



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 19 219 T2 2005.09.22**

(12)

## Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 086 356 B1**

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: **G01B 21/04**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 19 219.9**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/GB00/01315**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 919 028.1**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 00/62015**

(86) PCT-Anmeldetag: **07.04.2000**

(87) Veröffentlichungstag

der PCT-Anmeldung: **19.10.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **28.03.2001**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **06.04.2005**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **22.09.2005**

(30) Unionspriorität:

**9907868                      08.04.1999                      GB**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**DE, GB, IT**

(73) Patentinhaber:

**Renishaw plc, Wotton-under-Edge,  
Gloucestershire, GB**

(72) Erfinder:

**MCMURTRY, Roberts, David, Gloucestershire  
GL12 7EF, GB; SUTHERLAND, Tennant,  
Alexander, Edinburgh EH13 0NA, GB; WRIGHT,  
Allan, David, Edinburgh EH13 0DL, GB**

(74) Vertreter:

**Manitz, Finsterwald & Partner GbR, 80336  
München**

(54) Bezeichnung: **VERFAHREN ZUR KALIBRIERUNG EINES SCAN-SYSTEMS**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

**Beschreibung**

**[0001]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Kalibrieren eines Abtastsystems. Unter einem Abtastsystem wird in dieser Beschreibung eine Kombination aus einer Maschine und einem Tastkopf verstanden, die zusammen beim Abtasten eines Gegenstandes verwendet werden können, um Informationen über seine Größe, seine Form oder seine Oberflächenkonturen zu erhalten. Die Maschine kann eine Koordinaten-Messmaschine (CMM) oder ein Roboter sein, wobei der Tastkopf ein analoger Tastkopf ist, der einen Taster besitzen kann, der mit einem Werkstück in Kontakt treten kann, oder der Tastkopf kann ein berührungsloser Tastkopf sein. Die Maschine besitzt Messvorrichtungen, um die Bewegung der Maschinenteile in drei nominell orthogonalen Richtungen (die als die X-, Y- und Z-Achsen bezeichnet werden) zu messen, wobei der Tastkopf Messwertgeber enthält, um Ausgaben zu erzeugen, die die Ablenkung des Tastkopfes in drei nominell orthogonalen Richtungen (die als die a-, b- und c-Achsen bezeichnet werden) angeben.

**[0002]** Allgemein bezieht sich die vorliegende Erfindung auf ein Verfahren zum dynamischen Kalibrieren eines Abtastsystems, wodurch Fehler in dem System, die erzeugt werden, wenn ein Gegenstand mit verschiedenen Abtastgeschwindigkeiten (und folglich mit verschiedenen Beschleunigungen) abgetastet wird, ohne die Notwendigkeit, den Tastkopf selbst zu kalibrieren, kartiert werden können.

**[0003]** Es sind Verfahren zum Korrigieren von Maschinen für durch Beschleunigung induzierte Fehler bekannt.

**[0004]** Ein Beispiel eines derartigen Verfahrens ist im europäischen Patent Nr. 318557 beschrieben. Bei diesem Verfahren wird ein erster Gegenstand von einem Posten nominell völlig gleicher Gegenstände mit einer relativ niedrigen Geschwindigkeit abgetastet, wobei die Messungen der Positionen einer Anzahl von Bezugspunkten auf dem Gegenstand aufgezeichnet werden. Die Abtastoperation wird mit einer relativ schnellen Geschwindigkeit wiederholt, wobei die Messungen der Positionen derselben Punkte aufgezeichnet werden. Jede Differenz in den Messungen wird in einer Korrekturtabelle als Fehler aufgezeichnet.

**[0005]** Danach werden alle Gegenstände mit der relativ schnellen Geschwindigkeit abgetastet, wobei Messungen der Positionen der entsprechenden Punkte an jedem Gegenstand vorgenommen werden, wobei diese Messungen für die Maschinenbeschleunigungen unter Verwendung der vorher aufgezeichneten Fehler korrigiert werden.

**[0006]** Dieses Verfahren erfordert, dass der Tast-

kopf genau kalibriert worden ist, bevor die Messungen vorgenommen werden, wobei es über Maschinenfehler außer über dynamische Ablenkungen keine Rechenschaft ablegt.

**[0007]** Ein weiteres Beispiel eines derartigen Verfahrens ist im US-Patent Nr. 5,594,668 beschrieben. Dieses Patent offenbart das Abtasten einer Ringlehre mit verschiedenen Geschwindigkeiten und folglich verschiedenen Beschleunigungen der Maschinen-Gleitstücke und das Bestimmen der Differenzen in den gemessenen X-, Y-Werten mehrerer Bezugspunkte als eine Funktion der Beschleunigungskomponenten der Maschine in den X- und Y-Richtungen. Diese Messungen werden wiederholt, wobei die Ringlehre an mehreren verschiedenen Stellen in der Maschinenhülle der Maschine positioniert ist, wobei ein Satz von Korrekturdaten für die nachfolgende Korrektur der Messungen der Werkstücke gespeichert wird.

**[0008]** Dieses Verfahren erzeugt eine Karte der Korrekturen anhand einer genau bekannten Lehre mit einer symmetrischen Form, es erzeugt aber nicht notwendigerweise ein Ergebnis, das auf ein unsymmetrisches Werkstück anwendbar ist, wobei es die Oberflächenbeschaffenheit oder verschiedene Werkstoffe nicht berücksichtigt.

**[0009]** Es ist festgestellt worden, dass, wenn ein Tastkopf verwendet wird, der einen mit dem Werkstück in Kontakt tretenden Taster besitzt, der Schlupf des Tasters auf der Oberfläche, die für die Kalibrieren verwendet wird, eine Quelle signifikanter Fehler in den Messungen der Positionen der Punkte auf der Oberfläche sein kann, die als die Bezugspunkte verwendet werden, was zu Fehlern in den Kalibrierungs-/Korrekturdaten führt.

**[0010]** Die Fehler treten auf, weil die einfache Korrelation, die zwischen der Maschinenverschiebung und der Tasterablenkung des Tastkopfes angenommen wird, durch den Schlupf des Tasters zerstört wird.

