

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
9. Dezember 2004 (09.12.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/106854 A1

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: G01B 21/04

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2004/004805

(22) Internationales Anmeldedatum:
6. Mai 2004 (06.05.2004)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
102 24 695.9 28. Mai 2003 (28.05.2003) DE
103 27 867.2 18. Juni 2003 (18.06.2003) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): CARL ZEISS INDUSTRIELLE MESSTECHNIK GMBH [DE/DE]; Carl Zeiss Strasse 22, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder; und

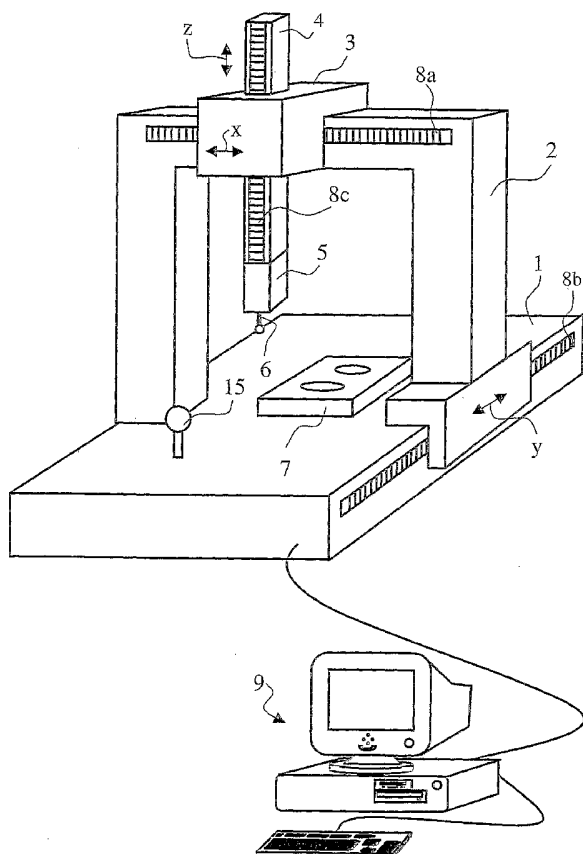
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): LOTZE, Werner [DE/DE]; Rudolf-Mauersberger-Strasse 1, 01309 Dresden (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR CALIBRATING A PROBE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR KALIBRIERUNG EINES TASTERS



(57) Abstract: The invention relates to a method for measuring measured values on a workpiece (7) using a coordinate measuring device comprising a measuring probe head (5) with a deflectable feeler (6), wherein the coordinate measuring device can carry out a linear or non-linear representation (transformation) of the deflection signals (s) determined by the measuring probe head (5) into a coordinate system (X_M, Y_M, Z_M) of the coordinate measuring device using parameters (A). In order to be able to use the method for any measuring probe, more particularly probes whose feelers are not movably guided in the directions of the coordinates, at least one part of said parameters (A_{anti}) describes components of the deflection of the feeler, which are located tangentially relative to the surface of the workpiece on the point of contact.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung zeigt ein Verfahren zur Messung von Messwerten auf einem Werkstück (7) mit einem Koordinatenmessgerät, das einen messenden Tastkopf (5) mit einem auslenkbaren Taststift (6) aufweist, wobei das Koordinatenmessgerät unter Verwendung von Parametern (A) eine lineare oder nichtlineare Abbildung (Transformation) der vom messenden Tastkopf (5) bestimmten Auslenkungssignale (s) in ein Koordinatensystem (X_M, Y_M, Z_M) des Koordinatenmessgerätes durchführen kann. Um das Verfahren für beliebige messende Tastköpfe einsetzen zu können, insbesondere auch Tastköpfe, deren Taststift nicht in den Koordinatenrichtungen beweglich geführt ist, beschreibt wenigstens ein Teil dieser Parameter (A_{anti}) Komponenten der Taststiftauslenkung, die tangential zur Werkstückoberfläche im Berührungspunkt stehen.

WO 2004/106854 A1



(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Verfahren zur Kalibrierung eines Tasters

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Messung von Messwerten auf einem Werkstück mit einem Koordinatenmessgerät, das einen messenden Tastkopf mit einem auslenkbaren Taststift aufweist, sowie ein Koordinatenmessgerät, mit dem dieses Verfahren ausgeführt werden kann und ein zugeordnetes Computerprogrammprodukt.

Derartige Verfahren sind aus dem Stand der Technik bereits bekannt. Bei derartigen Verfahren werden üblicherweise Tastköpfe verwendet, bei denen der Taststift in den drei Koordinatenrichtungen beweglich am Tastkopf befestigt ist. Dazu weisen bekannte Tastköpfe in ihrem inneren eine Tastkopfmechanik auf, über die der Taststift in den drei Koordinatenrichtungen ausgelenkt werden kann. Die Tastkopfmechanik weist dazu üblicherweise drei Führungen auf, wobei jede der Führungen die Bewegung in einer der drei Koordinatenrichtungen des Koordinatenmessgerätes zulässt. Dazu ist jede der drei Führungen parallel zu einer der Bewegungsrichtungen des Koordinatenmessgerätes ausgerichtet.

Um die durch die Messsysteme des Tastkopfes gemessenen Auslenkungen des Taststiftes in das Koordinatensystem des Koordinatenmessgerätes einzubinden, wurde in der Vergangenheit eine Transformationsmatrix verwendet, über die die gemessenen Messwerte der Tastiftauslenkung (Auslenkungssignale bzw. Tastkopfsignale) in ein Koordinatensystem des Koordinatenmessgerätes transformiert wurden. Die einzelnen Parameter dieser Matrix wurden in vorgeschalteten Kalibriervorgängen ermittelt.

Ein entsprechender Tastkopf, für den ein solcher Kalibriervorgang erläutert wurde ist in dem Artikel "Multidimensional measuring probe head improves accuracy and functionality of coordinate measuring machines" von „W. Lotze“, erschienen im Jahre 1994 in der Zeitschrift Measurement 13 auf den Seiten 91 bis 97, Elsevier beschrieben. Hierin ist auf Seite 95 bis Seite 96 die Bestimmung der Parameter einer entsprechenden Matrix H für den zweidimensionalen Fall-der Taster kann nur in der x-y-Ebene bewegt werden- beschrieben.

In jüngerer Zeit werden aus unterschiedlichen Gründen Tastköpfe eingesetzt, deren Führungen keine Bewegung mehr parallel zu den Koordinatenrichtungen der Koordinatenachsen des Koordinatenmessgerätes zulassen. Beispielsweise werden Taster verwendet, deren Taststift in Richtung seiner Längsachse linear geführt ist, während der Taststift zur Bewegung in den beiden anderen Koordinatenrichtungen über ein Kardangelenk drehbeweglich gelagert ist.

Bei dem Versuch, einen derartigen Tastkopf unter Verwendung von herkömmlichen Transformationsmatrizen an ein Koordinatenmessgerät anzukoppeln, haben sich insoweit Probleme ergeben, als die bekannten Verfahren zur Kalibrierung entsprechender Tastköpfe nicht mehr konvergieren.

Unserer Erfindung liegt deshalb hiervon ausgehend die Aufgabe zugrunde das oben angegebene Messverfahren, sowie ein Koordinatenmessgerät, mit dem ein solches Messverfahren durchgeführt werden kann und ein entsprechendes Computerprogrammprodukt anzugeben, mit dem beliebige messende Tastköpfe, insbesondere auch Tastköpfe, deren Führungen nicht parallel zu den Koordinatenachsen des Koordinatenmessgerätes ausgerichtet sind und deren elastische Eigenschaften unterschiedlich sind, an ein Koordinatenmessgerät angekoppelt werden können.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass wenigstens ein Teil der Parameter zur linearen oder nichtlinearen Abbildung (Transformation) der von dem messenden Tastkopf ermittelten Auslenkungssignale in ein Koordinatensystem des Koordinatenmessgerätes Komponenten der Tastiftauslenkung beschreiben, die tangential zur Werkstückoberfläche im Berührungspunkt stehen.

Die Besonderheit dieses Verfahrens ist darin zu sehen, dass nunmehr erfindungsgemäß speziell Komponenten in die Abbildung der Auslenkungssignale eingehen, die bei der Messung wie auch bei der Kalibrierung tangential zur Werkstückoberfläche im Berührungspunkt stehen.

