



(19)  
 Bundesrepublik Deutschland  
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2007 057 093 A1** 2009.05.28

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2007 057 093.9**

(22) Anmeldetag: **20.11.2007**

(43) Offenlegungstag: **28.05.2009**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G01B 21/04** (2006.01)  
**G01B 5/008** (2006.01)

(71) Anmelder:  
**Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, 73447 Oberkochen, DE**

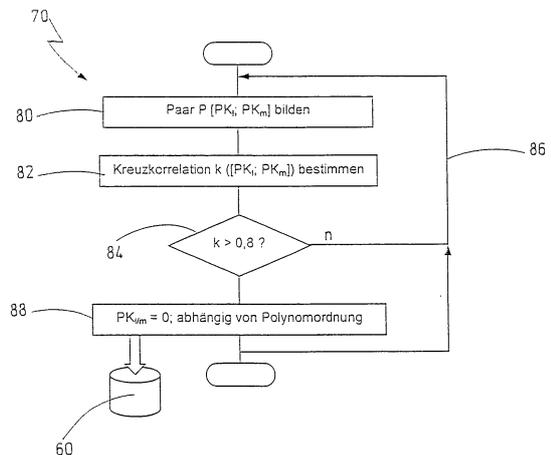
(72) Erfinder:  
**Kunzmann, Steffen, Dr., 01279 Dresden, DE; Held, Tobias, 86720 Nördlingen, DE; Engel, Thomas, Dr., 73432 Aalen, DE**

(74) Vertreter:  
**Witte, Weller & Partner, 70173 Stuttgart**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Kalibrieren eines Koordinatenmessgerätes**

(57) Zusammenfassung: Zum Kalibrieren eines Koordinatenmessgerätes wird ein Referenzmessobjekt mit bekannten Eigenschaften bereitgestellt. Es werden eine Vielzahl von Referenzmesswerten an dem Referenzmessobjekt aufgenommen. Anhand der Referenzmesswerte und anhand der bekannten Eigenschaften des Referenzmessobjekts werden Kalibrierdaten bestimmt, wobei die Kalibrierdaten eine erste Anzahl von Polynomkoeffizienten beinhalten, die dazu ausgebildet sind, nichtlineare Messfehler anhand von zumindest einer Polynomtransformation zu korrigieren. Gemäß einem Aspekt der Erfindung wird die erste Anzahl von Polynomkoeffizienten in einem iterativen Verfahren auf eine geringere zweite Anzahl reduziert, wobei eine Vielzahl von Paaren von Polynomkoeffizienten gebildet wird und wobei jeweils ein Polynomkoeffizient eines Paares eliminiert wird, wenn eine statistische Abhängigkeit zwischen den Polynomkoeffizienten des Paares größer ist als ein definierter Schwellenwert.



## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kalibrieren eines Koordinatenmessgerätes, mit den Schritten:

- Bereitstellen eines Referenzmessobjekts mit bekannten Eigenschaften in einem Messvolumen des Koordinatenmessgerätes,
- Aufnehmen einer Vielzahl von Referenzmesswerten an dem Referenzmessobjekt, und
- Bestimmen von Kalibrierdaten anhand der Referenzmesswerte und anhand der bekannten Eigenschaften,
- wobei die Kalibrierdaten eine erste Anzahl von Polynomkoeffizienten beinhalten, die dazu ausgebildet sind, nichtlineare Messfehler des Koordinatenmessgerätes anhand von zumindest einer Polynomtransformation zu korrigieren.

**[0002]** Die Erfindung betrifft ferner ein Koordinatenmessgerät mit einer Aufnahme für ein Messobjekt, mit einem Sensor zum Erzeugen von positionsabhängigen Messwerten von dem Messobjekt, und mit einer Auswerte- und Steuereinheit zum Steuern des Sensors und zum Verarbeiten der Messwerte, wobei die Auswerte- und Steuereinheit dazu ausgebildet ist, Kalibrierdaten mit Hilfe eines Referenzmessobjekts mit bekannten Eigenschaften zu bestimmen, und wobei die Kalibrierdaten eine Anzahl von Polynomkoeffizienten beinhalten, die dazu ausgebildet sind, nichtlineare Messfehler des Koordinatenmessgerätes anhand von zumindest einer Polynomtransformation zu korrigieren.

**[0003]** Ein Verfahren und ein Koordinatenmessgerät dieser Art sind dem Grunde nach aus EP 1 051 596 B1 bekannt, wobei diese Druckschrift allerdings den Aufbau des Koordinatenmessgerätes nicht im Detail offenbart.

**[0004]** Koordinatenmessgeräte im Sinne der vorliegenden Erfindung besitzen einen Sensor, der relativ zu einem Messobjekt beweglich ist. Typischerweise wird das Messobjekt auf einem Messtisch oder einer anderen geeigneten Aufnahme platziert. Der Sensor wird in eine definierte Position relativ zu dem Messobjekt gebracht. Anschließend lassen sich Raumkoordinaten von definierten Messpunkten an dem Messobjekt bestimmen, indem die Position des Sensors im Messvolumen und eventuell weitere vom Sensor gelieferte Messdaten ausgewertet werden. Mit einem solchen Koordinatenmessgerät kann man geometrische Abmessungen des Messobjekts bis hin zu Form- und Konturverläufen bestimmen, indem man die Raumkoordinaten an einer Vielzahl von Messpunkten aufnimmt. Eine typische Anwendung für Koordinatenmessgeräte ist daher die Qualitätskontrolle von Werkstücken.

**[0005]** In vielen Fällen besitzen Koordinatenmess-

geräte einen so genannten taktilen messenden Sensor. Dies ist ein Sensor mit einer Sensorbasis, die relativ zu dem Messobjekt bewegt werden kann. Der Sensor besitzt ferner ein Tastelement, häufig in Form eines Taststiftes, mit dem ein Messpunkt an dem Messobjekt angetastet wird. Das Tastelement ist relativ zu der Sensorbasis beweglich, so dass es beim Antasten eines Messpunktes ausgelenkt wird. Messelemente im Sensor dienen dazu, diese Auslenkungen relativ zur Sensorbasis zu bestimmen, um auf diese Weise eine hohe Messgenauigkeit zu ermöglichen. In der Regel werden die Auslenkungen des Tastelements relativ zur Sensorbasis mit Hilfe einer sog. Transformationsmatrix in ein Koordinatensystem transformiert, das die Position des Sensors im Messvolumen angibt. Die Koeffizienten der Transformationsmatrix werden in einem Kalibriervorgang berechnet, in dem Referenzmesswerte an einem Referenzmessobjekt mit bekannten Eigenschaften aufgenommen werden.

