



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2015 006 636.6**

(22) Anmeldetag: **22.05.2015**

(43) Offenlegungstag: **24.11.2016**

(51) Int Cl.: **G05B 19/401 (2006.01)**

(71) Anmelder:

**Blum-Novotest GmbH, 88287 Grünkraut, DE**

(74) Vertreter:

**Wuesthoff & Wuesthoff, Patentanwälte PartG mbB, 81541 München, DE**

(72) Erfinder:

**Berg, Peter, 88213 Ravensburg, DE; Blum, Alexander, 88212 Ravensburg, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	101 14 811	A1
DE	10 2007 006 421	A1
DE	10 2013 001 457	A1
DE	10 2013 015 237	A1
DE	690 20 494	T2
DE	14 77 726	C
US	2008 / 0 028 626	A1

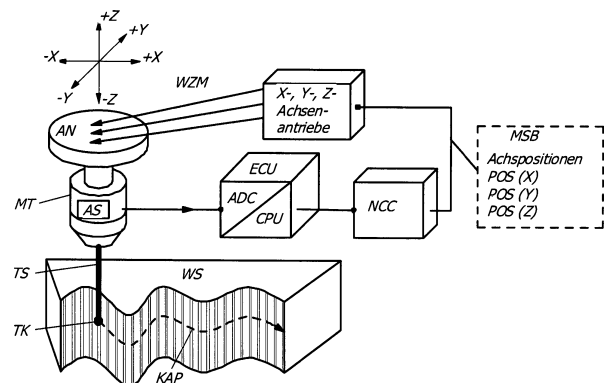
Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und System zur Erfassung einer Werkstückkontur und zur Korrektur eines SOLL-Pfades für die Bearbeitung eines Werkstücks in einer Werkzeugmaschine**

(57) Zusammenfassung: Ein Verfahren zur Werkstückbearbeitung hat folgende Schritte:

Bereitstellen eines einen Taststift aufweisenden Messtasters in einer Aufnahme einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine, wobei der Messtaster dazu eingerichtet ist, ein einer Auslenkung seines Taststifts zumindest bereichsweise wenigstens annähernd proportionales Ausgangssignal abzugeben, und wobei der Verlauf des Ausgangssignals eine Kontur eines Werkstücks zumindest annähernd wiedergibt; Bestimmen, in einer Vorbereitungsphase, wenigstens einer Korrekturfunktion zumindest eines Bereichs der Ausgangssignale bezogen auf die zugehörige Auslenkung des Taststifts des Messtasters; und Ablegen charakteristischer Größen dieser wenigstens einer Korrekturfunktion in dem Messtaster oder einer der Werkzeugmaschine zugeordneten Maschinensteuerung; zumindest abschnittsweise kontinuierliches Abtasten der Kontur, in einer Abtastphase, eines in der Werkzeugmaschine eingespannten, noch nicht fertig bearbeiteten Werkstücks mit dem Taststift des in der Aufnahme der Werkzeugmaschine bereitgestellten Messtasters; Korrigieren des Ausgangssignals des Messtasters unter Verwendung der charakteristischen Größen der Korrekturfunktion; Bereitstellen der korrigierten Ausgangsdaten an die der Werkzeugmaschine zugeordnete Maschinensteuerung; Verrechnen der korrigierten Ausgangsdaten mit Maschinenkoordinaten der zu fertigenden Kontur für die Bearbeitung des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks um Steuerungsbefehle für die Werkzeugmaschine zu erhalten; und Bearbeiten des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks mit einem in der Aufnahme der Werkzeugmaschine bereitgestellten Werkzeug.



## Beschreibung

### Einleitung

**[0001]** Hier wird ein Verfahren zur Erfassung einer IST-Kontur eines in einer Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks mit einem kontinuierlich abtastenden Messinstrument entlang eines unkorrigierten SOLL-Pfades, dem Bestimmen der Abweichungen der IST-Kontur von der SOLL-Kontur und der Korrektur des unkorrigierten SOLL-Pfades für die anschließende Bearbeitung beschrieben. Außerdem werden die entsprechenden Systemkomponenten wie der spezifisch dazu eingerichtete Messtaster erläutert. Details hierzu sind in den Ansprüchen definiert; aber auch die Beschreibung und die Zeichnung enthalten relevante Angaben zur Struktur und zur Funktionsweise sowie zu Varianten des Verfahrens und den Systemkomponenten.