Bei dem Koordinatensystem des Koordinatenmessgerätes handelt es sich hierbei bevorzugt um das zentrale Maschinenkoordinatensystem, auf das bezogen alle Messungen stattfinden. Natürlich kann es sich alternativ aber auch um ein beliebiges anderes Koordinatensystem handeln, das in das Maschinenkoordinatensystem transformiert werden kann.

Obwohl sich das erfindungsgemäße Verfahren besonders für Tastköpfe eignet, die keine Führungen aufweisen, welche parallel zu den Koordinatenrichtungen des Koordinatenmessgerätes ausgerichtet sind, lässt sich das Verfahren selbstverständlich auch für beliebige herkömmliche Tastköpfe einsetzen, bei denen die Führungen beispielsweise parallel zu den Koordinatenrichtungen ausgerichtet sind.

Anstelle des Begriffes „Transformation“ der Auslenkungssignale wurde hierbei der wesentlich allgemeinere Begriff „lineare oder nichtlineare Abbildung“ verwendet, da der Begriff „Transformation“ lediglich speziell die Abbildung von Vektoren im euklidischen Raum auf Vektoren im euklidischen Raum beschreibt. Euklidischer Raum ist hierbei der bekannte dreidimensionale Raum, dessen Vektoren sich über die Koordinaten x , y und z in einem kartesischen Koordinatensystem beschreiben lässt. Eine solche Abbildung ist zwar gegeben, wenn die Auslenkung des Taststiftes in den drei Koordinatenrichtungen gemessen wurde. Für den Fall eines Taster jedoch, bei dem die Auslenkung in einer Koordinatenrichtung beispielsweise als Rotation des Taststiftes gemessen wird, bilden die Auslenkungssignale ersichtlich keinen Vektor im euklidischen Raum.

Obwohl die besagten Parameter, die die tangentialen Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben, grundsätzlich in unterschiedlicher Form vorliegen können, beispielsweise als Parameter von Gleichungen, bilden diese vorteilhaft eine Matrix, insbesondere eine Rotationsmatrix.

Um die Parameter, die die tangentialen Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben, bestimmen zu können, sollte bei der Kalibrierung am Kalibriernormal wenigstens eine der beiden nachfolgend genannten Zielfunktionen Q_2 oder Q_3 erfüllt werden:

- Zielfunktion $Q_2 = \sum \mathbf{v}_i \times \mathbf{n}_i \Rightarrow 0$ oder

- Zielfunktion $Q_3 = \sum (v_i \times n_i)^2 \Rightarrow \text{Min}$

wobei hierin bedeuten:

v_i = Auslenkvektor der Tastkugel im i-ten Messpunkt

n_i = Normalenvektor im Berührungspunkt der Tastkugel auf die Werkstückoberfläche (des Kalibriernormals) beim Messen im i-ten Messpunkt

Die Messpunkte v_i die zum Lösen der Zielfunktionen Q_2 oder Q_3 verwendet werden, sollten durch Abtasten mindestens eines Halbkreises an einem Kalibrierkörper aufgenommen werden. Das Abtasten eines einzigen Halbkreises ist hierbei jedoch nur ausreichend für den Fall, dass der Taster in zwei Koordinatenrichtungen ausgelenkt werden kann. In diesem Fall kann der Halbkreis beispielsweise an einem Leerring oder an einer Kalibrierkugel abgetastet werden.

Für den Fall, dass der Taststift in allen drei Koordinatenrichtungen ausgelenkt werden kann, sollten möglichst gleichverteilt über eine Halbkugel Messwerte aufgenommen werden. Dies kann beispielsweise dadurch realisiert werden, indem mindestens drei unterschiedliche Halbkreise auf einer Kalibrierkugel gemessen werden, die auf einer Halbkugel liegen. Unter Halbkreisen sind hierbei drei Großkreise der Kalibrierkugel gemeint, also Kreise mit dem Durchmesser der Kalibrierkugel.

Die abgetasteten Messpunkte sollten hierbei so aufgenommen werden, dass diese gleichmäßig über den abgetasteten Halbkreis oder die Halbkugel verteilt sind.

Zur linearen oder nichtlinearen Abbildung der Tastkopfsignale können zusätzlich Parameter verwendet werden, die Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben, die normal zur Werkstückoberfläche im Berührungspunkt stehen.

Auch diese Parameter können ebenfalls eine Matrix bilden, wobei diese bei der Kalibrierung im bekannter Weise mit der Ausgleichsbedingung aus der folgenden Zielfunktion zu bestimmen sind:

- Zielfunktion $Q_1 = \sum f_{n,i}^2 \Rightarrow \text{Min}$

wobei mit $f_{n,i}$ die Normalabweichungen, also die Abweichungen in normal auf die Werkstückoberfläche stehender Richtung im Berührungspunkt (z. B. der Kalibrierkugel) bezeichnet sind.

Das Verfahren kann als Computerprogrammprodukt realisiert sein, das direkt in den internen Speicher einer digitalen Steuer- und Auswerteeinheit eines Koordinatenmessgerätes geladen werden kann und Softwareabschnitte umfasst, die das Verfahren durchführen können. Das Computerprogrammprodukt kann hierbei auf einem Datenträger, wie beispielsweise einer CD-Rom, einer DVD-Rom, einer Diskette, einer Festplatte oder einem USB-Speicherstift etc. gespeichert sein.

Weitere Vorteile und Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich im Folgenden aus der Figurenbeschreibung. Hierin zeigen:

Figur 1: ein Koordinatenmessgerät, das das erfindungsgemäße Verfahren ausführen kann

Figur 2a-2c: eine schematische Darstellung einer Tastkopfmechanik, bei der der Taststift in einer Koordinatenrichtung (z) über eine Linearführung geführt ist und in die beiden anderen Koordinatenrichtungen über ein Kardangelenkbeweglich geführt ist.

Figur 3: rein schematische Darstellung von unterschiedlichen Größen eines Tastkopfes mit der Kinematik des Tastkopfes gem. Figuren 2a bis 2c

Figur 4: rein schematische Darstellung der Vektorverhältnisse bei der Antastung einer Kalibrierkugel (15)

Figur 5: Darstellung des Winkels (ϵ) zwischen Messkraft (F_M) und Tasterauslenkung (v)

Figur 1 zeigt ein erfindungsgemäßes Koordinatenmessgerät, auf dem das erfindungsgemäße Verfahren durchgeführt werden kann. Das Koordinatenmessgerät weist einen Messtisch (1) auf, auf dem ein zu vermessendes Werkstück (7) gelagert werden kann. Entlang des

Messtisches (1) kann in der mit dem Pfeil (Y) bezeichneten Richtung motorisch ein Portal (2) Verfahren werden, dessen genaue Position an einem Maßstab (8b) abgetastet werden kann. Entlang der Traverse des Portals (2) ist ein X-Schlitten (3) in der mit dem Pfeil (X) bezeichneten Richtung motorisch verschiebbar gelagert, wobei dessen Position durch Abtasten des Maßstabes (8a) ermittelt werden kann. Der X-Schlitten (3) lagert eine Pinole (4) in der mit dem Pfeil (Z) bezeichneten Richtung beweglich, wobei auch die Pinole (4) motorisch verstellt werden kann. Die genaue Position der Pinole (4) kann durch Abtasten des Maßstabes (8c) bestimmt werden. Am unteren Ende der Pinole (4) ist ein sogenannter messender Tastkopf (5) befestigt, an dem ein in den drei Koordinatenrichtungen (x, y und z) beweglich gelagerter Taststift (6) befestigt ist.

Zur Steuerung des Koordinatenmessgerätes und zur Auswertung der hierbei aufgenommenen Messdaten ist eine Steuer- und Auswerteeinheit (9) vorgesehen, die in dem konkreten Koordinatenmessgerät als Personal Computer ausgeführt ist.

Selbstverständlich ist das hier in Figur 1 gezeigte Koordinatenmessgerät nur eine von vielen unterschiedlichen Möglichkeiten. Beispielsweise kann die Mechanik zum Bewegen des Tastkopfes (5) völlig anders ausgestaltet sein. An Stelle des hier beispielhaft gezeigten Portalaufbaus kann auch beispielsweise ein Ständeraufbau verwendet werden, bei dem ein horizontal auskragender Messarm an einem vertikal ausgerichteten Ständer beweglich geführt ist. Des weiteren kann anstelle des Tastkopfes (5) auch das Werkstück (7) in einer oder mehreren Koordinatenrichtungen bewegt werden, indem der Messtisch (1) in dem betreffenden Richtungen Verfahren wird. Anstelle der linear verfahrbaren Messschlitten (2,3,4) können gleichfalls auch Drehgelenke vorgesehen werden. Natürlich kann auch die Steuer- und Auswerteeinheit anders aufgebaut sein und beispielsweise zweiteilig aufgebaut sein aus einem Messrechner und einem separaten Steuerschrank.