**[0006]** Die eingangs genannte EP 1 051 596 B1 offenbart ein solches Kalibrierverfahren, bei dem zunächst die Position und der Radius einer am Ende des Taststiftes angeordneten Tastkugel bestimmt werden und bei dem anschließend die Koeffizienten der Transformationsmatrix berechnet werden. Das Verfahren nach EP 1 051 596 B1 sieht außerdem vor, dass anhand einer Vielzahl von weiteren Referenzmesswerten eine Fehlertabelle bestimmt wird, die Messabweichungen in Abhängigkeit von der Stärke der Auslenkung des Tastelements und in Abhängigkeit von der jeweiligen Messposition repräsentiert. Diese Fehlertabelle kann in Form einer so genannten Look-up-Tabelle oder alternativ in Form einer Polynomfunktion mit Polynomkoeffizienten bereitgestellt werden. Im letztgenannten Fall dient die Polynomfunktion dazu, nichtlineare Messabweichungen zu korrigieren, indem das nichtlineare Verhalten des Sensorsystems mit Hilfe der Polynomfunktion rechnerisch linearisiert wird.

**[0007]** Die Kalibrierung beinhaltet hiernach also nicht nur die Bestimmung der Koeffizienten für die Transformationsmatrix, sondern auch die Bestimmung der geeigneten Polynomkoeffizienten, die die verbleibenden, nichtlinearen Messabweichungen repräsentieren.

**[0008]** Das Verfahren nach EP 1 051 596 B1 benötigt eine hohe Anzahl von Referenzmesswerten und ist daher relativ zeitaufwendig. Dies ist von Nachteil, weil eine Kalibrierung im Betrieb des Koordinatenmessgerätes häufig wiederholt werden muss, um hochgenaue Messungen zu ermöglichen.

**[0009]** Um die Kalibrierung eines Koordinatenmessgerätes mit einem messenden Sensor zu beschleunigen, ist es wünschenswert, die Anzahl der Parameter oder Koeffizienten, die mit Hilfe der Kalibrierung be-

stimmt werden müssen, zu minimieren. Je weniger Parameter/Koeffizienten bestimmt werden müssen, desto weniger Referenzmesswerte werden benötigt. Andererseits darf die Minimierung nicht dazu führen, dass signifikante Messabweichungen unberücksichtigt bleiben.

**[0010]** Bei der Suche nach einem verbesserten Kalibrierverfahren hat sich gezeigt, dass eine Polynomtransformation zur Korrektur von Nichtlinearitäten teilweise starke Messabweichungen an solchen Stellen hervorrufen kann, die nicht durch Referenzmesswerte gestützt sind. Mit anderen Worten können durch eine Polynomtransformation "neue" nichtlineare Messabweichungen hervorgerufen werden, selbst wenn die Polynomtransformation an den Stützstellen, die mit Referenzmesswerten unterlegt sind, sehr gute Korrekturergebnisse liefert.

**[0011]** Vor diesem Hintergrund ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zum Kalibrieren eines Koordinatenmessgerätes anzugeben, mit dem sich Messfehler aufgrund von nichtlinearem Systemverhalten einfacher und mit hoher Genauigkeit korrigieren lassen. Es ist insbesondere eine Aufgabe der Erfindung, ein robustes Kalibrierverfahren anzugeben, das auch abseits der durch Referenzmesswerte gestützten Messpositionen eine genaue Messung ermöglicht. Es ist ferner eine Aufgabe der Erfindung, ein entsprechendes Koordinatenmessgerät anzugeben.

**[0012]** Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung werden diese Aufgaben durch ein Verfahren der eingangs genannten Art gelöst, bei dem die erste Anzahl von Polynomkoeffizienten in einem iterativen Verfahren auf eine geringere zweite Anzahl reduziert wird, wobei eine Vielzahl von Paaren von Polynomkoeffizienten gebildet wird, und wobei jeweils ein Polynomkoeffizient eines Paares eliminiert wird, wenn eine statistische Abhängigkeit zwischen den Polynomkoeffizienten des Paares größer ist als ein definierter Schwellenwert.

**[0013]** Nach einem weiteren Aspekt der Erfindung wird diese Aufgabe durch ein Koordinatenmessgerät der eingangs genannten Art gelöst, bei dem die Auswerte- und Steuereinheit dazu ausgebildet ist, eine erste Anzahl von Polynomkoeffizienten in einem iterativen Verfahren auf eine geringere zweite Anzahl zu reduzieren, wobei eine Vielzahl von Paaren von Polynomkoeffizienten gebildet wird, und wobei jeweils ein Polynomkoeffizient eines Paares eliminiert wird, wenn eine statistische Abhängigkeit zwischen den Polynomkoeffizienten des Paares größer ist als ein definierter Schwellenwert.

**[0014]** Besonders vorteilhaft lässt sich das neue Verfahren in Form eines Computerprogramms realisieren, mit Programmcode, der auf einem geeigneten

Datenträger gespeichert ist und der dazu ausgebildet ist, das neue Kalibrierverfahren auszuführen, wenn der Programmcode in einer Auswerte- und Steuereinheit eines Koordinatenmessgerätes abläuft.

**[0015]** Das neue Kalibrierverfahren basiert weiterhin auf der Idee, eine Polynomtransformation zur Korrektur von nichtlinearen Messfehlern eines Koordinatenmessgerätes zu verwenden. Wie sich gezeigt hat, hängt die Qualität der Korrektur allerdings stark davon ab, welche und wie viele Polynomkoeffizienten im Rahmen der Kalibrierung bestimmt werden. Es hat sich gezeigt, dass eine zu große Anzahl von Polynomkoeffizienten zu Transformationsgleichungen führt, die zwar an den Stellen, die durch Referenzmesswerte gestützt sind, gute Korrekturergebnisse liefern, jedoch an anderen Stellen starke nichtlineare Abweichungen hervorrufen können. Dies lässt sich vermeiden, indem ein "optimaler" Satz an Polynomkoeffizienten für eine bestimmte Kalibrieraufgabe verwendet wird. Die Schwierigkeit besteht darin, diesen "optimalen" Satz an Polynomkoeffizienten zu finden. Das neue Kalibrierverfahren ermöglicht es, diese Schwierigkeit zu überwinden, indem die Anzahl der verwendeten Polynomkoeffizienten in einem iterativen Verfahren optimiert wird. Dabei werden "unnötige" Polynomkoeffizienten aus einer Menge von zunächst bereitgestellten Polynomkoeffizienten eliminiert. Eliminiert werden insbesondere Polynomkoeffizienten, die mit zumindest einem anderen Polynomkoeffizienten eine starke statistische Abhängigkeit aufweisen. Anders ausgedrückt werden solche Polynomkoeffizienten eliminiert, die keinen nennenswerten unabhängigen Anteil zur Korrektur der nichtlinearen Messabweichungen liefern. Es hat sich gezeigt, dass die auf diese Weise bestimmten Kalibrierdaten genauere Messergebnisse an Stellen ermöglichen, die nicht durch Referenzmesswerte gestützt sind, ohne die Genauigkeit an den durch Referenzmesswerte gestützten Messpositionen nennenswert zu beeinträchtigen.

