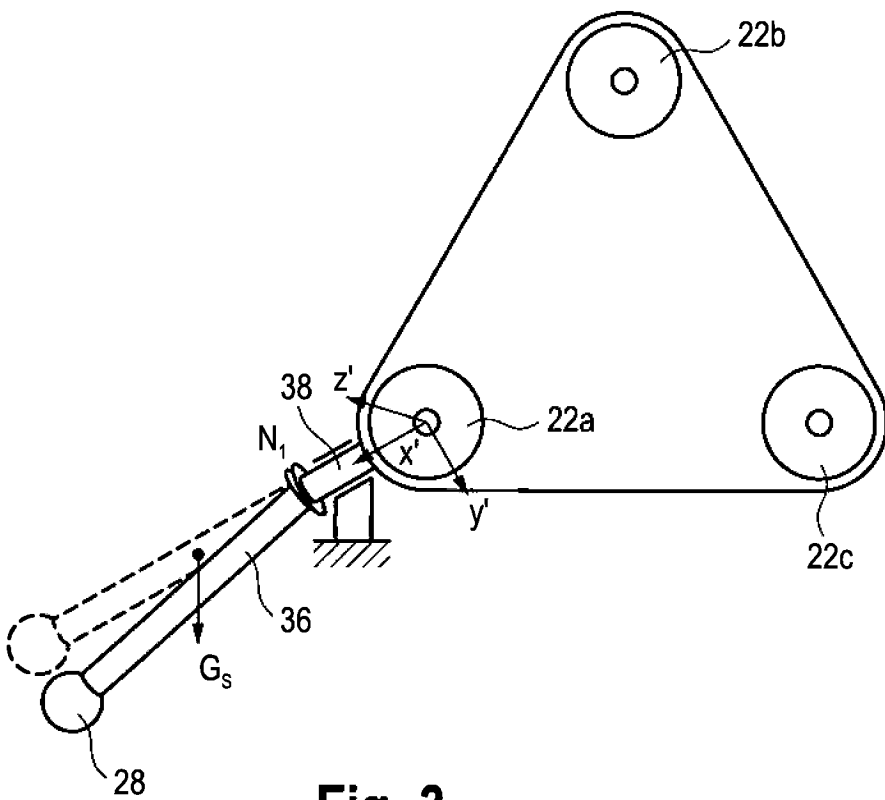


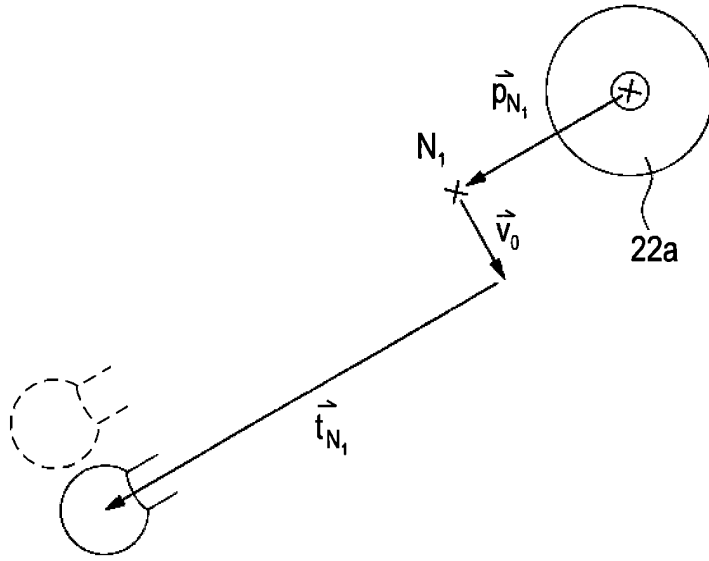
Fig. 1



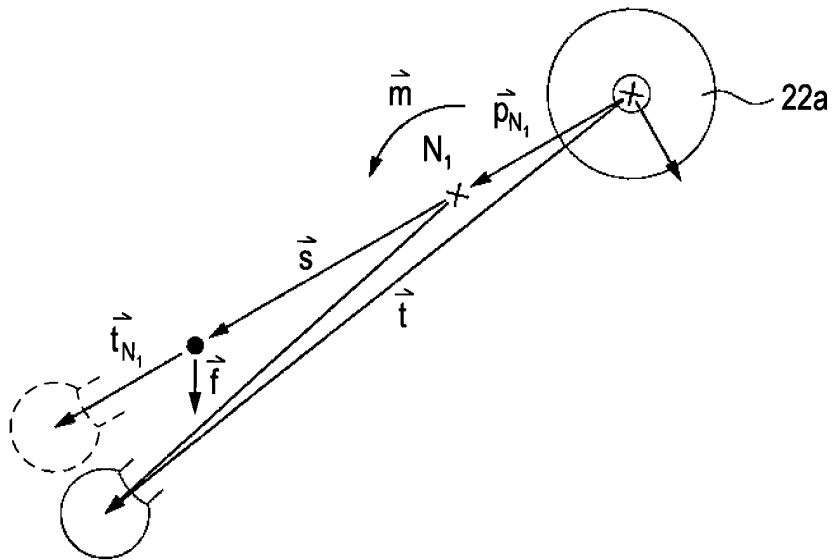