**[0011]** Der Schlupf des Tasters tritt auf, wenn aus welchem Grund auch immer die Tastkraftkomponente in einer Richtung in der Ebene der berührten Oberfläche ansonsten das Produkt der Kraftkomponente in der Richtung normal zu Oberfläche und dem effektiven Reibungskoeffizienten überschreiten würde. Eine derartige Situation kann sich aus einem oder mehreren Gründen ergeben, die befohlene Maschinenrichtung kann z. B. nicht genau normal zur berührten Oberfläche sein und/oder die Maschinenungenauigkeiten können dazu führen, dass sich die Maschine nicht genau in der befohlene Richtung bewegt, und/oder die Tastkopfungenauigkeiten (oder die Tastkopf-Konstruktion) können verursachen, dass sich die Tastkraftkomponente von der Richtung

der Tastkopfablenkung unterscheidet.

**[0012]** Die vorliegende Erfindung schafft ein Verfahren zum Kalibrieren eines Abtastsystems, in dem die Wirkungen des durch die Tastkopf- und/oder Maschinenungenauigkeiten verursachten Schlupfs des Tasters minimiert sind.

**[0013]** Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zum Kalibrieren eines Abtastsystems geschaffen, wobei das Verfahren die Schritte umfasst, dass:

- a) der Tastkopf zu einer Oberfläche eines Gegenstandes in einer Richtung, die nominell normal zu der Oberfläche liegt, zu einer Anzahl (N) spezifischer Bezugspunkte an der Oberfläche bewegt wird,
- b) nur die Komponenten der Maschinenbewegungen und Tastkopfausgaben, die normal zu der Oberfläche an diesen Punkten sind, verwendet werden, wobei eine Bestimmung der Positionen von jedem der Bezugspunkte unter Nullfehlerbedingungen des Tastkopfes und Nullträgheitskräften an der Maschine durchgeführt wird,
- c) die Oberfläche des Gegenstandes bei einer Vielzahl verschiedener Geschwindigkeiten jedes Mal, wenn die Bezugspunkte nominell durchlaufen werden, mehrere Male abgetastet wird,
- d) die Komponenten der Maschinenbewegungen und Tastkopfausgaben, die normal zu der Oberfläche sind, verwendet werden, wobei weitere Bestimmungen der scheinbaren Positionen von jedem der (N) Bezugspunkte durchgeführt werden und jede Differenz in der normalen Richtung von den bei Schritt b) bestimmten Positionen für jede Geschwindigkeit aufgezeichnet wird,
- e) aus den bei Schritt d) aufgezeichneten Differenzen die höchste Abtastgeschwindigkeit identifiziert wird, bei der die Änderungen in den Messungen der Positionen der Bezugspunkte, die während jeder Abtastung aufgezeichnet wurden, innerhalb einer vorbestimmten Toleranz bleiben,
- f) die identifizierte Geschwindigkeit und die Differenzen in der Messung bei dieser Geschwindigkeit gespeichert werden.

**[0014]** In einer bevorzugten Ausführungsform besitzt der Tastkopf einen ablenkbaren Taster mit einer Tasterspitze, um mit der Oberfläche in Kontakt zu treten.

**[0015]** Das Verfahren gemäß der bevorzugten Ausführungsform der Erfindung basiert auf zwei Theorien. Die Erste ist, dass es keinen Schlupf des Tasters in den Richtungen normal zur Oberfläche des Gegenstandes geben kann. Jeder Schlupf des Tasters muss parallel zu Oberfläche sein. Die Zweite ist, dass die obenerwähnten Tastkopfungenauigkeiten vernachlässigbar werden, wenn die Tastkopfablenkung null ist.

**[0016]** Folglich sind durch die Verwendung nur der Komponenten der Maschinenbewegung und der Tasterablenkung, die zur Oberfläche normal sind, und das Bestimmen dieser Werte, wenn sich der Taster gerade mit der Oberfläche in Kontakt befindet, aber nicht abgelenkt wird, die resultierenden Messungen der Bezugspunkte ohne Tastkopffehler und ohne Fehler, die auf den Schlupf des Tasters zurückzuführen sind.

**[0017]** Die Bestimmung der Position jedes Bezugspunktes zum Zeitpunkt, zu dem sich die Tasterspitze gerade mit der Oberfläche des Gegenstandes in Kontakt befindet, kann ausgeführt werden, indem der Tastkopf in die Oberfläche gesteuert wird und die Komponenten der Maschinenbewegungen und der Tastkopfablenkungen, die zur Oberfläche normal sind, synchron aufgezeichnet werden, bis die Tastkopfablenkung eine vorgegebene Grenze erreicht. Die aufgezeichneten Werte werden dann zurück-extrapoliert, um die Position der Maschine in der Richtung normal zur Oberfläche zu bestimmen, wenn sich der Taster gerade mit der Oberfläche in Kontakt befindet.

**[0018]** Alternativ und bevorzugt wird der Tastkopf in die Oberfläche gesteuert, bis die Tasterablenkung eine vorgegebene Grenze erreicht, wobei sie dann mit einer bekannten und gesteuerten niedrigen Geschwindigkeit umgekehrt wird. Während der Umkehrung werden die Komponenten der Maschinenbewegungen und der Tastkopfablenkungen normal zu Oberfläche synchron aufgezeichnet, bis der Taster die Oberfläche verlässt. Die aufgezeichneten Werte werden dann extrapoliert, um die Position der Maschine in der Richtung normal zur Oberfläche zu bestimmen, wenn der Taster gerade die Oberfläche verlassen hat. Dies ist effektiv dieselbe wie die Position, wenn der Taster gerade die Oberfläche berührt hat.

**[0019]** Während des Abtastschritts werden die Ausgaben der Messwertgeber des Tastkopfes in den a-, b- und c-Achsen unter Verwendung einer Tastkopf-Transformationsmatrix in inkrementale Werte von X, Y und Z transformiert.

**[0020]** Sobald durch dieses Verfahren die maximale Abtastgeschwindigkeit festgestellt worden ist, kann eine Karte der Fehler in der Richtung normal zu Oberfläche an den (n) Punkten zusammen mit den Daten bezüglich der Abtastgeschwindigkeit, des speziellen Gegenstandes oder Merkmals, der speziellen CMM und des Ortes und der Orientierung der Teile in der CMM, der speziellen Tastkopf- und Tasterkonfiguration und der verwendeten Tastkopfmatrix und der verwendeten nominellen Tastkopfablenkung gespeichert werden.