**[0016]** Das neue Verfahren ermöglicht es, einen reduzierten Satz an Polynomkoeffizienten zur Korrektur von nichtlinearen Messfehlern zu finden, ohne dass die Genauigkeit der Messungen mit den Kalibrierdaten darunter leidet. Dabei ist die Auswahl und Bestimmung der Polynomkoeffizienten selbstlernend. Das neue Verfahren passt sich daher an unterschiedliche Messumgebungen automatisch an. Infolgedessen reduziert sich der Aufwand für die Kalibrierung. Darüber hinaus kann das durch den iterativen Prozess gewonnene Wissen bei zukünftigen Kalibrieraufgaben mit vergleichbaren Messbedingungen vorteilhaft genutzt werden, um die Anzahl der zu bestimmenden Korrekturkoeffizienten von vornherein gezielt zu reduzieren. Jeder Kalibriervorgang liefert somit a-priori-Wissen für zukünftige Kalibriervorgänge, was zur weiteren Beschleunigung von Kalibriervorgängen verwendet werden kann.

**[0017]** Insgesamt bietet das neue Verfahren eine einfache, schnelle und robuste Kalibrierung eines Koordinatenmessgerätes mit einer mehrdimensionalen, nichtlinearen Sensoreinheit. Die oben genannte Aufgabe ist daher vollständig gelöst.

**[0018]** In einer Ausgestaltung der Erfindung wird für jedes Paar von Polynomkoeffizienten ein Korrelationswert als Maß für die statistische Abhängigkeit bestimmt, wobei der Korrelationswert eine Kreuzkorrelation zwischen den Polynomkoeffizienten des Paares repräsentiert.

**[0019]** In bevorzugten Ausführungsbeispielen dieser Ausgestaltung wird der so genannte Korrelationskoeffizient zwischen den beiden Polynomkoeffizienten jedes Paares bestimmt. Der Korrelationskoeffizient ist eine auf die jeweiligen Standardabweichungen der Polynomkoeffizienten normierte Kennzahl, die zwischen  $-1$  und  $1$  liegen kann. Er ist ein Maß für die linearen statistischen Abhängigkeiten zwischen den beiden Polynomkoeffizienten eines Paares. Anstelle des Korrelationskoeffizienten könnte jedoch grundsätzlich auch eine andere, mathematisch mit diesem zusammenhängende Größe verwendet werden, wie etwa die (nicht-normierte) Kovarianz. Generell beschränkt sich diese Ausgestaltung auf die Analyse von linearen statistischen Abhängigkeiten zwischen den Polynomkoeffizienten jedes Paares. Diese Ausgestaltung vereinfacht und beschleunigt den Kalibriervorgang, und sie liefert gute Ergebnisse in Bezug auf die Genauigkeit und Robustheit der Kalibrierdaten. Prinzipiell können jedoch in anderen Ausgestaltungen auch statistische Abhängigkeiten höherer Ordnungen verwendet werden.

**[0020]** In einer weiteren Ausgestaltung wird der Korrelationswert betragsmäßig mit einem Schwellenwert verglichen, der eine Kreuzkorrelation größer als  $0,4$  repräsentiert, vorzugsweise größer als  $0,6$ , und besonders bevorzugt größer als etwa  $0,8$ .

**[0021]** In dieser Ausgestaltung wird einer vier Polynomkoeffizienten des Paares eliminiert, wenn der Betrag des Korrelationskoeffizienten für die beiden Polynomkoeffizienten größer ist als die angegebenen Schwellenwerte. Praktische Untersuchungen haben gezeigt, dass die Eliminierung eines der Polynomkoeffizienten des Paares die gewünschten Vorteile bringt, wenn die lineare statistische Abhängigkeit die angegebenen Schwellenwerte übersteigt.

**[0022]** In einer weiteren Ausgestaltung repräsentiert jeder Polynomkoeffizient eine Polynomordnung, wobei jeweils derjenige Polynomkoeffizient des Paares eliminiert wird, der eine höhere Polynomordnung repräsentiert.

**[0023]** Die Polynomordnung gibt an, mit welcher Potenz der jeweilige Polynomterm in die Polynomtrans-

formation eingeht. Nach dieser Ausgestaltung wird von zwei korrelierten Polynomkoeffizienten jeweils derjenige eliminiert, der einer höheren Polynomordnung zugewiesen ist. Repräsentieren zwei korrelierte Polynomkoeffizienten jeweils gleiche Polynomordnungen, kann einer von beiden eliminiert werden, ohne dass es eine bevorzugte Priorität gibt. Bei unterschiedlichen Polynomordnungen ist es hingegen von Vorteil, den Polynomkoeffizienten mit der höheren Polynomordnung zu eliminieren, weil die Kalibrierung dadurch robuster wird, d. h. die Kalibrierdaten lassen sich mit einer höheren Genauigkeit und Zuverlässigkeit auch für Messpositionen verwenden, die nicht durch Referenzmesswerte gestützt sind.

**[0024]** In einer weiteren Ausgestaltung beinhalten die Kalibrierdaten außerdem Transformationskoeffizienten einer Transformationsmatrix, die einen linearen Zusammenhang zwischen den Referenzmesswerten und den bekannten Eigenschaften repräsentiert.

**[0025]** Diese Ausgestaltung ist besonders vorteilhaft für Koordinatenmessgeräte, bei denen ein messender Sensor mehrdimensionale Messwerte liefert. Alternativ hierzu kann das neue Kalibrierverfahren prinzipiell auch bei einfacheren Koordinatenmessgeräten verwendet werden, bei denen lediglich ein schaltender Tastkopf verwendet wird. Die neue Kalibrierung kann sich dann beispielsweise auf die Korrektur von Führungsfehlern entlang der Bewegungsbahnen des Tastkopfes beschränken. In der bevorzugten Ausgestaltung liefert die Kalibrierung jedoch auch Kalibrierdaten für die Transformation der Sensormessdaten in das Koordinatensystem des Koordinatenmessgerätes. Da solche Koordinatenmessgeräte mit "messenden Sensoren" in aller Regel für Messaufgaben mit besonders hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit verwendet werden, eignet sich das neue Kalibrierverfahren für solche Koordinatenmessgeräte besonders gut.

**[0026]** In einer weiteren Ausgestaltung wird ferner eine Vielzahl von Paaren mit jeweils einem Polynomkoeffizienten und einem Transformationskoeffizienten gebildet, wobei der Polynomkoeffizient eines solchen Paares eliminiert wird, wenn eine statistische Abhängigkeit zwischen dem Polynomkoeffizienten und dem Transformationskoeffizienten des Paares größer ist als ein definierter Schwellenwert.

**[0027]** In dieser Ausgestaltung werden Polynomkoeffizienten, die zur Linearisierung der Messwerte dienen, auch dann eliminiert, wenn eine signifikante Korrelation mit Koeffizienten der Transformationsmatrix besteht. Diese Ausgestaltung eliminiert weitere statistische Abhängigkeiten zwischen den Kalibrierdaten, und sie ermöglicht daher eine besonders robuste, schnelle und genaue Fehlerkorrektur.