### Hintergrund

**[0002]** Bei einem in einer Werkzeugmaschine zu bearbeitenden Werkstück ist zum korrekten Materialabtrag die genaue Kenntnis der Werkstückkontur notwendig. Bisher werden dazu vor der Bearbeitung das in der Werkzeugmaschine eingespannte Werkstück mit einem digital tastenden Messinstrument durch dessen Taststift an mehreren Stellen Messwerte aufgenommen. Dieses digital tastende Messinstrument liefert ein Ein-Aus- oder Aus-Ein-Schaltensignal, wenn der Taststift des Messinstruments um ein vorbestimmtes Maß aus seiner Ruhelage ausgelenkt wird.

**[0003]** Dieses punktuelle Aufzeichnen der Kontur des eingespannten Werkstücks durch wiederholtes sequenzielles Antasten an einzelnen voneinander beabstandeten Stützpunkten erfolgt dabei senkrecht zur Werkstückkante/-oberfläche unter der Kontrolle eines die Werkzeugmaschine steuernden NC-Programms. Dieses sequenzielle Antasten ist sehr zeitintensiv. Je mehr Stützpunkte pro Werkstückkante/-oberfläche ermittelt werden müssen, desto länger dauert der gesamte Messvorgang. Außerdem kann der erhaltene Datensatz werkstückabhängig sehr groß sein, so dass der Speicher der NC-Steuerung zu einem erheblichen Teil belegt wird.

**[0004]** Alternativ dazu wird zuerst die Kontur eines Musterwerkstücks kontinuierlich abgetastet und in einem externen Messrechner abgelegt um bei fertig gestellten Werkstücken eine „In Ordnung“/„Nicht In Ordnung“ – Entscheidung zu treffen. Das Aufzeichnen und Auswerten der durch kontinuierliches Abtasten erhaltenen Messwerte in einem externen Messrechner bedingt auch höhere Kosten für zusätzliche Hardware und Kommunikationsschnittstellen.

### Problem

**[0005]** In einer Werkzeugmaschine soll zeit- und kostensparend bei hoher Fertigungsgenauigkeit die Kontur des Werkstücks erfasst werden; diese erfasste Kontur kann dann zum Beispiel für die (End-)Fertigung oder die Nachbearbeitung des Werkstücks verwendet werden.

### Lösung

**[0006]** Dieses Problem lösen die in den unabhängigen Ansprüchen definierten Verfahren, Vorrichtungen und Computerprogrammprodukte. Weitere Details sind Gegenstand jeweiliger abhängiger Ansprüche, der Beschreibung und der Zeichnungen.

### Vorteile, Ausgestaltungen, Varianten, Eigenschaften

**[0007]** Wenn ein Werkstück aus elastischem Material (Kunststoff, Metall) in einer Werkzeugmaschine nachbearbeitet werden soll, ist zwar die SOLL-Kontur dieses Werkstücks bekannt. Allerdings kann sich durch die elastischen Eigenschaften des Werkstücks die Kontur durch das Aufspannen in der Werkzeugmaschine ändern. Um die veränderte IST-Kontur dieses Werkstücks hinreichend genau (nach-)bearbeiten zu können, muss diese Veränderung durch einen Messvorgang erfasst und bei der anschließenden Bearbeitung des Werkstücks berücksichtigt werden.

**[0008]** Bei herkömmlichen Herangehensweisen werden diese Veränderungen der Kontur über einen digital schaltenden Messtaster erfasst und der anschließenden Bearbeitung zur Verfügung gestellt. Der Messvorgang mit einem digital schaltenden Messtaster ist sehr zeitaufwendig, da der Messtaster bei jedem Messpunkt senkrecht an die zu messende Kontur gefahren werden muss, um einen Messwert für diesen Messpunkt zu erhalten. Die Umpositionierungen von einem Messpunkt zum nächsten benötigen sehr viel Zeit.

**[0009]** Bei der hier vorgeschlagenen Lösung wird nicht mit einem digital schaltenden Messtaster gemessen, sondern mit einem konzeptionell davon abweichenden, kontinuierlich taktile messenden analogen Messtaster. Dieser in die Werkzeugaufnahme (Spindel) der Werkzeugmaschine einzusetzende Messtaster wird entlang eines unkorrigierten SOLL-Pfades des Werkstücks kontinuierlich verfahren, um für eine Folge von Messpunkten jeweils einen Messwert zu erhalten. Die für die Umpositionierungen eines digital schaltenden Messtasters benötigte Zeit kann dabei eingespart werden. Um die Genauigkeit zu erhöhen, kann die Anzahl der gewünschten Messpunkte ohne zusätzlichen Zeitaufwand erhöht werden. Bei einem digital schaltenden Messtaster würden sich durch das Erhöhen der Anzahl der Messpunkte auch die Anzahl der Umpositionierungen und damit die Zeit erhöhen. Bei dem kontinuierlich messenden analogen Messtaster verkürzt sich bei Erhöhung der Anzahl der Messpunkte nur der Abstand von einem Messpunkt zum nächsten.