**[0021]** Anstatt des Speicherns dieser Daten im Maschinen-Computer, möglicherweise zusammen mit

vielen anderen Fehlerkarten für andere Werkstücke, können gemäß einem neuartigen Merkmal der Erfindung diese Daten außerhalb der Maschine als Teil des einem Werkstück zugeordneten Teilprogramms oder in Verbindung mit dem einem Werkstück zugeordneten Teilprogramm gespeichert werden. Ein Teilprogramm ist das Software-Programm, das in den Computer der Messmaschine geladen wird, wenn ein Werkstück zu messen ist, und das der Messmaschine sowohl die Einzelheiten des zu messenden Werkstücks als auch die durch die Maschine auszuführenden Bewegungen, um die erforderlichen Messungen auszuführen, identifiziert.

**[0022]** Um Maschinenfehler zu vermeiden, die die Genauigkeit der Ergebnisse beeinflussen, ist es bevorzugt, die Fehlerkartierung der Maschine vorzunehmen und die Tasterspitze bezüglich ihres Durchmessers und ihrer Position bezüglich der Achse der Maschinenspindel zu qualifizieren. Folglich umfasst gemäß einem weiteren Merkmal der vorliegenden Erfindung ein Verfahren zum dynamischen Kalibrieren eines Abtastsystems die Schritte, dass: das System statisch fehlerkartiert wird, der Durchmesser der Tasterspitze und ihre Position bezüglich des Tastkopfes unter Verwendung einer Bezugskugel bestimmt wird, die Positionen einer Vielzahl von Bezugspunkten an einer Oberfläche eines Gegenstandes bestimmt werden, wenn der Tastkopftaster in Kontakt mit der Oberfläche ist und wenn zumindest die Komponente der Tasterablenkung normal zu der Oberfläche Null ist, die Oberfläche des Gegenstandes bei einem Durchgang durch die Bezugspunkte bei einer Nenn-tasterablenkung und bei der maximalen Geschwindigkeit abgetastet wird, bei der die Ergebnisse innerhalb einer gegebenen Toleranz wiederholbar sind, die Positionen der Bezugspunkte, die mit einer Null-normalablenkung des Tasters bestimmt wurden, von den Positionen der Bezugspunkte subtrahiert werden, die während des Abtastschrittes erzeugt wurden, um die Messfehler, die auf den Abtastprozess in der Richtung normal zu der Oberfläche bei der Nennablenkung zurückführbar sind, zu bestimmen, und die Fehlerwerte zur nachfolgenden Korrektur der Messungen gespeichert werden, die an einem ähnlichen Gegenstand bei der gleichen Geschwindigkeit und Ablenkung gemacht werden.

**[0023]** Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung werden nun spezieller unter Bezugnahme auf die beigefügte Zeichnung beschrieben, worin:

**[0024]** [Fig. 1](#) ein Abtastsystem veranschaulicht, das einen Tastkopf enthält, der an der Hohlwelle einer CMM angebracht ist, an der ein Abtast-Tastkopf in der Position zum Messen einer Bohrung in einem Werkstück befestigt ist,

**[0025]** [Fig. 2](#) das Prinzip der Beziehung zwischen

der radialen Position der CMM und der Radialablenkung des Tasters des Tastkopfes während eines Messschritts des Verfahrens der Erfindung veranschaulicht,

**[0026]** [Fig. 3](#) die Ausgaben bezüglich der a- und b-Achsen eines unvollkommenen Tastkopfes veranschaulicht, wenn die Maschine während des Messschritts rückwärts gefahren wird, und

**[0027]** [Fig. 4a](#) und [Fig. 4b](#) jeweils die tatsächlich ausgegebenen Komponenten des Tastkopf-Verschiebungsvektors in den geschätzten Radial- und Tangentialrichtungen, wenn die Richtung der Bewegung der CMM nicht genau radial ist, im Vergleich zu den Ausgaben, wenn die Radialkomponente genau radial ist, veranschaulichen.

**[0028]** In [Fig. 1](#) ist ein Tastkopf **1** gezeigt, der an einer Maschinen-Hohlwelle **10** befestigt ist. Der Tastkopf trägt einen Messtastkopf **2**, der einen Taster **3** mit einer Tasterkugel **4** an seinem freien Ende besitzt. Der Taster ist mit einer Bohrung in einem Werkstück **5** in Kontakt gezeigt. Die Bohrung besitzt einen Nennradius  $R$ , wobei sich ihr Mittelpunkt  $O$  in einer nominalen Position  $X_c$ ,  $Y_c$  und  $Z_c$  in den Koordinaten der Maschinenachsen befindet. Die Tasterkugel besitzt einen Radius  $r$ , der vorgegeben ist.

**[0029]** Ist es bevorzugt, dass einige vorbereitende Schritte unternommen werden, um die besten Ergebnisse vom vorliegenden Verfahren zu erhalten. Die Maschine mit dem angebrachten Tastkopf wird z. B. vorzugsweise durch herkömmliche Mittel, z. B. Laser-Interferometrie, fehlerkartiert, sodass die Maschinenfehler aus den Ergebnissen heraus kalibriert werden können. Der Tastkopf sollte außerdem im Voraus bezüglich der Größe (des Durchmessers) der Tasterspitze unter Verwendung einer bekannten Eignungsprozedur an einer Bezugskugel qualifiziert werden.

**[0030]** Als der erste Schritt im Kalibrierungsverfahren kann für den Tastkopf in seinem freien Zustand eine "Nullstellung vorgenommen" werden. Dies umfasst einfach das Ermitteln der Ablesungen der Messwertgeber des Tastkopfes, wenn der Taster keinen Kontakt hat oder keine Trägheitskraft auf den Taster wirkt, und das Setzen dieser in allen drei Achsen auf null, oder alternativ das Speichern dieser Ablesungen, sodass sie von allen nachfolgenden Ablesungen subtrahiert werden können. Es wird angegeben, dass es notwendig sein kann, dass mehrere Abmessungen ermittelt und gemittelt werden, um das Rauschen, die Schwingungen usw. der Maschine zu berücksichtigen.