**[0028]** In einer weiteren Ausgestaltung wird in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der ersten und der zweiten Anzahl ein Kennwert bereitgestellt, der ein Qualitätskriterium für das Koordinatenmessgerät repräsentiert.

**[0029]** Diese Ausgestaltung nutzt die Informationen, die sich aus der Minimierung der Polynomkoeffizienten ergeben, in vorteilhafter Weise. Beispielsweise deutet eine geringe zweite Anzahl bzw. eine große Differenz zwischen der ersten und zweiten Anzahl darauf hin, dass das entsprechende Koordinatenmessgerät nur relativ geringe Nichtlinearitäten aufweist, so dass es sich prinzipiell für hochgenaue Messungen eignet. Gleiches gilt für einen mehrdimensionalen Sensor, bei dem nach der Eliminierung der statistisch abhängigen Polynomkoeffizienten nur eine geringe Anzahl von Polynomkoeffizienten übrig bleibt. Des Weiteren kann einzelnen Messpunkten in Abhängigkeit von den verbleibenden Polynomkoeffizienten eine Information über die lokale Messunsicherheit zugeordnet werden.

**[0030]** In einer weiteren Ausgestaltung werden die eliminierten Polynomkoeffizienten zusammen mit Parameterdaten, die das Koordinatenmessgerät repräsentieren, in einer Wissensdatenbank bereitgestellt.

**[0031]** Die Parameterdaten beinhalten insbesondere Informationen über die Eigenschaften des kalibrierten Koordinatenmessgerätes und/oder Sensors, wie etwa das Gewicht und/oder die Länge des verwendeten Tastelements, den Gestellaufbau (z. B. Horizontalarm, Portal, Brücke) des Koordinatenmessgerätes etc. Wenn bestimmte Polynomkoeffizienten nach dem neuen Verfahren eliminiert wurden, kann diese Information zusammen mit den Parameterdaten ein vorteilhaftes a-priori-Wissen für zukünftige Kalibriervorgänge darstellen, so dass man auf die eliminierten Polynomkoeffizienten ggf. von vornherein bei der Modellbildung verzichten kann. Daher ermöglicht diese Ausgestaltung eine weitere Vereinfachung bei der Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten.

**[0032]** In einer weiteren Ausgestaltung werden die Referenzmesswerte mit Hilfe eines taktilen Sensors aufgenommen, der eine Sensorbasis, ein relativ zur Sensorbasis bewegliches Tastelement und eine Anzahl von Messelementen aufweist, die dazu ausgebildet sind, eine Relativposition des Tastelements relativ zur Sensorbasis zu bestimmen, wobei die Polynomkoeffizienten nichtlineare Eigenschaften der Messelemente repräsentieren.

**[0033]** Die Kalibrierung eines messenden taktilen Sensors an einem Koordinatenmessgerät ist mit den bislang bekannten Verfahren besonders aufwendig, da hier eine große Anzahl an Freiheitsgraden existiert, die bei der Kalibrierung berücksichtigt werden

müssen. Mit dem neuen Kalibrierverfahren lässt sich der Aufwand für die Kalibrierung eines solchen taktilen messenden Sensors stark reduzieren, ohne die prinzipbedingt mögliche, hohe Messgenauigkeit zu beeinträchtigen. Die Anwendung des neuen Verfahrens bei einem taktilen messenden Sensor ist daher ein besonders bevorzugter Anwendungsfall.

**[0034]** In einer weiteren Ausgestaltung werden die Referenzmesswerte mit Hilfe eines berührungslos messenden Sensors aufgenommen. Beispielsweise kann es sich um einen optischen, kamerabasierten Sensor und/oder einen kapazitiven Näherungssensor handeln.

**[0035]** Wenngleich das neue Verfahren in erster Linie zur Lösung von Problemen bei der Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten mit taktilen messenden Sensoren entwickelt wurde, lässt es sich auch vorteilhaft bei anderen mehrdimensionalen Sensoren einsetzen. Wie sich gezeigt hat, führt die iterative Eliminierung von Polynomkoeffizienten in Abhängigkeit von deren statistischen Abhängigkeiten auch bei solchen Sensoren zu einer Reduzierung des Kalibrieraufwandes und zu robusteren Kalibrierdaten.

**[0036]** 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.

**[0037]** Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der Zeichnung dargestellt und werden in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigen:

**[0038]** [Fig. 1](#) eine vereinfachte Darstellung eines Koordinatenmessgerätes nach einem Ausführungsbeispiel der Erfindung,

**[0039]** [Fig. 2](#) ein Flussdiagramm zur Erläuterung eines Ausführungsbeispiels des neuen Verfahrens,

**[0040]** [Fig. 3](#) ein Flussdiagramm zur Erläuterung einer ersten Variante des Verfahrens nach [Fig. 2](#), und

**[0041]** [Fig. 4](#) ein Flussdiagramm zur Erläuterung einer zweiten Variante des Verfahrens aus [Fig. 2](#).

**[0042]** In [Fig. 1](#) ist ein Koordinatenmessgerät in seiner Gesamtheit mit der Bezugsziffer **10** bezeichnet. Es handelt sich hier um ein Koordinatenmessgerät in Portalbauweise, das speziell zur Vermessung von Werkstücken ausgebildet ist. Die Erfindung ist jedoch nicht auf Koordinatenmessgeräte im engeren Sinne beschränkt und kann beispielsweise auch bei Werkzeugmaschinen oder anderen Maschinen eingesetzt werden, bei denen mit Hilfe eines geeigneten Sensors mehrdimensionale Raumkoordinaten an einem

Messobjekt bestimmt werden. Dementsprechend beinhaltet der Begriff "Koordinatenmessgerät" im Sinne der vorliegenden Erfindung auch solche Maschinen.

**[0043]** Das Koordinatenmessgerät **10** besitzt eine Basis **12**, auf der ein Portal **14** angeordnet ist. Am oberen Querträger des Portals **14** sitzt ein Schlitten **16**, der eine Pinole **18** trägt. Am unteren freien Ende der Pinole **18** ist ein Sensorkopf **20** angeordnet. Der Sensorkopf **20** ist hier ein taktiler messender Sensorkopf mit einer Aufnahme für einen Taststift **22**, der relativ zu der Aufnahme verschwenkbar ist. Mit der Bezugsziffer **23** ist ein hier nur schematisch dargestelltes Messelement bezeichnet, mit dessen Hilfe die Auslenkungen des Taststiftes **22** relativ zu der Aufnahme bestimmt werden kann.

**[0044]** Am Fuß des Portals **14** ist ein Antrieb **24** angeordnet, der dazu ausgebildet ist, das Portal **14** in Längsrichtung zu bewegen. Diese Längsrichtung wird üblicherweise als y-Achse bezeichnet. Die Position des Portals **14** relativ zu der Basis **12** kann mit Hilfe eines Messsystems **26** bestimmt werden. Typischerweise handelt es sich bei dem Messsystem **26** um Glasmaßstäbe mit einer Skala, die mit Hilfe eines geeigneten Sensors (hier nicht dargestellt) abgetastet werden kann.