Der Aufbau des in Figur 1 mit dem Bezugszeichen (5) bezeichneten messenden Tastkopf, der hierbei ebenfalls rein beispielhaft und nur sehr schematisch gezeigt ist, ist in den Figuren 2a bis 2b dargestellt. Wie hieraus zu sehen, ist der Taststift (6) über Blattfedern (13a, 13b, 13c) und (14a, 14b, 14c) in der mit dem Pfeil (Z) gezeigten Richtung, wie dies aus Figur 2b zu sehen ist, in einem Hohlzylinder (11) linear geführt. Die Blattfedern (13a bis 13c) und (14a

bis 14c) sind in einem Winkel von 120° versetzt zueinander sternförmig angeordnet, so dass die Blattfedern (13c und 14c) nicht zu sehen sind. Der Hohlzylinder (11) wiederum ist über ein schematisch dargestelltes Kardangelenk (12) drehbeweglich am Tastkopfgehäuse des Tastkopfes (5) befestigt. Das Kardangelenk kann beispielsweise als runde Blattfedermembran ausgestaltet sein, die durch entsprechende Aussparungen die entsprechende Drehbeweglichkeit ermöglicht. Eine entsprechende Bewegung in der mit dem Pfeil (X) bezeichneten Koordinatenrichtung ist in Figur 2c zu sehen. Die Bewegung des Taststiftes in der dritten Koordinatenrichtung (Richtung Y), die lotrecht zur Blattebene steht, erfolgt vollkommen analog zu Figur 2c.

Selbstverständlich ist auch der hier gezeigte Aufbau des messenden Tastkopfes (5) nur rein beispielhaft. Beispielsweise könnte die Mechanik zur beweglichen Lagerung des Taststiftes (6) auch drei nacheinander angeordnete Federparallelogramme aufweisen, die den Taststift (6) in den drei Koordinatenrichtungen linear führen.

Figur 3 zeigt eine rein schematische Darstellung der Verhältnisse eines Tastkopfes (5) gem. Figur 2a bis 2c mit einem von der Geometrie her verallgemeinerten Taststift (6). Der Taststift (6) muss hierbei natürlich nicht, wie in den Figuren 1 und 2a bis 2c gezeigt, ausschließlich in der mit dem Pfeil (Z) bezeichneten Richtung ausgerichtet sein, sondern kann auch eine andere Geometrie annehmen, beispielsweise als Sterntaster ausgebildet sein. Die Ausdehnungen des Taststiftes werden hierbei mit (l_x, l_y, l_z) bezeichnet. Die lineare elastische Nachgiebigkeit des Taststiftes (6) aufgrund der Blattfedern (13a bis 13c und 14a bis 14c) in der mit dem Pfeil (Z) bezeichneten Koordinatenrichtung wird hierbei mit (v_z) bezeichnet. Eine Auslenkung des Taststiftes (6) gegenüber dem Tastkopf (5) in der Koordinatenrichtung (Y) ergibt hingegen eine Rotation um die mit (X) bezeichnete Achse. Die sich diesbezüglich durch die betreffende Blattfedermembran (12) ergebende elastische Rotationsnachgiebigkeit wird mit (Φ_x) bezeichnet. Eine Auslenkung des Taststiftes (6) in der Koordinatenrichtung (X) ergibt eine Rotation um die mit (Y) bezeichnete Achse. Die sich diesbezüglich durch die betreffende Blattfedermembran (12) ergebende elastische Rotationsnachgiebigkeit wird mit (Φ_y) bezeichnet. Die betreffenden elektrischen Signale, die durch hier nicht näher dargestellte Sensoren aufgenommen werden, wie beispielsweise durch induktiv arbeitende

Sensoren, wie beispielsweise LVDTs (Linear Variable Differential Transformer) oder durch Inkrementalmaßstäbe oder durch Interferometer erfasst werden. Die betreffenden Signale werden durch die Bezugszeichen (u, v, w) bezeichnet. Die elektrischen Übertragungsfaktoren der Sensoren werden für den hier vorliegenden Fall linearer Sensorkennlinien mit (k_x, k_y, k_z) bezeichnet.

Es wird an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass in dem hier vorgestellten Ausführungsbeispiel ein Modell verwendet wird, bei dem die Auslenkungssignale ($s=\{u,v,w\}$) von den Sensoren im Tastkopf aufgrund linearer Sensorkennlinien erzeugt wurden. Die Sensorkennlinien können entweder bereits physikalisch linear sein oder durch Korrekturwerte linearisiert werden, die in einem vorgeschalteten Kalibriervorgang aufgenommen wurden.

Selbstverständlich ist die Erfindung jedoch nicht auf lineare Sensorkennlinien beschränkt. Alternativ können die mathematischen Modelle auch so abgewandelt werden, dass hiermit auch nichtlineare Sensorkennlinien verarbeitet werden können.

Mit (\mathbf{F}_M) ist hierbei die von der Tastkugel (14) auf das Werkstück (7) ausgeübte Messkraft bezeichnet. Die Messkraft kann hierbei ebenfalls unterschiedlich aufgebracht werden, beispielsweise durch Federn, die bei der Auslenkung des Taststiftes aus seiner Ruhelage gespannt werden oder durch induktiv arbeitende Tauchspulenantriebe, die in der betreffenden Koordinatenrichtung eine Kraft generieren. Mit (\mathbf{n}) ist hierbei die Flächennormale im Messpunkte bezeichnet, also die Normalenrichtung auf die Werkstückoberfläche in dem Punkt, in dem die Tastkugel (14) die Oberfläche des Werkstückes (7) berührt. Mit dem Bezugszeichen (k) ist der so genannter Reibungskegel bezeichnet. Dieser bezeichnet alle möglichen Ausrichtungen der Messkraft (\mathbf{F}_M) , die sich bei einer Antastung aufgrund der Reibungskraft zwischen der Tastkugel (14) und der Werkstückoberfläche prinzipiell ergeben können. Wäre die Reibung zwischen der Tastkugel (14) und dem Werkstück (7) Null, so müsste die Messkraft (\mathbf{F}_M) exakt entlang der Flächennormale (\mathbf{n}) ausgerichtet sein. Da dies jedoch aufgrund der tatsächlich existierenden Reibungskraft nicht der Fall ist, kann die

Messkraft (F_M) im Bereich des Reibungskegels (k) um die Flächennormale (\mathbf{n}) herum variieren.

Für einen derartigen Tastkopf gilt nunmehr, wie dies aus Figur 4 ersichtlich ist, in einem Koordinatenmessgerät gem. Figur 1 die nachfolgende Matrixgleichung:

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_G + \mathbf{A} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{p}_0 = \mathbf{p}_G + \mathbf{v} + \mathbf{p}_0 \quad (1)$$

Die in Gleichung (1) verwendeten Bezeichnungen haben folgende Bedeutung:

- \mathbf{p} tatsächliche Koordinaten $\{X_H, Y_H, Z_H\}$ eines Messpunktes (H) gemessen im Maschinenkoordinatensystem (X_M, Y_M, Z_M) des Koordinatenmessgerätes
- \mathbf{p}_G vom Koordinatenmessgerät durch Ablesen der Maßstäbe (8a bis 8c) ermittelte Messkoordinaten $\{X_G, Y_G, Z_G\}$ bis zu einem vordefinierten Punkt (I) im Bereich des Tastkopfes (5)
- \mathbf{p}_0 Offsetvektor von dem vordefinierten Punkt (I) im Bereich des Tastkopfes (5) zum Mittelpunkt der Tastkugel (14) in ihrer Ruhelage
- \mathbf{v} Auslenkungsvektor der Tastkugel (14) aus ihrer Ruhelage
- \mathbf{A} Tastermatrix
- \mathbf{s} Signalvektor $\{u, v, w\}$ der Sensoren im Tastkopf (5), die die Taststiftauslenkung des Taststiftes (6) messen