**[0010]** Die Genauigkeit der fertiggestellten Kontur eines in der Werkzeugmaschine bearbeiteten Werkstücks kann bei gleichbleibender oder sogar geringerer Dauer des Ab tastens der Kontur in einer Ab tastphase gegenüber herkömmlichen Vorgehensweisen mit dem hier vorgestellten Verfahren deutlich erhöht werden.

**[0011]** Insbesondere wird hier ein Verfahren zum Erzeugen eines korrigierten SOLL-Pfades zum Bearbeiten eines Werkstücks in einer Werkzeugmaschine mit den folgenden Schritten vorgeschlagen: Bereitstellen eines einen Taststift aufweisenden taktile Messtasters in einer Aufnahme einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine, wobei der Messtaster dazu eingerichtet ist, einer Auslenkung seines Taststifts zumindest bereichsweise wenigstens annähernd proportionale Ausgangsdaten abzugeben; zumindest abschnittsweise kontinuierliches Ab tasten einer IST-Kontur durch Ab fahren des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks entlang eines unkorrigierten SOLL-Pfades mit einem Taststift des Messtasters; kontinuierliches Erzeugen von Ausgangsdaten durch den Messtaster, die Abweichungen der IST-Kontur von der SOLL-Kontur des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks wiedergeben; Übertragen dieser Ausgangsdaten von dem Messtaster an eine der Werkzeugmaschine zugeordnete numerische Steuerung; Zuordnen dieser Ausgangsdaten zu in der numerischen Steuerung bereitgehaltenen Maschinenkoordinaten, welche den unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergeben; Korrigieren des unkorrigierten SOLL-Pfades mit den Ausgangsdaten; und Ansteuern der Werkzeugmaschine mit dem korrigierten SOLL-Pfad bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks.

**[0012]** Der Begriff "SOLL-Kontur" meint die erwartete Kontur des Werkstücks (basierend auf den Werkstück-CAD-Daten, der Bearbeitungsgenauigkeit der Werkzeugmaschine, etc.). Unter einem "korrigierten SOLL-Pfad" ist hier der Pfad verstanden, welchen ein Werkzeug in der Werkzeugmaschine abzufahren hat, um bei der Bearbeitung des Werkstücks der IST-Kontur möglichst exakt zu folgen. Mit anderen Worten handelt es sich bei dem "korrigierten SOLL-Pfad" um den "korrigierten Werkzeugpfad". Mit dem Begriff "Maschinenkoordinaten" sind Achspositionen von Führungsschneise und Folgeschneise am jeweiligen Messpunkt gemeint.

**[0013]** Um die ortsabhängigen Ausgangsdaten den Maschinenkoordinaten korrekt zuordnen zu können wird vorzugsweise in der numerischen Steuerung eine Verzögerung bestimmt, die zumindest durch das Erfassen der IST-Kontur, das Erzeugen und das Übertragen der Ausgangsdaten von dem Messtaster an die numerische Steuerung hervorgerufen wird. Auch die Anzahl der an der numerischen Steuerung angeschlossenen Komponenten (zum Beispiel der Busteilnehmer) kann einen Einfluss auf die Verzögerung haben. Das Maß der Verzögerung kann automatisiert durch Laufzeitmessungen bestimmt werden. Vorzugsweise in der numerischen Steuerung können dann unter Berücksichtigung dieser Verzögerung die Ausgangsdaten den Maschinenkoordinaten zugeordnet werden.

**[0014]** In der numerischen Steuerung der Werkzeugmaschine werden in einer Variante die Maschinenkoordinaten in einem Anwendungsprogramm bereitgehalten. Nach dem Zuordnen werden die den unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergebenden Maschinenkoordinaten mit den Ausgangsdaten in dem Anwendungsprogramm miteinander verrechnet. Die Werkzeugmaschine wird mit den Maschinenkoordinaten des korrigierten SOLL-Pfades (= korrigierter Werkzeugpfad) aus dem Anwendungsprogramm bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks angesteuert.

**[0015]** In einer anderen Variante werden in der numerischen Steuerung der Werkzeugmaschine die Maschinenkoordinaten in einem Anwendungsprogramm bereitgehalten. Nach dem Zuordnen werden die den unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergebenden Maschinenkoordinaten und die Ausgangsdaten einer steuerungsinternen Kompensationsfunktion der numerischen Steuerung übergeben. Die Maschinenkoordinaten des unkorrigierten SOLL-Pfades werden zum Ausgeben an die Werkzeugmaschine unter Verwendung der Ausgangsdaten durch die steuerungsinterne Kompensationsfunktion korrigiert. Diese Korrektur kann – je nach Maschinenkonfiguration – unmittelbar zur Ausgabezeit, vor dem Ausgeben, oder nachher erfolgen. Die Werkzeugmaschine wird

mit den Maschinenkoordinaten des durch die steuerungsinterne Kompensationsfunktion korrigierten SOLL-Pfades (= korrigierter Werkzeugpfad) bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks angesteuert.