**[0045]** In gleicher Weise ist der Schlitten **16** relativ zu dem Portal **14** in einer Richtung beweglich, die üblicherweise als x-Achse bezeichnet wird. Des Weiteren ist die Pinole **18** relativ zu dem Schlitten **16** entlang einer Richtung beweglich, die üblicherweise als z-Achse bezeichnet wird. Die jeweilige Raumposition des Schlittens **16** und der Pinole **18** kann mit Hilfe von weiteren Messsystemen **28**, **30** bestimmt werden. Insgesamt kann der Sensorkopf **20** aufgrund der Antriebe des Portals **14**, des Schlittens **16** und der Pinole **18** innerhalb eines Messvolumens bewegt werden, das durch die maximalen Verfahrenswege des Portals **14**, des Schlittens **16** und der Pinole **18** definiert ist.

**[0046]** Innerhalb des Messvolumens ist ein Messobjekt **32** auf der Basis **12** angeordnet. Zur Durchführung einer Messung wird der Sensorkopf **20** an das Messobjekt **32** herangefahren, bis die Tastkugel am freien unteren Ende des Taststiftes **22** einen gewünschten Messpunkt an dem Messobjekt **32** berührt. Die Berührung wird anhand der Auslenkung des Taststiftes relativ zu der Basis des Sensorkopfes detektiert. Die Raumkoordinaten des angetasteten Messpunktes ergeben sich aus den jeweiligen Positionen entlang der Achsen x, y und z und aus der Auslenkung des Taststiftes **22**.

**[0047]** Die Führungsbahnen des Koordinatenmessgerätes **10** entlang der Achsen x, y und z und auch die Auslenkungen des Taststiftes **22** können aufgrund von Fertigungstoleranzen, Temperaturschwän-

kungen, Alterungseinflüssen etc. variieren. Des Weiteren können die Messergebnisse der Messwertgeber entlang dieser Bewegungsachsen Nichtlinearitäten aufweisen. Daher muss das Koordinatenmessgerät **10** vor der Durchführung einer Messung kalibriert werden, indem ein Referenzmessobjekt mit bekannten Eigenschaften vermessen wird. Durch Vergleich der Referenzmesswerte mit den bekannten Eigenschaften des Referenzmessobjektes lassen sich Kalibrierdaten bestimmen, die bei nachfolgenden Messungen an realen Messobjekten zur Korrektur von systematischen Messfehlern verwendet werden.

**[0048]** Mit der Bezugsziffer **34** ist eine Auswerte- und Steuereinheit bezeichnet, die die Bewegungen des Sensorkopfes **20** steuert und die Messwerte der Messelemente **23** und der Messsysteme **26**, **28**, **30** einliest und verarbeitet. Darüber hinaus lässt sich mit Hilfe der Auswerte- und Steuereinheit **34** auch der Kalibriervorgang durchführen. In bevorzugten Ausführungsbeispielen beinhaltet die Auswerte- und Steuereinheit **34** einen Prozessor **36** und zumindest zwei Speicher **38**, **40**. Im Speicher **38** ist ein Computerprogramm gespeichert, das in dem bevorzugten Ausführungsbeispiel dazu ausgebildet ist, ein Kalibrierverfahren durchzuführen, wie es nachfolgend anhand der [Fig. 3](#) bis [Fig. 4](#) beschrieben wird. In dem Speicher **40** werden u. a. die Kalibrierdaten abgespeichert, die im Verlauf des Kalibriervorgangs bestimmt werden.

**[0049]** Gemäß [Fig. 2](#) beginnt das Kalibrierverfahren zum Kalibrieren des Sensorkopfes in diesem Fall damit, dass ein Referenzmessobjekt **32** mit bekannten Eigenschaften innerhalb des Messvolumens platziert wird. Das Referenzmessobjekt ist oder beinhaltet häufig eine Kugel mit einem bekannten Radius R, wie dies in der eingangs genannten EP 1 051 596 B1 beschrieben ist. Gemäß Schritt **50** wird ein Messpunkt n an dem Referenzmessobjekt angetastet, und es werden gemäß Schritt **52** die Messwerte S (n) der Messelemente **23** und Messsysteme **26**, **28**, **30** eingelesen. Gemäß Schritt **54** folgt eine Entscheidung, ob Messdaten für weitere Messpunkte n aufgenommen werden sollen. Gegebenenfalls kehrt das Verfahren gemäß Schleife 56 zum Schritt **50** zurück.

**[0050]** Wenn die Aufnahme der Messdaten abgeschlossen ist, werden gemäß Schritt **58** Polynomkoeffizienten PK (1 ... K) für eine Polynomtransformation bestimmt, mit deren Hilfe die Messdaten S (n) linearisiert werden. Sowohl die Anzahl als auch der jeweilige Wert der Polynomkoeffizienten ist zunächst unbekannt. Man beginnt daher beispielsweise mit einem Polynom folgender Art:

$$S' = (s_1 + c_{11} \cdot s_1 \cdot s_2 + c_{12} \cdot s_1 \cdot s_3 + c_{13} \cdot s_1 \cdot s_1 \cdot s_2 + \dots \\ s_2 + c_{21} \cdot s_2 \cdot s_1 + c_{22} \cdot s_2 \cdot s_3 + \dots, \\ s_3 + c_{31} \cdot s_3 \cdot s_1 + c_{32} \cdot s_3 \cdot s_2 + \dots),$$

wobei  $s_1, s_2, s_3$  Messdaten der Messelemente des Sensorkopfes am Messpunkt  $n$  sind, und wobei  $c_{11}, c_{12}, c_{13} \dots$  die Polynomkoeffizienten des Polynoms darstellen.

**[0051]**  $S'$  bezeichnet das linearisierte dreidimensionale Messsignal der Messelemente nach der Polynomtransformation. In Abhängigkeit von a-priori-Wissen, das einer Wissensdatenbank **60** entnommen sein kann, können Polynomterme, die bekanntermaßen nicht benötigt werden, von vornherein eliminiert werden, indem der entsprechende Polynomkoeffizient zu Null gesetzt wird.

**[0052]** Die Polynomkoeffizienten werden berechnet, indem eine Zielfunktion minimiert wird. In bevorzugten Ausführungsbeispielen ist die Zielfunktion die Minimierung aller Fehlerquadrate zwischen den Referenzmesswerten und den bekannten Eigenschaften des Referenzmessobjekts. Den einschlägigen Fachleuten ist diese Art der Berechnung von Polynomkoeffizienten bekannt.