Wie aus Figur 4 zu sehen, wird in dem hier gezeigten Beispiel von der Tastkugel (14) die Kalibrierkugel (15) angetastet. Die strichlinierte Linie zeigt hierbei die Position des Taststiftes (6) und der hieran befestigten Tastkugel (14) in der Ruheposition, während die ausgezogene Darstellung den aufgrund der Antastung ausgelenkten Taststift (6) und die hieran befestigte Tastkugel (14) zeigt. Die tatsächlichen Koordinaten (X_H, Y_H, Z_H) eines Vektors (\mathbf{p}) zum Messpunkt (H) bestimmt im zentralen Maschinenkoordinatensystem (X_M, Y_M, Z_M) des Koordinatenmessgerätes ergibt sich, wie auch Gleichung (1) dies zeigt, durch die Summe des Vektors (\mathbf{p}_G), des Vektors (\mathbf{p}_0) und des Vektors (\mathbf{v}), der sich aus dem Produkt des Signalvektors (\mathbf{s}) und der Tastermatrix (\mathbf{A}) ergibt.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass der Vektor (**p**), der den Messpunkt (H) bezeichnet, zum Mittelpunkt der Tastkugel (14) zeigt. Der tatsächliche Vektor **p_J** (aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in Figur 4 zu sehen) zum Punkt (J), an dem die Tastkugel (14) das Werkstück (7) in einem späteren Messablauf berührt, bzw. hier die Kalibrierkugel (15) im Kalibriervorgang berührt, muss durch zusätzliche Addition eines hier nicht näher gezeigten Vektors geschehen, der sich aus der Multiplikation des Tastkugelradius (**r_t**) und dem Normalenvektor (**n**) (die im Berührungspunkt zwischen Tastkugel (14) und Werkstück (7) sich ergebende Normalenrichtung in der Werkstückoberfläche) ergibt, wie nachfolgende Gleichung 2 dies zeigt:

$$\mathbf{p}_J = \mathbf{p} + r_t \cdot \mathbf{n} \tag{2}$$

Die Tastermatrix (**A**), wie sie beispielhaft für den in Figur 2a bis 2c und Figur 3 dargestellten Tastkopf (5) erforderlich ist, ergibt sich hierbei wie folgt:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{k_x \cdot l_x^2 \cdot \Phi_y}{l_z \cdot v_z} & \frac{k_x(l_z^2 \cdot v_z \cdot \Phi_x + l_x^2 \cdot l_z^2 \cdot \Phi_x \cdot \Phi_y)}{l_z^3 \cdot v_z \cdot \Phi_x} & 0 \\ 0 & \frac{k_z \cdot l_x}{l_z} & 0 \\ \frac{k_y \cdot l_y^2 \cdot \Phi_x}{l_z \cdot v_z} & \frac{k_y(l_z^2 \cdot v_z \cdot \Phi_y + l_y^2 \cdot l_z^2 \cdot \Phi_x \cdot \Phi_y)}{l_z^3 \cdot v_z \cdot \Phi_y} & 0 \\ \frac{k_z \cdot l_y}{l_z} & & k_z \end{pmatrix}$$

Da die bestimmten Koordinaten eines Messpunktes in der Regel nur bis zum Mittelpunkt der Tastkugel (14) bestimmt werden, ist zur Bestimmung eines tatsächlich angetasteten Punktes auf der Werkstückoberfläche, wie oben bereits erläutert, zusätzlich noch der Radius (**r_t**) bzw. der Durchmesser (**d**) der Tastkugel (14) erforderlich.

Die hier beispielhaft für den Tastkopf (5) benannten 13 Unbekannten, nämlich die drei Komponenten des Offsetvektors (\mathbf{p}_0), neun Komponenten der Matrix (\mathbf{A}) sowie der Tastkugeldurchmesser (d_t) wurden in der Vergangenheit wie folgt bestimmt.

In einem ersten Schritt wird die Kalibrierkugel (15) in einer Vielzahl von Messpunkten $i=1..n$ angetastet, wobei aus den jeweils bestimmten Messkoordinaten $\mathbf{p}_{Gi}=\{X_{Gi}, Y_{Gi}, Z_{Gi}\}$ und den zugehörigen hierbei vom Tastkopf (5) gemessenen Signalvektoren $\mathbf{s}_i=\{u_i, v_i, w_i\}$ mittels geeigneter Kalibrieralgorithmen die betreffenden Parameter des Offsetvektors (\mathbf{p}_0), der Matrix (\mathbf{A}) sowie des Tastkugeldurchmessers (d_t) bestimmt werden. Durch diesen Tastkugeldurchmesser (d_t) bzw. den daraus ermittelten Tastkugelradius (r_t) kann dann in einem späteren Messablauf, wie oben beschrieben, unter Zuhilfenahme des Normaleneinheitsvektors (\mathbf{n}) der genaue Messpunkt (J) ermittelt werden.

Da bei der Messung die Tastkugel (14) das zu vermessene Werkstück (7) beziehungsweise im Falle der Kalibrierung, die Kalibrierkugel (15), grundsätzlich in Normalenrichtung angetastet, wird die Kalibrierung üblicherweise als Best-Fit-Routine nach Gauss mit dem Ziel der Minimierung der Fehlerquadratsumme der Normalabweichungen ($f_{n,i}^2$) zur Kalibrierkugel ausgeführt entsprechend nachfolgender Zielfunktion:

$$Q_1 = \sum f_{n,i}^2 \Rightarrow Min \quad (3)$$

Wie man sich leicht anhand von Figur 4 klar machen kann, liegen beim kalibrierten Tastkopf alle Messpunkte \mathbf{p}_i , mit $i=1..n$, wobei $n > 13$ auf einer Kugel mit dem Radius $r_{Ges} = r_k + r_t$, wobei (r_k) der Radius der Kalibrierkugel (15) ist und (r_t) der Radius der Tastkugel (14) ist. Mit dem Ortsvektor (\mathbf{p}_k) des Kugelmittelpunktes der Kalibrierkugel (15), der beispielsweise zu einem früheren Zeitpunkt eingemessen wurde, ergibt sich für einen Fehler ($f_{n,i}$), der in Gleichung (3) einzusetzen ist nachfolgendes:

$$\begin{aligned} f_{n,i} &= |\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_k| - (r_k + r_t) \\ &= |\mathbf{p}_{Gi} + \mathbf{p}_0 + \mathbf{A} \mathbf{s}_i - \mathbf{p}_k| - (r_k + r_t) \end{aligned} \quad (4)$$

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der Index (i) in der Anmeldung einen Laufindex darstellt und jeweils den i-ten Messpunkt mit $i=1..n$ bezeichnet.

Es zeigt sich jedoch, dass die Auflösung des zugehörigen Normalgleichungssystems mit dem üblichen Lösungsverfahren nicht möglich ist, da die Matrix des Normalgleichungssystems singular ist. Auch robusten Quadratmittlungsverfahren, beispielsweise nach Householder, liefern nur in Ausnahmefällen eine Lösung. Die Ursache für diese Singularität liegt darin begründet, dass in der Tastermatrix (A) drei Koeffizienten enthalten sind, die nur für die Taststiftauslenkung tangential zur Oberfläche der Kalibrierkugel (15) im Berührungspunkt zuständig sind. Diese Tangentialkomponenten werden aber von der Zielfunktion gemäß Gleichung (3) nicht, oder nur klein von 2. Ordnung, erfasst, sodass das Normalgleichungssystem aus Gleichung (3) letztlich prinzipiell unbestimmt ist. Im Fall von herkömmlichen Tastköpfen mit drei rechtwinklig angeordneten Geradfürungen (z. B. Parallelfederführungen) mit weitgehend übereinstimmender Steifigkeit und linearen Sensoren ist diese Singularität in der Vergangenheit nicht aufgetreten. In erfindungsgemäßer Weise wird deshalb die Tastermatrix (A) so geändert, dass wenigstens ein Teil der Parameter speziell Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben, die tangential zur Werkstückoberfläche im Berührungspunkt stehen. Dazu wird die Tastermatrix wie folgt in zwei Komponenten aufgeteilt:

$$A_{sym} = 0,5 (A + A^T) \quad (5)$$

$$A_{anti} = 0,5 (A - A^T) \quad (6)$$

A^T ist hierin die Transponierte Matrix von A. Hierdurch ergeben sich nachfolgende Matrizen:

$$A_{sym} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \quad A_{anti} = \begin{pmatrix} 0 & b_{12} & b_{13} \\ -b_{12} & 0 & b_{23} \\ -b_{13} & -b_{23} & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

die nach unterschiedlichen Zielfunktionen zu bestimmen sind. Zwischen den beiden Matrizen A_{sym} und A_{anti} und der Tastermatrix A besteht folgender Zusammenhang:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_{sym} + \mathbf{A}_{anti} \quad (8)$$

Diese beiden Komponenten der Tastermatrix sind:

- die symmetrische Tastermatrix \mathbf{A}_{sym} , die im Zusammenwirken mit den elastischen Eigenschaften des Tasters die Komponente der Tasterauslenkung beschreibt, die normal zur Werkstückoberfläche im Berührungspunkt (J) steht, und
- die antisymmetrische Tastermatrix \mathbf{A}_{anti} , die letztlich als Rotationsmatrix Komponenten der Tasterauslenkung bewirkt, die tangential zur Werkstückoberfläche im Berührungspunkt (J) steht.