**Fig. 2**



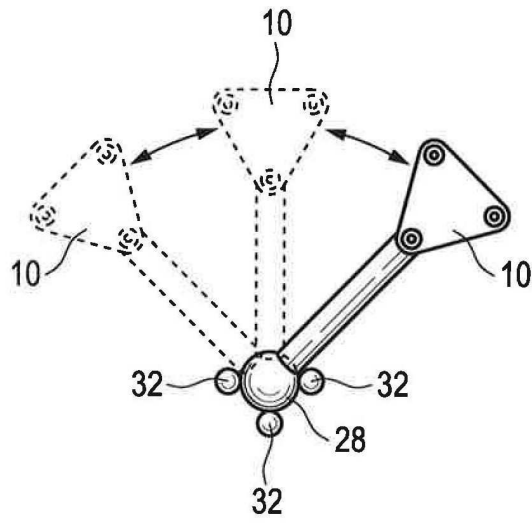
**Fig. 3**



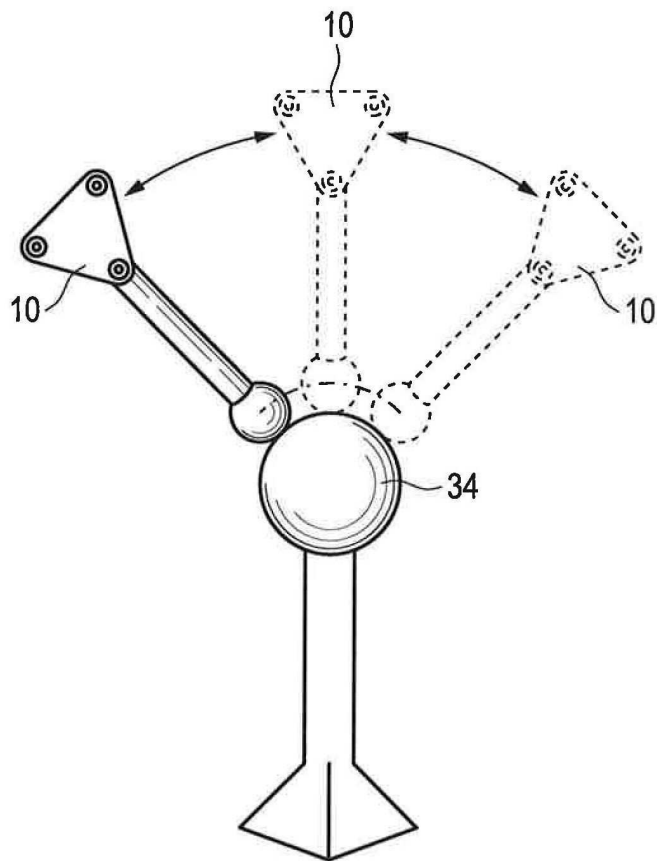
**Fig. 4**



**Fig. 5**



**Fig. 6**



**Fig. 7**