**[0031]** In einem weiteren Schritt kann eine Schätzung der Position des Mittelpunkts der Bohrung in den X-, Y- und Z-Koordinaten vorgenommen werden, indem die Messungen der Punkte an wenigstens drei

Positionen um die Oberfläche vorgenommen werden, aus denen die Position des Mittelpunkts in bekannter Weise berechnet werden kann, und indem eine relevante vorgegebene Tastkopf-Transformationsmatrix als ein Anfangspunkt verwendet wird, um die a-, b-, c-Ausgaben des Tastkopfes in die X-, Y-, Z-Koordinaten der Maschine umzusetzen. Dieser Schritt kann nützlich sein, weil der nächste Schritt des Kalibrierungsverfahrens erfordert, dass der Kontakt mit der Bohrung hergestellt wird, während die Maschine in einer Richtung gesteuert wird, die sich so nahe wie möglich an der Radialrichtung befindet. Es ist jedoch nicht wichtig, dass zu diesem Zeitpunkt die Position des Mittelpunkts des Kreises genau bekannt ist. Dieser Schritt kann deshalb nicht notwendig sein, insbesondere falls die Nennposition, -größe und -Orientierung der Bohrung ausreichend genau sind.

**[0032]** Wie oben erklärt worden ist, tritt jeder Schlupf in der lokalen Ebene der Oberfläche auf. Folglich besitzt er eine Nullkomponente in der wahren Radialrichtung und nur eine sehr kleine Komponente in der annähernden Radialrichtung. Außerdem sind, sobald die Nullstellung der Ausgaben der Messvorrichtungen im Tastkopf vorgenommen worden ist oder die Ausgaben der Messvorrichtungen mit dem Tastkopf in seinem nicht abgelenkten Zustand kalibriert worden sind, alle mit dem Taster in seinem nicht abgelenkten Zustand vorgenommenen Tastkopfmessungen im Wesentlichen ohne Tastkopffehler.

**[0033]** Weil es normalerweise nicht möglich ist, alle Messungen direkt vorzunehmen, wenn der Taster gerade mit einer Oberfläche in Kontakt getreten ist und bevor der Taster abgelenkt worden ist, und irgendeine Tasterablenkung unvermeidlich ist, macht die Erfindung von dem in der europäischen Patentbeschreibung Nr. 599513 beschriebenen Verfahren des Extrapolierens der XY- und Z-Ablesungen der Maschine zurück zu dem Punkt, an dem die Ablesungen der Tastkopfablenkungen null sind, Gebrauch, jedoch mit einigen hinzugefügten neuartigen Verfeinerungen.

**[0034]** Weil die Richtung der Tastkopfablenkung nominell bekannt ist (d. h., sie sollte das Gegenteil der Richtung der Bewegung der Maschine sein) und vorausgesetzt, dass eine angemessen genaue Tastkopf-Transformationsmatrix zum Umsetzen der Ausgaben der a-, b-, c-Tastkopfablenkung in inkrementale X-, Y-, Z-Koordinaten bereitgestellt werden kann, kann die angenäherte Radialkomponente der Tastkopfablenkung für jede Berührung berechnet werden. Deshalb wird, wenn ein Kreis in einer Bohrung in einem Teil zum ersten Mal gemessen wird, für jede Berührung um den Kreis eine erste Schätzung der Radialrichtung vom Mittelpunkt des Kreises zum anvisierten Berührungspunkt vorgenommen. Diese Bestimmung kann aus der angenäherten Mittelpunktposition vorgenommen werden, die im oben umrisse-

nen vorbereitenden Schritt festgestellt worden ist.

**[0035]** Gemäß dem Verfahren der Erfindung wird der Taster des Tastkopfes mit der Oberfläche der Bohrung in einer Richtung, die nominell normal zu Oberfläche der Bohrung ist, in Kontakt getrieben, bis eine vorgegebene Tasterablenkung erreicht ist. Die Größe dieser Ablenkung ist einfach durch die Notwendigkeit bestimmt, ausreichend Daten zu erhalten, um einen guten Nullpunkt zu erhalten.

**[0036]** Wie oben beschrieben worden ist, wird, sobald die erforderliche Ablenkung des Tasters erreicht worden ist, die Maschine rückwärts gefahren, während gleichzeitig die Ausgaben der Messvorrichtungen der Maschine und der Messwertgeber im Tastkopf aufgezeichnet werden..

**[0037]** Dieser Prozess wird für eine Anzahl anderer Punkte um die Oberfläche der Bohrung wiederholt, es werden z. B. wenigstens neun, aber bevorzugt fünfzig oder mehr genommen, um eine angemessene Verteilung um die Oberfläche zu erreichen.

**[0038]** Dann wird für jede Berührung unter Verwendung der Tastkopf-Transformationsmatrix die nominelle Radialkomponente der Tastkopfablenkung gegen die nominelle Radialkomponente der Maschinenbewegung berechnet. Dies ergibt zwei Folgen von Punkten in etwa geraden Linien, die durch einen Übergangsabschnitt verbunden sind, wenn die Taster Spitze die Oberfläche verlässt (der als eine überkritisch gedämpfte Tastkopfantwort in [Fig. 2](#) veranschaulicht ist), wobei für jede Folge eine Gerade der besten Anpassung berechnet wird. Um die Genauigkeit der Berechnung der Gerade der besten Anpassung zu verbessern, werden die Punkte im Übergangsbereich in der Nähe des Schnittpunkts vorzugsweise weggelassen.

**[0039]** Die in dem Verfahren verwendete genaue Kontaktposition ist als der Schnittpunkt zwischen diesen zwei Geraden definiert. Die erste Linie besitzt nominell den Anstieg eins, der die Normalkomponente der Tastkopfablenkung gegen die Normalkomponente der Maschinenbewegung ist. In einer idealen Situation sollten diese zwei Komponenten eine 1-zu-1-Beziehung besitzen. Die zweite Gerade besitzt den Anstieg null, wobei sie die Tastkopfablenkung, nachdem der Taster die Oberfläche verlassen hat (d. h. null für einen Tastkopf mit völliger Nullstellung), gegen die Normalkomponente der Maschinenbewegung ist. Die genauen Kontaktpositionen für jeden der Punkte um die Bohrung werden in den Maschinenkoordinaten als die  $(X_0, Y_0, Z_0)$ -Positionen bezeichnet.