Mit der Zielfunktion nach Gleichung (3) können nur die Koeffizienten der Matrix \mathbf{A}_{sym} eindeutig bestimmt werden. Da die antisymmetrische Matrix (\mathbf{A}_{anti}) nur Tangentialkomponenten der Auslenkung bewirkt, muss somit zur Bestimmung der antisymmetrischen Matrix eine weitere Zielfunktion eingeführt werden.

Im Fall von Tastköpfen mit drei orthogonalen Geradföhrungen mit weitgehend übereinstimmender Steifigkeit und linearen Sensoren sind die antisymmetrischen Koeffizienten $\{b_{12}, b_{13}, b_{23}\}$ vernachlässigbar klein. Nur in diesem Sonderfall war die Kalibrierung eines Tastkopfes auf der Grundlage der üblichen Gaußschen Zielfunktion (Q_1) stabil lösbar.

Eine Zielfunktion für die zweite Matrix (\mathbf{A}_{anti}) läßt sich nicht unmittelbar aus den Meßwerten ableiten, da ja die tangentialen Verschiebungen der Tastkugel (14) auf der Kalibrierkugel (15) weder nach Größe noch nach Richtung genau bekannt sind und des weiteren durch die Reibung ohnehin unbestimmt sind. Es müssen also andere Bedingungen eingeführt werden, die sowohl die elastischen als auch alle anderen Eigenschaften des Tastkopfes (5) (Übertragungskoeffizienten und Anordnung der Signalwandler) bei der Antastung der Kalibrierkugel (15) einschließen.

Grundlage für die Ableitung der Zielfunktion für die Tangentialabweichungen ist darin zu sehen, dass sich im Idealfall im Berührungspunkt (J) der Meßkraftvektor (\mathbf{F}_M) in Normalenrichtung zur Meßfläche einstellt und damit hinsichtlich seiner Richtung bekannt ist.

Natürlich gilt dies nur näherungsweise, da die Messkraft (\mathbf{F}_M), wie bereits oben beschrieben, nicht exakt normal zur Werkstückoberfläche im Berührungspunkt (J) steht, sondern irgendwie innerhalb des Reibungskegels (k). Der Auslenkvektor $\mathbf{v} = \{v_x, v_y, v_z\}$ schließt im allgemeinen Fall einen Winkel (ϵ) mit dem Kraftvektor (\mathbf{F}_M) ein (siehe Figur 5), der Werte annehmen kann, die wesentlich größer als der Reibungskegel (k) sind und fast 90° annehmen können, so dass zwangsläufig eine Tangentialkomponente (\mathbf{v}_t) des Auslenkvektors (\mathbf{v}) entsteht, die im allgemeinen Fall stets ungleich Null ist.

Diese Tangentialkomponente (\mathbf{v}_t) liegt in der Tangentialebene und kann als Vektorprodukt $\mathbf{v}_t = \mathbf{v} \times \mathbf{n}$ von Auslenkvektor (\mathbf{v}) und Normalenvektor (\mathbf{n}) berechnet werden. Dabei kann das Vektorprodukt (\mathbf{v}_t) auch als Momentenvektor des Vektors (\mathbf{v}) mit dem Hebelarm (e) interpretiert werden. Für ein linear elastisches System gilt nun die Tatsache, dass dieser Vektor (\mathbf{v}_t) im Mittel über alle Punkte der antastbaren Hälfte der Kalibrierkugel gerade den Nullvektor ergibt

$$\int_{\text{Halbkugel}} \mathbf{v}_t \, dA = (0 \quad 0 \quad 0)^T \quad (9)$$

Im Falle antisymmetrischer Zusatzglieder in der Matrix (A) verbleibt im Mittel der folgende Ausdruck

$$\int_{\text{Halbkugel}} \mathbf{v}_t \, dA = \frac{4\pi}{3} (-b_{23} \quad b_{13} \quad -b_{12})^T \quad (10)$$

Näherungsweise gilt die Gleichung (9) auch dann, wenn die Kalibrierkugel in hinreichend vielen und gleichmäßig über der Halbkugel verteilten Punkten mit gleicher Kraft angetastet wird.

$$\sum (\mathbf{v} \times \mathbf{n}) \approx 0 \quad (11)$$

Aus dieser Bedingung läßt sich nun eine zweite Zielfunktion für die Bestimmung der drei Koeffizienten $\{b_{12}, b_{13}, b_{23}\}$ der antisymmetrischen Matrix wie folgt ableiten:

- Meßbedingung:
Bei der Kalibrierung sind an der Kalibrierkugel hinreichend viele Punkte gleichverteilt über eine Halbkugel zu messen;
- Ausgleichsbedingung und Zielfunktion:
Die Summe der Momente der Auslenkvektoren um die drei Achsen der

Kalibrierkugel müssen sich zu Null summieren, oder (näherungsweise) die Summe der Quadrate der Momente um die drei Achsen müssen ein Minimum ergeben.

Daraus folgen die beiden sinnvollen Zielfunktionen Q_2 und Q_3 für die gesuchten Koeffizienten.

$$Q_2 = \sum \mathbf{v}_i \times \mathbf{n}_i \Rightarrow 0 \quad (12)$$

$$Q_3 = \sum (\mathbf{v}_i \times \mathbf{n}_i)^2 \Rightarrow \text{Min} \quad (13)$$

mit

\mathbf{v}_i i-ter Auslenkvektor der Tastkugel (14)

\mathbf{n}_i i-ter Normalenvektor zur Kalibrierkugel (15) durch den i-ten Meßpunkt

Die vorstehenden Erläuterungen machen deutlich, dass beide Zielfunktionen nur Näherungslösungen für die Koeffizienten $\{b_{12}, b_{13}, b_{23}\}$ liefern können, und dass sie nur im Grenzfall sehr vieler und gleichmäßig verteilter Messpunkte eine vollständige Lösung liefern. Die Entscheidung zwischen den beiden möglichen Zielfunktionen (dabei ist Q_2 der korrekte Ansatz) sowie für die Anzahl und Anordnung der Meßpunkte auf der Kalibrierkugel (15) ist aus experimentellen Ergebnissen abzuleiten.

Zur numerischen Realisierung der Tasterkalibrierung sind die Tasterparameter nach den beiden Zielfunktionen Q_1 und Q_2 bzw. Q_3 iterativ in einer Optimierungsrechnung zu verbessern, bis die Verbesserungen der Matrixkoeffizienten hinreichend klein sind. Ergebnis sind dann sowohl die neun Koeffizienten der Tastermatrix (\mathbf{A}), der Tastkugeldurchmesser (d) sowie die Position (\mathbf{p}_0) des Tasteroffsets.