**[0053]** Gemäß Schritt **62** werden die berechneten Polynomkoeffizienten  $PK$  ( $1 \dots K$ ) anschließend sortiert, wobei hier die Polynomordnung das Sortierkriterium darstellt. Gemäß den Schritten **64** und **66** werden anschließend eine Transformationsmatrix und einso genannter Offset aus den Messdaten bestimmt. Die Transformationsmatrix enthält Transformationskoeffizienten, mit deren Hilfe die (linearisierten) Messdaten der Messelemente **23**, d. h. die Auslenkungen des Taststiftes **22**, in das Koordinatensystem des Koordinatenmessgerätes **10** mit den Koordinatenachsen  $x, y$  und  $z$  transformiert werden. Der Offset gibt den Mittelpunkt der Tastkugel am freien Ende des Taststiftes **22** an. Die Berechnung der Transformationsmatrix und des Offset ist den einschlägigen Fachleuten ebenfalls bekannt und beispielsweise in der eingangs erwähnten EP 1 051 596 B1 beschrieben, auf die hier insoweit vollumfänglich Bezug genommen wird.

**[0054]** Gemäß Schritt **68** wird anschließend eine Kovarianzmatrix bestimmt, die sämtliche Kovarianzen zwischen allen berechneten Polynomkoeffizienten enthält. Vorteilhafterweise kann die Kovarianzmatrix auch die Kovarianzen zu allen weiteren berechneten Werten, insbesondere den Transformationskoeffizienten, beinhalten.

**[0055]** Gemäß Schritt **70** werden anschließend Paare mit jeweils zwei Polynomkoeffizienten  $PK_i$  und  $PK_m$  gebildet. Die Polynomkoeffizienten  $PK_i$  und  $PK_m$  werden auf statistische Abhängigkeiten hin untersucht, wie nachfolgend anhand [Fig. 3](#) näher erläutert ist. Übersteigen die statistischen Abhängigkeiten der Polynomkoeffizienten eines solchen Paares einen definierten Schwellenwert, wird einer der Polynomkoeffizienten eliminiert. Vorzugsweise wird derjenige Po-

lynomkoeffizient des Paares eliminiert, der nach der in Schritt **62** gebildeten Reihenfolge eine höhere Polynomordnung repräsentiert. Anschließend erfolgt gemäß Schritt **72** eine Entscheidung, ob ein weiterer Iterationsschritt sinnvoll ist. Wenn ja, kehrt das Verfahren gemäß der Schleife **74** zum Schritt **58** zurück, und es werden die (verbleibenden) Polynomkoeffizienten, die Transformationskoeffizienten und der Offset erneut berechnet. Dabei werden allerdings alle zuvor eliminierten Polynomkoeffizienten zu Null gesetzt, d. h. das Polynom für die Linearisierung vereinfacht sich mit jedem Iterationsschritt.

**[0056]** Wenn die Iterationsschritte keine nennenswerten Veränderungen mehr ergeben, werden die Iterationsdurchläufe **74** beendet. In bevorzugten Varianten des Verfahrens wird die Anzahl der eliminierten Polynomkoeffizienten und damit auch die Anzahl der verbleibenden Polynomkoeffizienten bestimmt. Gemäß Schritt **78** wird die Anzahl der verbleibenden Polynomkoeffizienten und/oder die Anzahl der eliminierten Polynomkoeffizienten als Maß für ein Qualitätskriterium des Koordinatenmessgerätes **10** angezeigt. Es versteht sich, dass die berechneten Koeffizienten außerdem in dem Speicher **40** der Auswerteeinheit **34** abgespeichert werden, so dass sie als Kalibrierdaten zur Verfügung stehen, die bei nachfolgenden Messungen zur Korrektur von systematischen Fehlern verwendet werden können.

**[0057]** [Fig. 3](#) zeigt anhand eines weiteren Flussdiagramms die Verfahrensschritte, die in bevorzugten Ausführungsbeispielen zur Eliminierung von statistisch abhängigen Polynomkoeffizienten führen. Gemäß Schritt **80** werden Paare  $P$  [ $PK_i; PK_m$ ] von Polynomkoeffizienten  $PK_i$  und  $PK_m$  gebildet. Anschließend wird gemäß Schritt **82** die Kreuzkorrelation  $k$  ( $[PK_i; PK_m]$ ) zwischen den Polynomkoeffizienten des Paares bestimmt. Gemäß Schritt **84** wird dann der Betrag der Kreuzkorrelation  $k$  mit einem Schwellenwert verglichen, der in einem bevorzugten Ausführungsbeispiel bei  $0,8$  liegt. Der Schwellenwert kann jedoch auch größer oder kleiner sein. Je größer er ist, desto stärkere statistische Abhängigkeiten zwischen den Polynomkoeffizienten werden zugelassen, da das Verfahren gemäß der Schleife **86** zum Verfahrensschritt **80** zurückkehrt, wenn der Schwellenwert nicht überschritten wird. Wird der Schwellenwert hingegen überschritten, wird einer der beiden Polynomkoeffizienten des Paares zu Null gesetzt, d. h. eliminiert. Vorzugsweise wird derjenige Polynomkoeffizient eliminiert, der eine höhere Polynomordnung repräsentiert. Anschließend kehrt das Verfahren zum Schritt **80** zurück, bis für sämtliche Paare von Polynomkoeffizienten ein Vergleich der Kreuzkorrelation mit dem Schwellenwert stattgefunden hat. Eliminierte Polynomkoeffizienten werden in bevorzugten Ausführungsbeispielen in der Wissensdatenbank **60** hinterlegt, um ein a-priori-Wissen für zukünftige, ähnliche Kalibrieraufgaben bereitzustellen.

[0058] **Fig. 4** zeigt ein alternatives Verfahren zum Eliminieren von Polynomkoeffizienten, wobei das Verfahren nach **Fig. 4** in bevorzugten Ausführungsbeispielen ergänzend zu dem Verfahren nach **Fig. 3** verwendet wird. Gemäß Schritt **90** aus **Fig. 4** werden Paare  $P [PK_i; K_m]$  mit jeweils einem Polynomkoeffizienten  $PK_i$  und einem Transformationskoeffizienten  $K_m$  der Transformationsmatrix gebildet. Alternativ und/oder ergänzend können auch die Koeffizienten des Offsetvektors für die Paarbildung mit jeweils einem Polynomkoeffizienten verwendet werden. Gemäß Schritt **92** wird anschließend die Kreuzkorrelation dieses Paares bestimmt und gemäß Schritt **94** wiederum mit einem Schwellenwert verglichen. Liegt die Kreuzkorrelation des Paares oberhalb des Schwellenwertes, wird der entsprechende Polynomkoeffizient  $PK_i$  zu Null gesetzt. Anderenfalls verzweigt das Verfahren gemäß der Schleife **96** direkt zum nächsten Paar. Es versteht sich, dass die Alternative gemäß **Fig. 4** nur möglich ist, wenn überhaupt Transformationskoeffizienten und/oder Offsetkoeffizienten zur Verfügung stehen. Dies ist typischerweise der Fall, wenn Kalibrierdaten für einen taktilen messenden Sensor bestimmt werden sollen. Das neue Verfahren kann jedoch prinzipiell auch mit anderen Sensoren und auch unabhängig von einem bestimmten Sensor zum Kalibrieren von Koordinatenmessgeräten verwendet werden. Beispielsweise lassen sich mit Hilfe des neuen Verfahrens Kalibrierdaten zum Korrigieren von nichtlinearen Führungsfehlern entlang der Bewegungsachsen X, Y, Z des Koordinatenmessgerätes **10** bestimmen. Des Weiteren kann das neue Verfahren auch zum Kalibrieren von optischen oder anderen mehrdimensionalen Sensoren verwendet werden. Generell lässt sich das neue Verfahren in allen Fällen einsetzen, bei denen Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Koordinatenachsen eines mehrdimensionalen Messsystems bestehen.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