**[0040]** In dem Fall, dass die befohlenen Radialrichtungen fehlerhaft sind, kann es nützlich sein, wie folgt zu iterieren: Aus dem neu erfassten Satz der  $(X_0, Y_0,$

$Z_0$ )-Positionen kann ein neuer "wirklicher" Mittelpunkt des Kreises berechnet werden, wobei eine neue Radialrichtung für jede Berührung bestimmt werden kann (d. h. vom wirklichen Mittelpunkt zu jeder der  $(X_0, Y_0, Z_0)$ -Positionen). Die neuen Radialkomponenten der Tastkopfablenkung werden berechnet, es werden neue  $(X_0, Y_0, Z_0)$ -Punkte festgestellt und es wird ein neuer Mittelpunkt festgestellt, wobei dieser Prozess fortgesetzt wird, bis die Änderungen annehmbar klein werden.

**[0041]** Während jedoch die Normalkomponente bezüglich der Oberfläche des Gegenstandes (radial im obigen Beispiel, wenn eine Bohrung gemessen wird) in den XY- und Z-Koordinaten der Maschine leicht festgestellt werden kann, wie oben beschrieben worden ist, gilt dasselbe nicht notwendigerweise für die Tastkopfausgaben, es sei denn, sowohl die Tastkopf-Ausführung als auch die Tastkopf-Konstruktion als auch die Tastkopf-Transformationsmatrix sind sehr genau. Fehler können die in den [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) veranschaulichte Situation verursachen, in denen zu sehen ist, dass eine typische Folge der nominalen Radialkomponenten der Tastkopfablenkung nicht notwendigerweise eine Gerade bildet, was teilweise auf ein Anhaften/einen Schlupf des Tasters auf der Oberfläche zurückzuführen ist. Selbst die Verwendung einer Schätzung einer Gerade der besten Anpassung durch die Punkte kann signifikante Fehler im wahren Schnittpunkt verursachen. Folglich besteht als eine Alternative zur oben beschriebenen Analysetechnik, um einen neuen Mittelpunkt festzustellen, eine alternative Technik, die entsprechend einem neuartigen Merkmal der Erfindung verwendet werden kann, darin, die graphische Darstellung der Radialablenkung des Tastkopfes nach den Fehlern der Geradlinigkeit, die in [Fig. 4](#) veranschaulicht sind, zu analysieren und die Richtung (in 3D) zu drehen, bis die graphische Darstellung einen minimalen Fehler der Geradlinigkeit besitzt.

**[0042]** Dies kann ausgeführt werden, indem von fast jeder Orientierung der Tastkopf-Transformationsmatrix oder jeder nicht radialen Sondierungs-Richtung unter Verwendung eines Algorithmus begonnen wird, der die angesammelten Daten nach der 3D-Richtung des maximalen Anstiegs in der Tastkopfablenkung gegen die graphische Darstellung der Radialposition der Maschine überprüft, ungeachtet der scheinbaren Richtung der Tastkopfablenkung. Die Geradlinigkeit dieser graphischen Darstellung wird bewertet. Falls der Fehler kleiner als eine vorgegebene Toleranz ist, während sich der Anstieg ausreichend genau bei eins befindet, ergibt die Extrapolation dieser Linie zur Linie mit dem Anstieg null den Schnittpunkt mit der erforderlichen Genauigkeit. Wenn der Fehler der Geradlinigkeit übermäßig ist, dann sucht der Algorithmus nach einer weiteren Richtung, die gerader erscheint und dennoch den erforderlichen Anstieg besitzt. Je gerader die Linie erhalten wird, desto genau-

er normal muss die Richtung sein, und desto genauer ist die Extrapolation.

**[0043]** Der oben beschriebene Messprozess erzeugt genaue Messungen der Positionen der Bezugspunkte, die minimale Tastkopffehler enthalten, ungeachtet des Schlupfs des Tastkopfes, der auf die CMM- und/oder Tastkopffehler zurückzuführen ist. Aus diesen Messungen können der Mittelpunkt und der Radius der Bohrung genau bestimmt werden.

**[0044]** Sobald die Positionen der Bezugspunkte genau bestimmt worden sind, kann die letzte Stufe der Kalibrierung unternommen werden.

**[0045]** Die Bohrung wird mehrmals mit einer vorgegebenen endlichen Tasterablenkung des Tastkopfes und mit einer relativ niedrigen Geschwindigkeit abgetastet, was sichert, dass der Taster des Tastkopfes dieselben 50 oder mehr Bezugspunkte durchläuft.

**[0046]** Während des Abtastschritts werden die Ausgaben der Messwertgeber des Tastkopfes in den a-, b- und c-Achsen unter Verwendung der Tastkopf-Transformationsmatrix, auf die oben Bezug genommen worden ist, in inkrementale Werte von X, Y und Z transformiert.

**[0047]** Die Differenzen zwischen den Messungen der Positionen der Bezugspunkte, die während der Abtastungen erhalten worden sind, und den Bezugsmessungen werden von Abtastung zu Abtastung aufgezeichnet.

**[0048]** Die Abtastbewegungen nominell durch die Bezugspunkte werden mit der gleichen Nenntasterablenkung und mit immer größeren Geschwindigkeiten wiederholt, bis die Variation der aufgezeichneten Differenzen in den Messungen zwischen zwei Abtastungen mit der gleichen Geschwindigkeit bezüglich einer definierten Toleranz übermäßig wird. Die letzte Geschwindigkeit, mit der die Variation in den Differenzen in die definierte Toleranz fällt, wird als die maximale Abtastgeschwindigkeit aufgezeichnet.

**[0049]** Es ist selbstverständlich, dass der Abtastprozess mit einer hohen Geschwindigkeit begonnen werden und abhängig von den Ergebnissen mit einer höheren oder niedrigeren Geschwindigkeit wiederholt werden kann.

**[0050]** Sobald in dieser letzte Stufe die maximale Abtastgeschwindigkeit festgestellt worden ist, wird eine Karte der Positionsfehler an den Bezugspunkten zusammen mit den Daten bezüglich der Abtastgeschwindigkeit, des speziellen Gegenstandes oder Merkmals, der speziellen CMM, der speziellen Tastkopf- und Tasterkonfiguration und der verwendeten Tastkopfablenkung und der verwendeten Tastkopfmatrix gespeichert.