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Messung von Messwerten auf einem Werkstück (7) mit einem Koordinatenmessgerät, das einen messenden Tastkopf (5) mit einem auslenkbaren Taststift (6) aufweist, wobei das Koordinatenmessgerät unter Verwendung von Parametern (A) eine lineare oder nichtlineare Abbildung (Transformation) der vom messenden Tastkopf (5) bestimmten Auslenkungssignale (s) in ein Koordinatensystem (X_M, Y_M, Z_M) des Koordinatenmessgerätes durchführen kann, wobei wenigstens ein Teil dieser Parameter (A_{anti}) Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben, die tangential zur Werkstückoberfläche im Berührungspunkt stehen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Parameter (A_{anti}), die die tangentialen Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben, eine Matrix bilden, insbesondere eine Rotationsmatrix.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei zur Bestimmung der Parameter (A_{anti}), die die tangentialen Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben, wenigstens eine der beiden nachfolgenden Zielfunktionen Q_2 oder Q_3 erfüllt wird:
 - Zielfunktion $Q_2 = \sum \mathbf{v}_i \times \mathbf{n}_i \Rightarrow 0$ oder
 - Zielfunktion $Q_3 = \sum (\mathbf{v}_i \times \mathbf{n}_i)^2 \Rightarrow Min$
 wobei hierin bedeuten:
 - \mathbf{v}_i = Auslenkvektor der Tastkugel (14) im Messpunkt
 - \mathbf{n}_i = Normalenvektor im Berührungspunkt der Tastkugel beim Messen
4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die Messpunkte, die zum Lösen wenigstens einer der genannten Zielfunktionen (Q_2 und/oder Q_3) verwendet werden durch Abtasten mindestens eines Halbkreises an einem Kalibrierkörper (15) aufgenommen werden.
5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei die abgetasteten Messpunkte so aufgenommen werden, dass diese gleichmäßig über den abgetasteten Halbkreis oder ggf. über die abgetastete Halbkugel verteilt sind.

6. Verfahren nach Anspruch 4, wobei der Kalibrierkörper ein Kalibrierring oder eine Kalibrierkugel (15) ist.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zur Abbildung der Auslenkungssignale (s) zusätzlich Parameter (A_{sym}) verwendet werden, die Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben, die normal zur Werkstückoberfläche im Berührungspunkt stehen.

8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die Parameter (A_{sym}), die die normalen Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben, ebenfalls eine Matrix bilden, und die in bekannter Weise mit der Gaußschen Ausgleichsbedingung aus der folgende Zielfunktion zu bestimmen sind.

$$\text{- Zielfunktion } Q_1 = \sum f_{n,i}^2 \Rightarrow \text{Min}$$

wobei $f_{n,i}$ die Normalabweichungen, also die Abweichungen in normal auf die Werkstückoberfläche stehender Richtung im Berührungspunkt bezeichnen

9. Koordinatenmessgerät mit einem messenden Tastkopf und einem hieran beweglich befestigten Taststift (6), und einer Steuer- und Auswerteeinheit (9), wobei in der Steuer- und Auswerteeinheit (9) Parameter (A) gespeichert sind, über die die Steuer- und Auswerteeinheit (9) eine lineare oder nichtlineare Abbildung (Transformation) der vom messenden Tastkopf (5) bestimmten Auslenkungssignale (s) in ein Koordinatensystem (X_M, Y_M, Z_M) des Koordinatenmessgerätes berechnen kann, wobei wenigstens ein Teil dieser Parameter (A_{anti}) Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben, die tangential zur Werkstückoberfläche im Berührungspunkt stehen.

10. Koordinatenmeßgerät nach Anspruch 9, wobei die in der Steuer- und Auswerteeinheit (9) gespeicherten Parameter (A_{anti}), die die tangentialen Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben eine Matrix bilden, insbesondere eine Rotationsmatrix.

11. Koordinatenmeßgerät nach Anspruch 9 oder 10, wobei die Steuer- und Auswerteeinheit (9) zur Bestimmung der Parameter (A_{anti}), die die tangentialen Komponenten der

Taststiftauslenkung beschreiben wenigstens eine der beiden nachfolgenden Zielfunktionen Q_2 oder Q_3 erfüllen kann:

- Zielfunktion $Q_2 = \sum v_i \times n_i \Rightarrow 0$ oder

- Zielfunktion $Q_3 = \sum (v_i \times n_i)^2 \Rightarrow Min$

wobei hierin bedeuten:

v_i = Auslenkvektor der Tastkugel im Messpunkt der Tastkugel

n_i = Normalenvektor im Berührungspunkt der Tastkugel beim Messen

12. Koordinatenmeßgerät nach Anspruch 11, wobei die Steuer- und Auswerteeinheit (9) das Koordinatenmessgerät zur Aufnahme der Messwerte so steuert, dass die zum Lösen wenigstens einer der genannten Zielfunktionen (Q_1 und/oder Q_2) notwendigen Messpunkte durch Abtasten wenigstens eines Halbkreises an einem Kalibrierkörper (15) aufgenommen werden.

13. Koordinatenmeßgerät nach Anspruch 12, wobei die Steuer- und Auswerteeinheit (9) das Koordinatenmessgerät zur Aufnahme der Messwerte so steuert, dass diese gleichmäßig über den abgetasteten Halbkreis bzw. der Halbkugel verteilt sind.

14. Koordinatenmessgerät nach Anspruch 12, wobei der Kalibrierkörper ein Leerring oder eine Kalibrierkugel (15) ist.

15. Koordinatenmessgerät nach einem der vorhergehenden Ansprüche 9 bis 14, wobei zur Abbildung der Auslenkungssignale (s_i) zusätzlich Parameter (A_{sym}) verwendet werden, die Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben, die normal zur Werkstückoberfläche im Berührungspunkt stehen.

16. Koordinatenmessgerät nach Anspruch 15, wobei die Parameter (A_{sym}), die die normalen Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben, ebenfalls eine Matrix bilden.

17. Koordinatenmessgerät nach Anspruch 15 oder 16, wobei die Parameter (A_{sym}) in bekannter Weise mit der Gaußschen Ausgleichsbedingung aus der folgende Zielfunktion zu bestimmen sind.

- Zielfunktion $Q_1 = \sum f_{n,i}^2 \Rightarrow \text{Min}$

wobei $f_{n,i}$ die Normalabweichungen, also die Abweichungen in normal auf die Werkstückoberfläche stehender Richtung im Berührungspunkt bezeichnen

18. Computerprogrammprodukt, das direkt in den internen Speicher einer digitalen Steuer- und Auswerteeinheit (9) eines Koordinatenmessgerätes geladen werden kann und Softwarecodeabschnitte umfasst, mit denen unter Verwendung von Parametern (A) eine lineare Abbildung von Messwerten (s) eines messenden Tastkopf (5) des Koordinatenmessgerätes in ein Koordinatensystem (X_M, Y_M, Z_M) des Koordinatenmessgerätes durchgeführt werden können, wobei wenigstens ein Teil der hierbei verwendeten Parameter (A_{anti}) Komponenten der Taststiftauslenkung beschreiben, die tangential zur Werkstückoberfläche im Berührungspunkt stehen.

19. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 18, wobei dieses zusätzlich Softwarecodeabschnitte umfasst, über die das Koordinatenmessgerät so betrieben werden kann, dass das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 2 bis 5 oder 7 oder 8 ausgeführt wird.