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

**Zitierte Patentliteratur**

- EP 1051596 B1 [[0003](#), [0006](#), [0006](#), [0008](#), [0049](#), [0053](#)]

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Kalibrieren eines Koordinatenmessgerätes (10), mit den Schritten:

- Bereitstellen (48) eines Referenzmessobjekts (32) mit bekannten Eigenschaften in einem Messvolumen des Koordinatenmessgerätes (10),
  - Aufnehmen (52) einer Vielzahl von Referenzmesswerten an dem Referenzmessobjekt (32), und
  - Bestimmen (58, 64, 66) von Kalibrierdaten anhand der Referenzmesswerte und anhand der bekannten Eigenschaften,
  - wobei die Kalibrierdaten eine erste Anzahl von Polynomkoeffizienten (PK) beinhalten, die dazu ausgebildet sind, nichtlineare Messfehler des Koordinatenmessgerätes (10) anhand von zumindest einer Polynomtransformation zu korrigieren,
- dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Anzahl von Polynomkoeffizienten (PK) in einem iterativen Verfahren (70, 72, 74) auf eine geringere zweite Anzahl reduziert wird, wobei eine Vielzahl von Paaren von Polynomkoeffizienten gebildet (80) wird, und wobei jeweils ein Polynomkoeffizient eines Paares eliminiert (88) wird, wenn eine statistische Abhängigkeit zwischen den Polynomkoeffizienten des Paares größer ist als ein definierter Schwellenwert.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass für jedes Paar von Polynomkoeffizienten ein Korrelationswert als Maß für die statistische Abhängigkeit bestimmt (82) wird, wobei der Korrelationswert eine Kreuzkorrelation zwischen den Polynomkoeffizienten des Paares repräsentiert.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Korrelationswert betragsmäßig mit einem Schwellenwert verglichen (84) wird, der eine Kreuzkorrelation größer als 0.4 repräsentiert, vorzugsweise größer als 0.6, und besonders bevorzugt größer als etwa 0.8.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass jeder Polynomkoeffizient eine Polynomordnung repräsentiert (62), wobei jeweils derjenige Polynomkoeffizient des Paares eliminiert wird, der eine höhere Polynomordnung repräsentiert.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Kalibrierdaten außerdem Transformationskoeffizienten einer Transformationsmatrix beinhalten (64), die einen linearen Zusammenhang zwischen den Referenzmesswerten und den bekannten Eigenschaften repräsentiert.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass ferner eine Vielzahl von Paaren mit jeweils einem Polynomkoeffizienten und einem Transformationskoeffizienten gebildet (92) wird, wobei der Polynomkoeffizient eines solchen Paares eliminiert

(98) wird, wenn eine statistische Abhängigkeit zwischen dem Polynomkoeffizienten und dem Transformationskoeffizienten des Paares größer ist als ein definierter Schwellenwert.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der ersten und der zweiten Anzahl ein Kennwert bereitgestellt (78) wird, der ein Qualitätskriterium für das Koordinatenmessgerät repräsentiert.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die eliminierten Polynomkoeffizienten zusammen mit Parameterdaten, die das Koordinatenmessgerät repräsentieren, in einer Wissensdatenbank (60) bereitgestellt werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Referenzmesswerte mit Hilfe eines taktilen Sensors aufgenommen werden, der eine Sensorbasis (20), ein relativ zur Sensorbasis bewegliches Tastelement (22) und eine Anzahl von Messelementen (23) aufweist, die dazu ausgebildet sind, eine Relativposition des Tastelements (22) relativ zu der Sensorbasis (20) zu bestimmen, wobei die Polynomkoeffizienten nichtlineare Eigenschaften der Messelemente (23) repräsentieren.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Referenzmesswerte mit Hilfe eines berührungslos messenden Sensors aufgenommen werden.

11. Koordinatenmessgerät mit einer Aufnahme (12) für ein Messobjekt (32), mit einem Sensor (20) zum Erzeugen von positionsabhängigen Messwerten von dem Messobjekt, und mit einer Auswerte- und Steuereinheit (34) zum Steuern des Sensors (20) und zum Verarbeiten der Messwerte, wobei die Auswerte- und Steuereinheit (34) dazu ausgebildet ist, Kalibrierdaten mit Hilfe eines Referenzmessobjekts mit bekannten Eigenschaften zu bestimmen, und wobei die Kalibrierdaten eine Anzahl von Polynomkoeffizienten beinhalten, die dazu ausgebildet sind, nichtlineare Messfehler des Koordinatenmessgerätes anhand von zumindest einer Polynomtransformation zu korrigieren, dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerte- und Steuereinheit (34) dazu ausgebildet ist, eine erste Anzahl von Polynomkoeffizienten in einem iterativen Verfahren auf eine geringere zweite Anzahl zu reduzieren (70, 72), wobei eine Vielzahl von Paaren von Polynomkoeffizienten gebildet (80) wird, und wobei jeweils ein Polynomkoeffizient eines Paares eliminiert wird (88), wenn eine statistische Abhängigkeit zwischen den Polynomkoeffizienten des Paares größer ist als ein definierter Schwellenwert.

12. Computerprogramm mit Programmcode, der dazu ausgebildet ist, ein Verfahren nach einem der

Ansprüche 1 bis 10 auszuführen, wenn der Programmcode in einer Auswerte- und Steuereinheit eines Koordinatenmessgerätes abläuft.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