**[0051]** Diese Karte und die zugeordneten Daten können im Computer der Maschine oder außerhalb der Maschine als Teil des Teilprogramms bezüglich des spezifischen Werkstücks gespeichert werden.

**[0052]** Aus dieser Karte ist es dann möglich, zu interpolierten, um die radialen Fehler bei den Winkeln zwischen den Radialrichtungen zu erhalten, in denen die wirklichen Daten erhalten worden sind.

**[0053]** Die Variationen im Reibungskoeffizienten zwischen der Tasterspitze und dem Werkstück können die Messgenauigkeit beeinflussen. Falls es wahrscheinlich ist, dass die Fehler signifikant sind, ist es möglich, den tatsächlichen Reibungskoeffizienten zu messen, z. B. durch das Vergleichen der Richtung des Ablenkungsvektors des Tastkopfes mit der aus dem geometrischen Ort der gemessenen Punkte bestimmten Richtung der Oberflächennormalen. Das Vorzeichen und die Skalierung der erforderlichen Messkompensation, die durch die Änderungen im Reibungskoeffizienten erforderlich ist, können im Voraus bestimmt werden, z. B. durch das Abtasten in zwei verschiedenen Richtungen.

**[0054]** Es ist zu sehen, dass das Verfahren der Erfindung die Notwendigkeit vermeidet, den Tastkopf separat zu kalibrieren, wobei folglich Zeit und Kosten bei der Entwicklung von Algorithmen für eine schnellere und genauere Systemleistung gespart werden.

**[0055]** Für den Maschinenbenutzer gibt es außerdem signifikante Zeitersparnisse durch das Integrieren der Tastkopf-Kalibrierung, der statischen und dynamischen Kartierung des Tastkopfes und der dynamischen Kartierung der CMM in eine (automatische) Operation, wobei schließlich mit schnelleren Geschwindigkeiten abgetastet werden kann.

**[0056]** Obwohl die Erfindung unter Bezugnahme auf das Abtasten eines Kreises innerhalb einer Bohrung, was ein zweidimensionales Problem ist, beschrieben worden ist, ist das Verfahren allgemeiner anwendbar, wobei es verwendet werden kann, um andere Gegenstände oder Merkmale abzutasten, einschließlich Ebenen oder dreidimensionaler Gegenstände.

**[0057]** Obwohl die Bedienungspersonen der CMMs normalerweise wünschen, die Gegenstände mit der höchsten Abtastgeschwindigkeit abzutasten, gibt es außerdem keinen Grund, weshalb die mit den verschiedenen Abtastgeschwindigkeiten aufgezeichneten Datenkarten nicht gespeichert werden sollten, um zu ermöglichen, dass Korrekturen an den mit anderen Geschwindigkeiten aufgenommenen Abtastdaten vorgenommen werden.

**[0058]** Die ersten Schritte im Verfahren, d. h. das Feststellen der Bezugspunkte, sind unter Bezugnahme auf einen Tastkopf mit einem Taster, der mit ei-

nem Werkstück in Kontakt tritt, beschrieben worden.

**[0059]** Falls ein berührungsloser Tastkopf verwendet wird, müssen die genauen Bezugspunkte unter Verwendung der Nullfehlerbedingungen des Tastkopfes und der Nullträgheitskräfte an der Maschine, z. B. bei konstanter Geschwindigkeit, festgestellt werden.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Kalibrieren eines Abtastsystems, das eine Messmaschine und einen Tastkopf umfasst, wobei das Verfahren die Schritte umfasst, dass:

- a) der Tastkopf zu einer Oberfläche eines Gegenstandes in einer Richtung, die nominell normal zu der Oberfläche liegt, zu einer Anzahl (N) spezifischer Bezugspunkte an der Oberfläche bewegt wird,
- b) nur die Komponenten der Maschinenbewegungen und Tastkopfausgaben, die normal zu der Oberfläche an diesen Punkten sind, verwendet werden, wobei eine Bestimmung der Positionen von jedem der Bezugspunkte unter Nullfehlerbedingungen des Tastkopfes und Nullträgheitskräften an der Maschine durchgeführt wird,
- c) die Oberfläche des Gegenstandes bei einer Vielzahl verschiedener Geschwindigkeiten jedes Mal, wenn die Bezugspunkte nominell durchlaufen werden, mehrere Male abgetastet wird,
- d) die Komponenten der Maschinenbewegungen und Tastkopfausgaben, die normal zu der Oberfläche sind, verwendet werden, wobei weitere Bestimmungen der scheinbaren Positionen von jedem der (N) Bezugspunkte durchgeführt werden und jede Differenz in der normalen Richtung von den bei Schritt b) bestimmten Positionen für jede Geschwindigkeit aufgezeichnet wird,
- e) aus den bei Schritt d) aufgezeichneten Differenzen die höchste Abtastgeschwindigkeit identifiziert wird, bei der die Änderungen in den Messungen der Positionen der Bezugspunkte, die während jeder Abtastung aufgezeichnet wurden, innerhalb einer vorbestimmten Toleranz bleiben,
- f) die identifizierte Geschwindigkeit und die Differenzen in der Messung bei dieser Geschwindigkeit gespeichert werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Tastkopf einen ablenkbaren Taster mit einer Tasterspitze aufweist, die mit der Oberfläche in Kontakt treten kann.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die Bestimmung der Positionen von jedem der Bezugspunkte in dem Augenblick durchgeführt wird, bei dem die Tasterspitze gerade in Kontakt mit der Oberfläche ist.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die Position der Punkte in dem Augenblick, wenn sich die Tasterspitze gerade in Kontakt mit der Oberfläche befindet,

dadurch bestimmt wird, dass die Bewegung des Tasters zu der Oberfläche hin über den Punkt hinaus, bei dem der Taster einen ersten Kontakt mit der Oberfläche herstellt, über eine vorbestimmte Distanz fortgesetzt wird, während synchron dazu die Maschinenpositionen und die Tastkopfablenkungen in Intervallen gespeichert werden, und anschließend die gespeicherten Positionen und Ablenkungen zurückextrapoliert werden, um die Maschinenposition zu bestimmen, bei der die Tastkopfablenkung das erste Mal Null war.