20. Maschinenlesbarer Datenträger mit einem Computerprogrammprodukt nach Anspruch 18 oder 19.

1/5

FIG.1

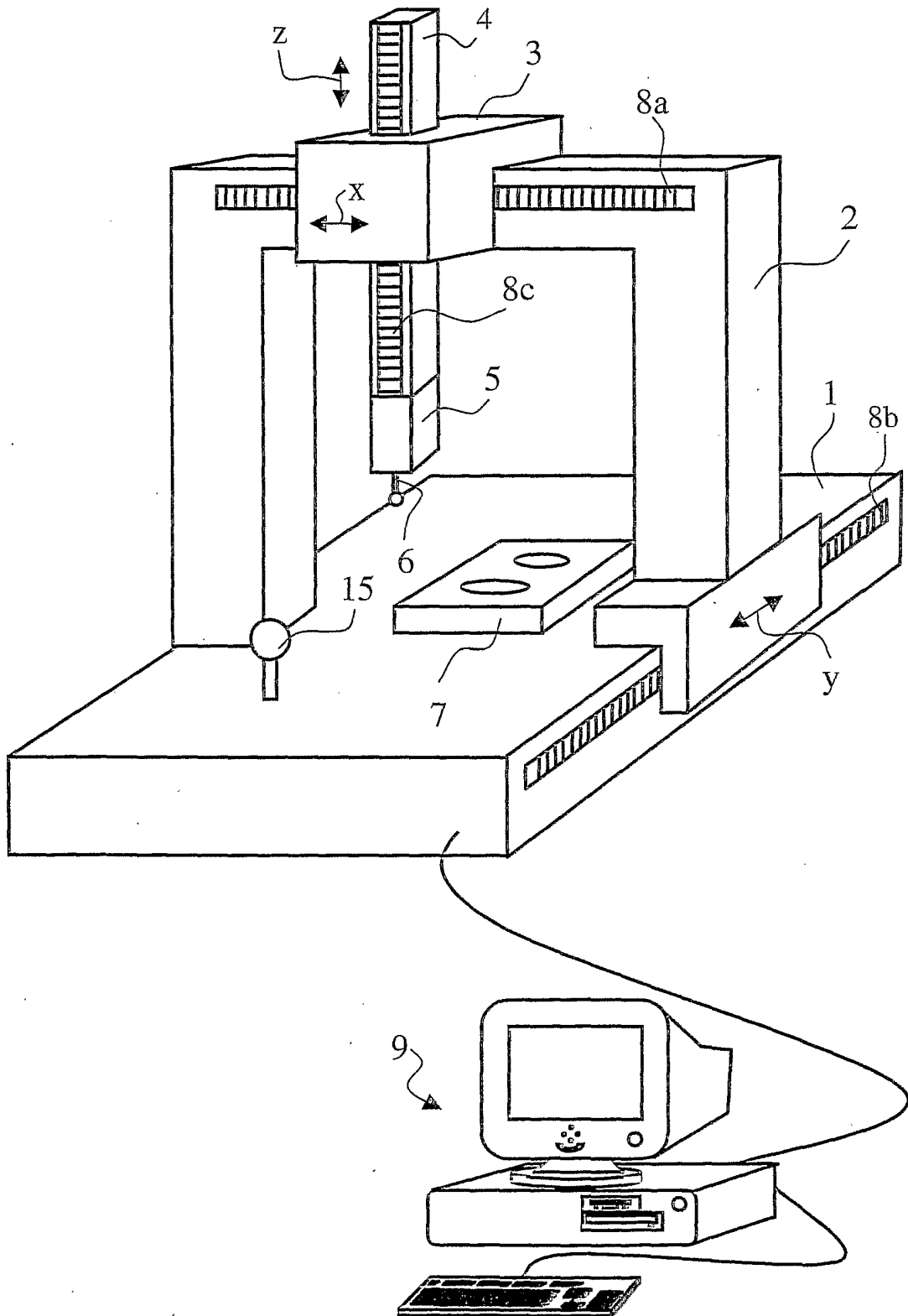


FIG.2a

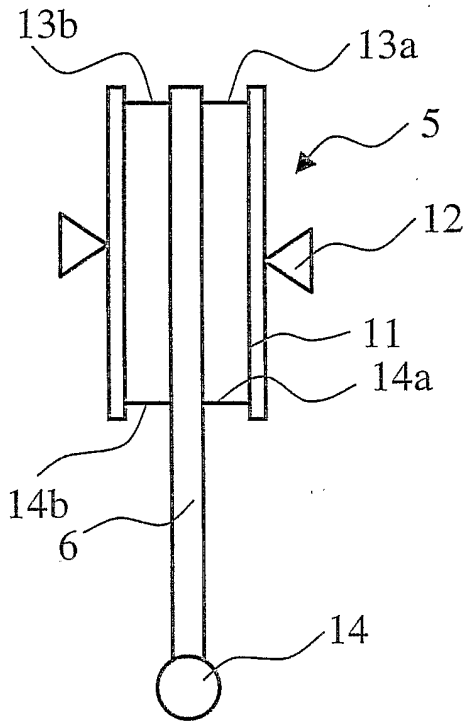


FIG.2b

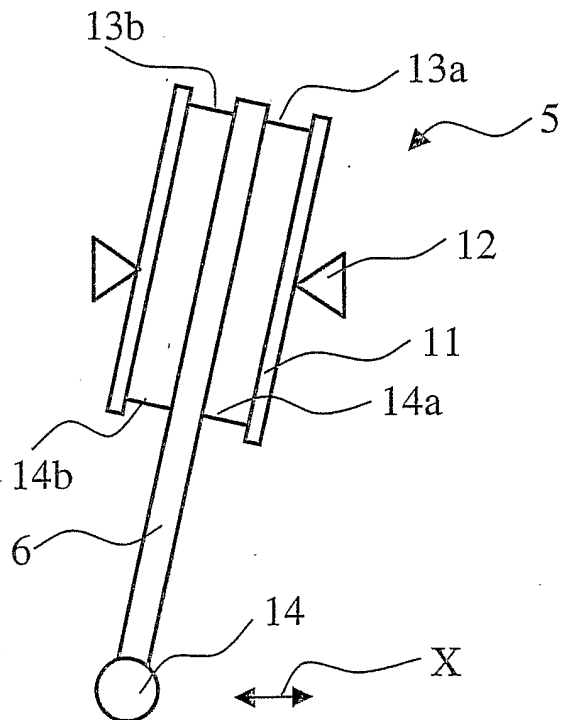
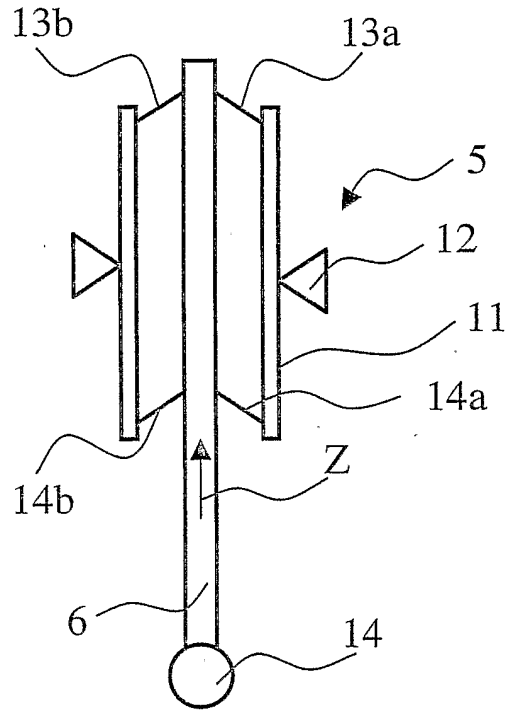