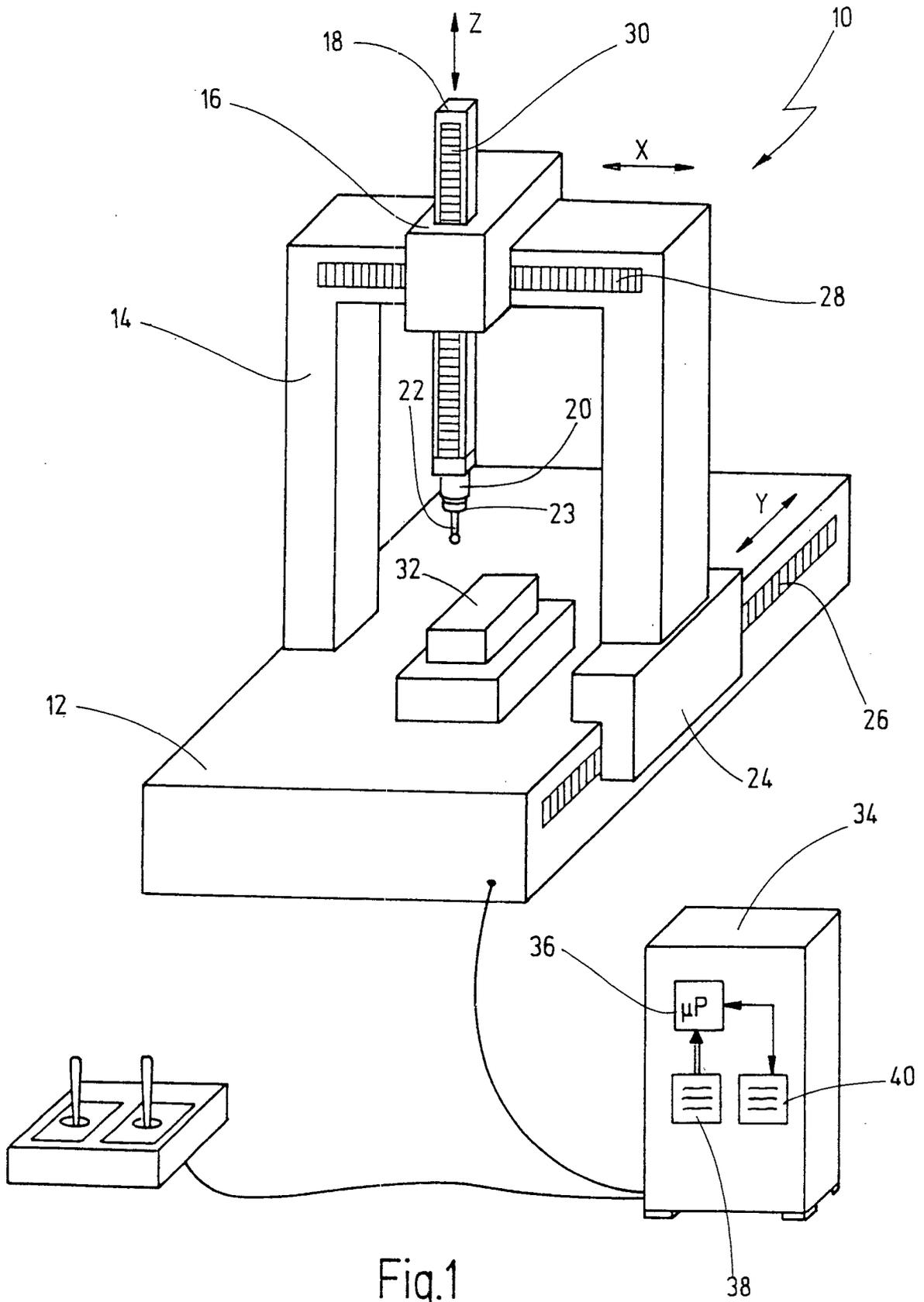


Fig.1

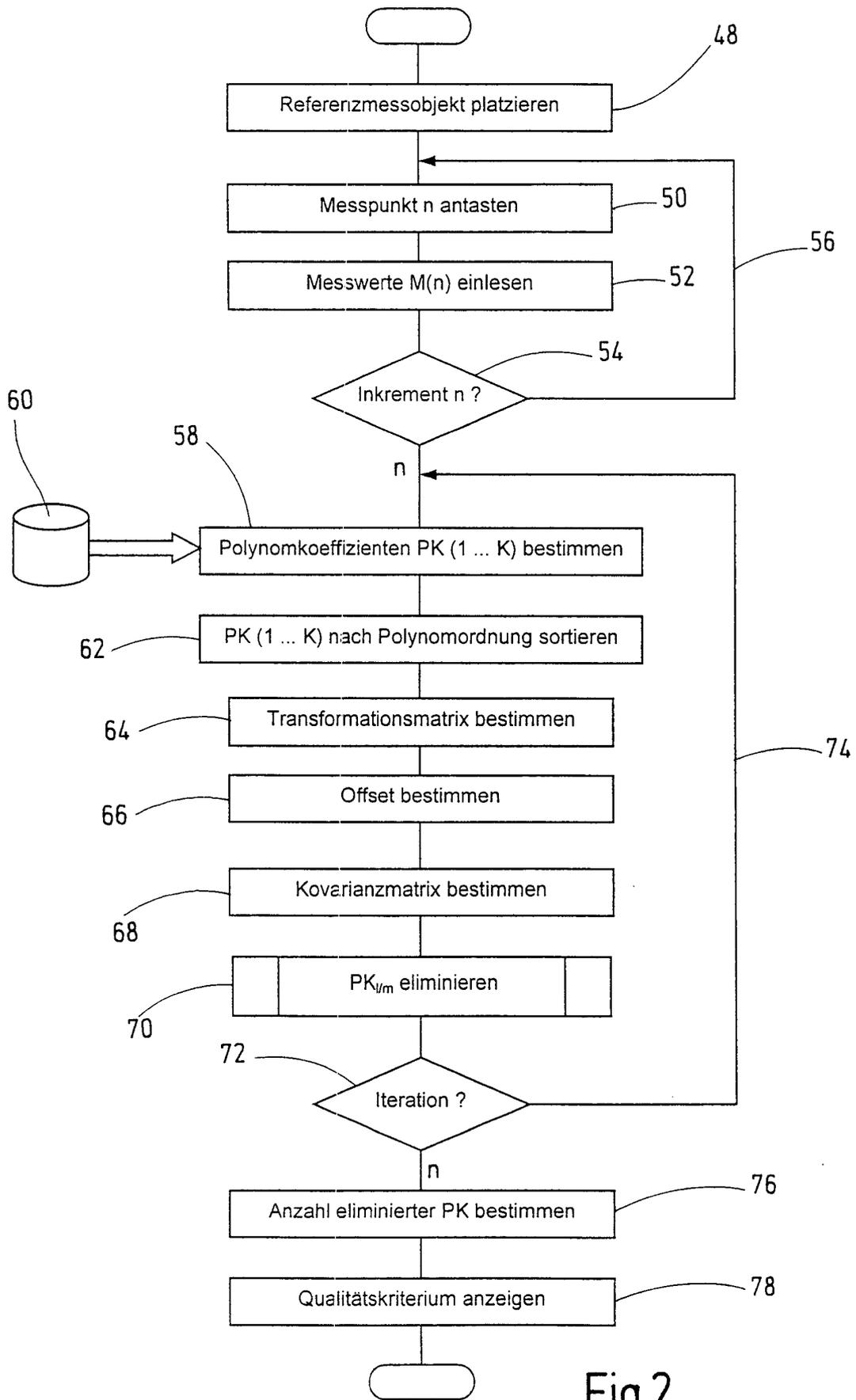


Fig.2