den, um die Messfehler, die auf den Abtastprozess in der Richtung normal zu der Oberfläche bei der Nennablenkung zurückführbar sind, zu bestimmen, und die Fehlerwerte zur nachfolgenden Korrektur der Messungen gespeichert werden, die an einem ähnlichen Gegenstand bei der gleichen Geschwindigkeit und Ablenkung gemacht werden.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

5. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die Position der Punkte in dem Augenblick, wenn sich die Taster Spitze gerade in Kontakt mit der Oberfläche befindet, dadurch bestimmt wird, dass die Bewegung des Tasters zu der Oberfläche hin über den Punkt hinaus, an dem der Taster einen ersten Kontakt mit der Oberfläche herstellt, über eine vorbestimmte Distanz fortgesetzt wird, wobei anschließend die Bewegung umgekehrt wird, während synchron die Maschinenpositionen und die Tastkopfablenkungen in Intervallen gespeichert werden, bis der Tastkopf den Kontakt mit der Oberfläche verliert, und anschließend die gespeicherten Positionen und Ablenkungen zurückextrapoliert werden, um die Maschinenposition zu bestimmen, bei der die Tastkopfablenkung das erste Mal Null war.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner mit den zusätzlichen Schritten, dass die Maschine des Abtastsystems statisch fehlerkartiert wird und die Maschinenfehler, die zur Korrektur der Abtastdaten erhalten werden, gespeichert werden.

7. Verfahren zum dynamischen Kalibrieren eines Abtastsystems nach Anspruch 2, mit den Schritten, dass:

die Maschine des Abtastsystems statisch fehlerkartiert wird, der Durchmesser der Taster Spitze und ihre Position bezüglich des Tastkopfes unter Verwendung einer Bezugskugel bestimmt wird, wobei Schritt (b) von Anspruch 1 umfasst:

dass die Positionen einer Vielzahl von Bezugspunkten an einer Oberfläche des Gegenstandes bestimmt werden, wenn der Tastkopftaster in Kontakt mit der Oberfläche ist und wenn zumindest die Komponente der Tasterablenkung normal zu der Oberfläche Null ist, und wobei die Schritte (c) – (f) von Anspruch 1 umfassen, dass:

die Oberfläche des Gegenstandes bei einem Durchgang durch die Bezugspunkte bei einer Nenntasterablenkung und bei der maximalen Geschwindigkeit abgetastet wird, bei der die Ergebnisse innerhalb einer gegebenen Toleranz wiederholbar sind, die Positionen der Bezugspunkte, die mit einer Nullnormalablenkung des Tasters bestimmt wurden, von den Positionen der Bezugspunkte subtrahiert werden, die während des Abtastschrittes erzeugt wur-