FIG.2c

FIG.3

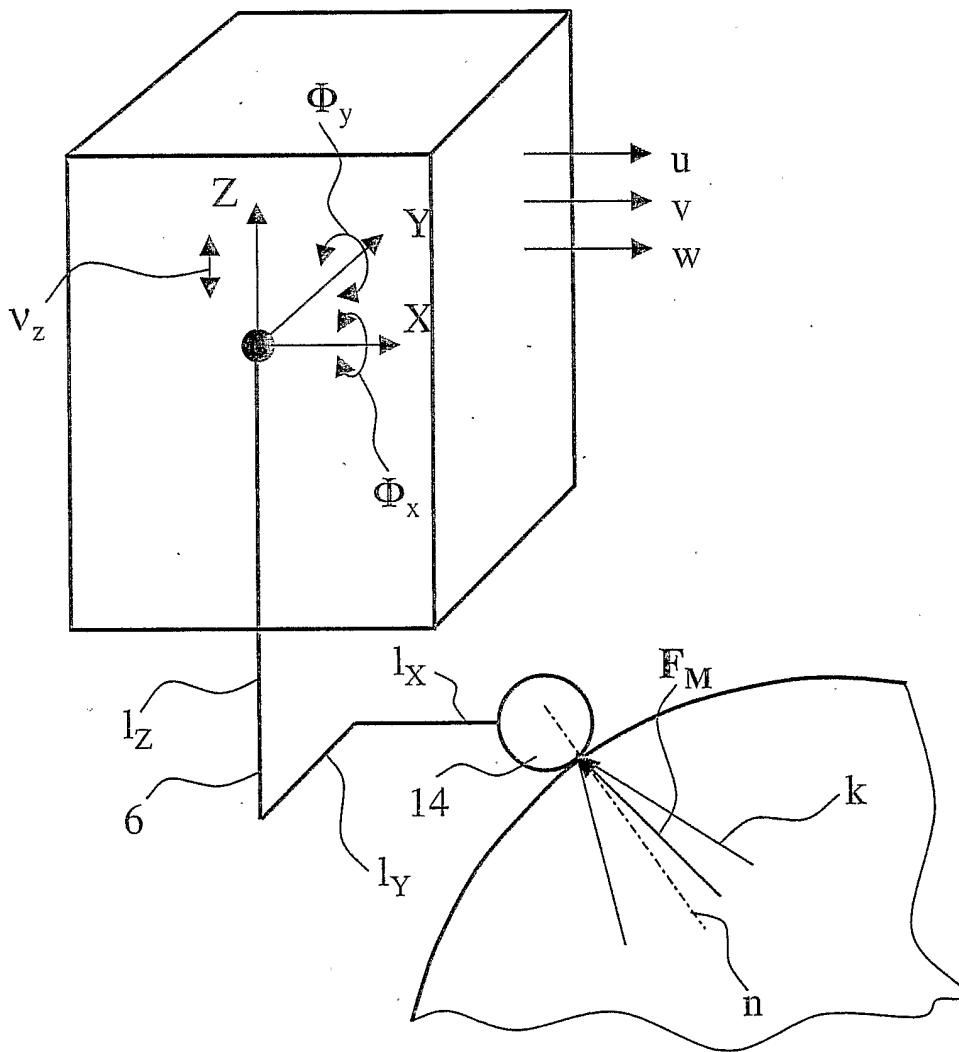


FIG.4

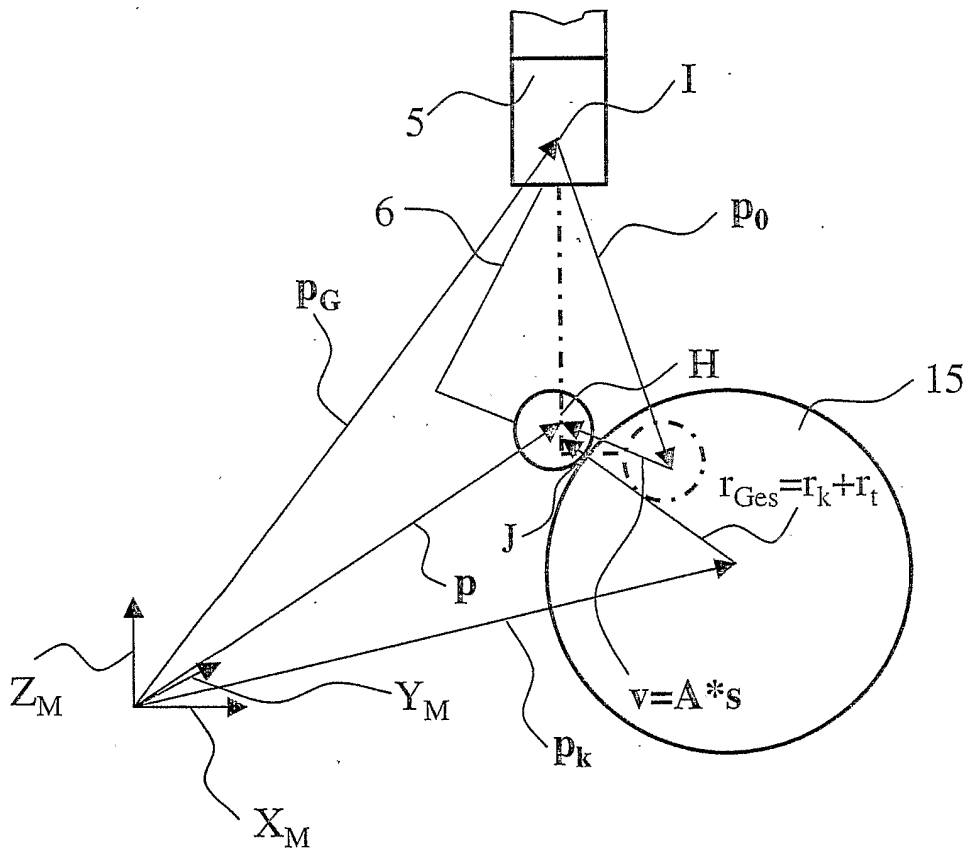
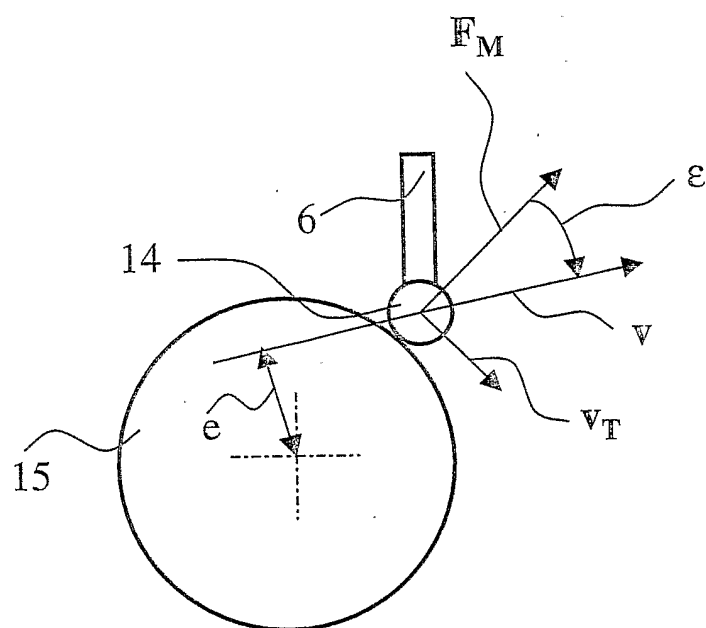


FIG.5



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2004/004805

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 G01B21/04

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 G01B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)
EPO-Internal, PAJ, WPI Data, COMPENDEX

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 00/25087 A (RENISHAW PLC ;SUTHERLAND ALEXANDER TENNANT (GB); WRIGHT DAVID ALLA) 4 May 2000 (2000-05-04) page 4, line 4 -page 10, line 28	1-20
A	US 6 434 846 B1 (WRIGHT DAVID A ET AL) 20 August 2002 (2002-08-20) column 2, line 15 -column 7, line 10; figures 1-4	1-20
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 006, no. 225 (P-154), 10 November 1982 (1982-11-10) & JP 57 127805 A (OOSAKA KIKOU KK), 9 August 1982 (1982-08-09) abstract	1-20

Further documents are listed in the continuation of box C. Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 30 August 2004	Date of mailing of the international search report 07/09/2004
--	---

Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Beyfuß, M
--	--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No
PCT/EP2004/004805

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 0025087	A	04-05-2000	AT 215216 T 15-04-2002
			DE 69901097 D1 02-05-2002
			DE 69901097 T2 29-08-2002
			EP 1051596 A1 15-11-2000
			WO 0025087 A1 04-05-2000
			JP 2002528709 T 03-09-2002
			US 2003009257 A1 09-01-2003
US 6434846	B1	20-08-2002	EP 1086356 A1 28-03-2001
			WO 0062015 A1 19-10-2000
			JP 2002541469 T 03-12-2002
			US 2002174555 A1 28-11-2002
			US 2004055170 A1 25-03-2004
JP 57127805	A	09-08-1982	NONE

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2004/004805

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES IPK 7 G01B21/04		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) IPK 7 G01B		
Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, PAJ, WPI Data, COMPENDEX		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie°	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	WO 00/25087 A (RENISHAW PLC ;SUTHERLAND ALEXANDER TENNANT (GB); WRIGHT DAVID ALLA) 4. Mai 2000 (2000-05-04) Seite 4, Zeile 4 -Seite 10, Zeile 28 ---	1-20
A	US 6 434 846 B1 (WRIGHT DAVID A ET AL) 20. August 2002 (2002-08-20) Spalte 2, Zeile 15 -Spalte 7, Zeile 10; Abbildungen 1-4 ---	1-20
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 006, no. 225 (P-154), 10. November 1982 (1982-11-10) & JP 57 127805 A (OOSAKA KIKOU KK), 9. August 1982 (1982-08-09) Zusammenfassung -----	1-20
<input type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen		
<input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie		
° Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erschellen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte-Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte-Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche 30. August 2004		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts 07/09/2004
Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Beyfuß, M

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/004805

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 0025087	A	04-05-2000	AT 215216 T	15-04-2002
			DE 69901097 D1	02-05-2002
			DE 69901097 T2	29-08-2002
			EP 1051596 A1	15-11-2000
			WO 0025087 A1	04-05-2000
			JP 2002528709 T	03-09-2002
			US 2003009257 A1	09-01-2003
US 6434846	B1	20-08-2002	EP 1086356 A1	28-03-2001
			WO 0062015 A1	19-10-2000
			JP 2002541469 T	03-12-2002
			US 2002174555 A1	28-11-2002
			US 2004055170 A1	25-03-2004
JP 57127805	A	09-08-1982	KEINE	