Anhängende Zeichnungen

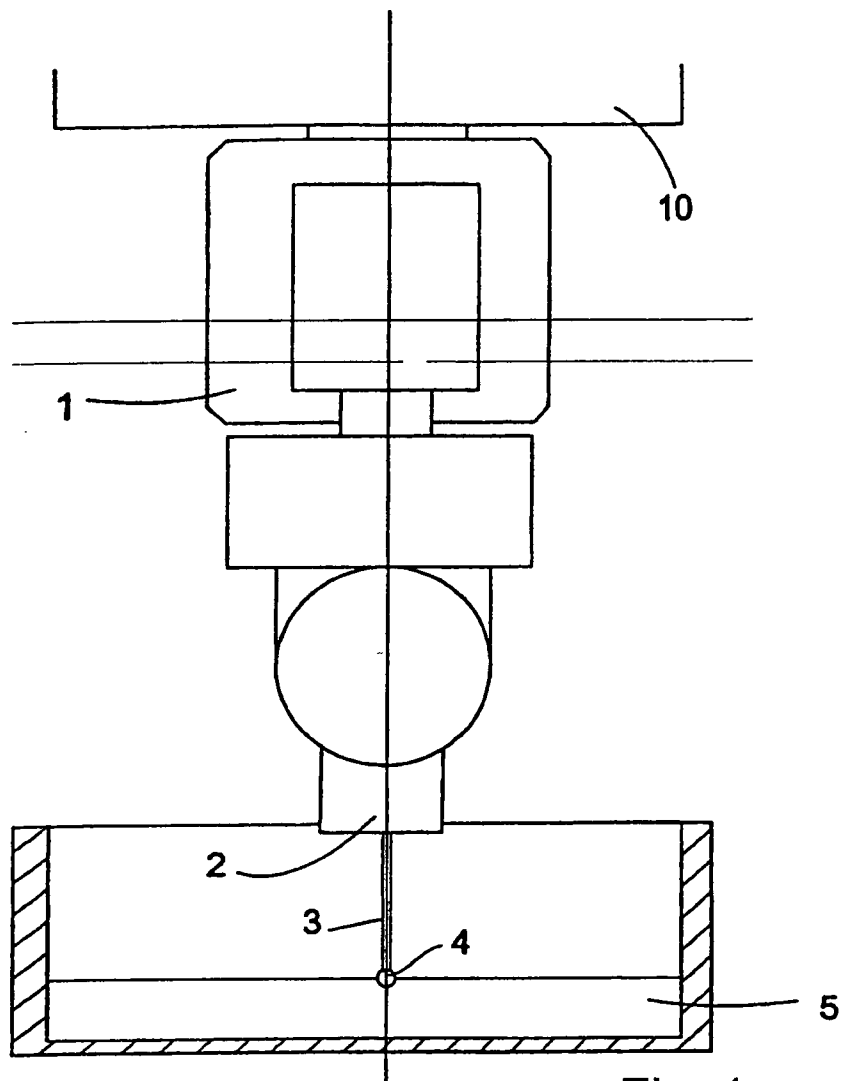


Fig. 1

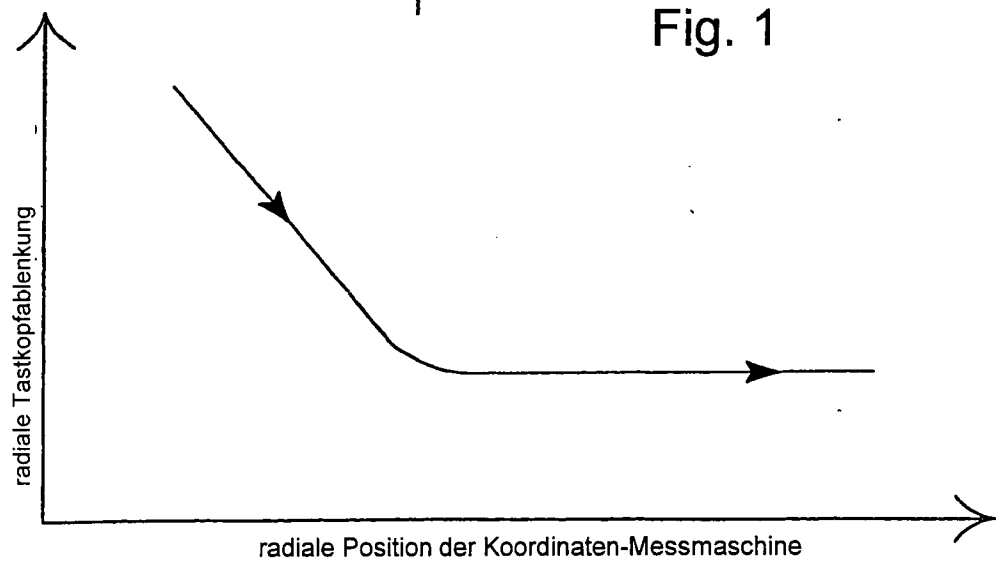


Fig. 2

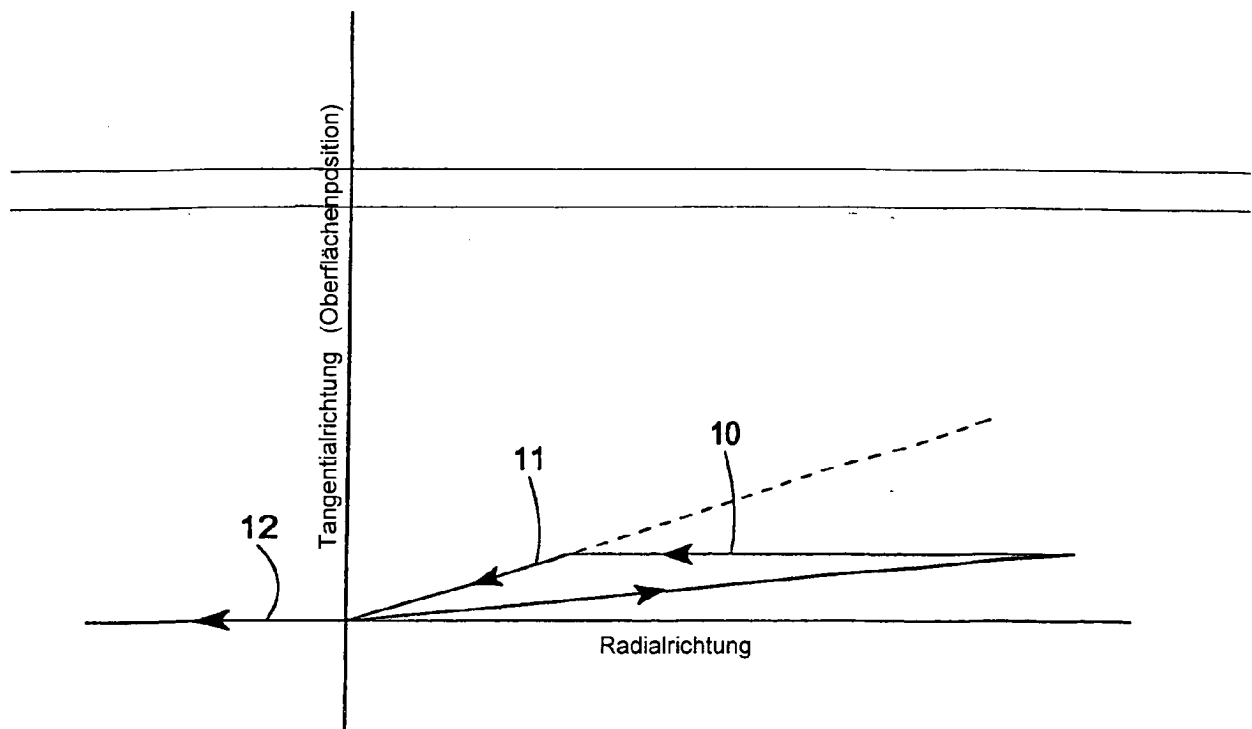


Fig. 3

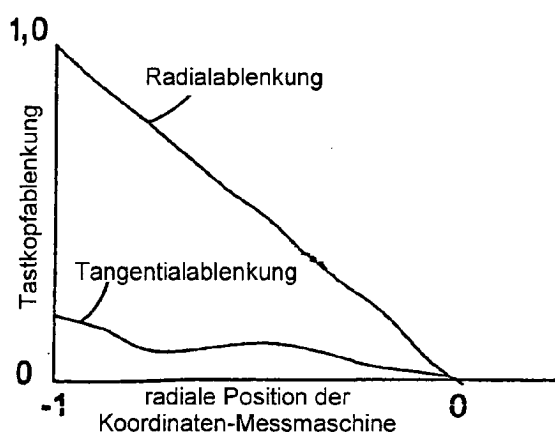


Fig. 4a

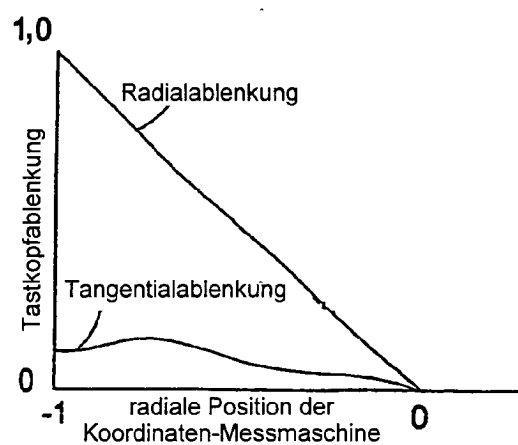


Fig. 4b