**[0016]** Hierzu kommt in einer Variante der Einsatz einer Achskopplung von Führungssachse und Folgeachse in Frage. Eine Korrekturwerttabelle bildet dabei die Grundlage für das Achskopplungssystem, indem sie den funktionellen Zusammenhang zwischen Führungs- und Folgewert schafft. Die NC-Steuerung berechnet aus einander zugeordneten Positionen von Führungs- und Folgeachse ein Polynom. Bei dem Achskopplungssystem werden dann eine Führungs- und eine Folgeachse synchron verfahren. Dabei ist die jeweilige Position der Folgeachse über die Korrekturwerttabelle oder ein daraus berechnetes Polynom eindeutig einer Position der Führungssachse zugeordnet. Die Führungssachse ist dabei diejenige Achse, die die Eingangswerte für die Korrekturwerttabelle liefert und die Folgeachse diejenige Achse, die über die Korrekturwerttabelle errechneten Positionen einnimmt.

**[0017]** Ein weiterer Aspekt zur effizienten Steigerung der Genauigkeit ergibt sich aus folgender Vorgehensweise:

- a) Bereitstellen eines einen Taststift aufweisenden Messtasters in einer Aufnahme einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine, wobei der Messtaster dazu eingerichtet ist, einer Auslenkung seines Taststifts zumindest bereichsweise wenigstens annähernd proportionale Ausgangsdaten abzugeben;
- b) Bestimmen, in einer Vorbereitungsphase, wenigstens einer Korrekturfunktion zumindest eines Bereichs der Ausgangsdaten bezogen auf die zugehörige Auslenkung des Taststifts des Messtasters; und
- c) Ablegen charakteristischer Größen dieser wenigstens einer Korrekturfunktion in dem Messtaster oder einer der Werkzeugmaschine zugeordneten Maschinensteuerung;
- d) zumindest abschnittsweise kontinuierliches Abtasten der Kontur, in einer Abtastphase, eines in der Werkzeugmaschine eingespannten, noch nicht fertig bearbeiteten Werkstücks mit dem Taststift des in der Aufnahme der Werkzeugmaschine bereitgestellten Messtasters um Ausgangsdaten des Messtasters zu erhalten;
- e) Korrigieren der Ausgangssignale des Messtasters unter Verwendung der charakteristischen Größen der Korrekturfunktion; und
- f) Bereitstellen der korrigierten Ausgangsdaten an die der Werkzeugmaschine zugeordnete Maschinensteuerung.

**[0018]** Diese Daten können dann in einer Fertigungsphase weiter verwendet werden, durch

- g) Verrechnen der korrigierten Ausgangsdaten mit Maschinenkoordinaten der zu fertigenden Kontur für die Bearbeitung des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks um Steuerungsbefehle für die Werkzeugmaschine zu erhalten; und
- h) Bearbeiten des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks mit einem in der Aufnahme der Werkzeugmaschine bereitgestellten Werkzeug.

**[0019]** Ein wesentlicher Unterschied zur herkömmlichen Vorgehensweise besteht darin, dass bei dem hier vorgestellten Verfahren zur Erfassung einer Kontur eines Werkstücks nicht die in einem externen Messrechner abgelegten Konturdaten eines Musterwerkstücks zur Fertigung eines Werkstücks verwendet werden. Vielmehr können charakteristische Koordinaten (z. B. Eck-, oder Endpunkte, Kanten, Extrema (Maxima, Minima)) des zu fertigenden Werkstücks verwendet werden, die mit den korrigierten Ausgangsdaten des Messtasters aus dem kontinuierlichen Abtasten der Kontur des noch nicht fertig bearbeiteten Werkstücks in der Werkzeugmaschine verrechnet oder verknüpft werden, um Steuerungsbefehle für die Werkzeugmaschine zu erhalten.

**[0020]** Das hier beschriebene Verfahren zeichnet sich auch dadurch aus, dass die obigen Verfahrensschritte in einer Werkzeugmaschine ausgeführt werden, wobei der den Taststift aufweisende Messtaster anstelle eines Werkzeugs in einer Spindel der Werkzeugmaschine eingesetzt wird und die korrigierten Ausgangsdaten des Messtasters an eine Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine ausgegeben werden können. Alternativ dazu können auch die noch nicht korrigierten Ausgangsdaten des Messtasters an eine Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine ausgegeben werden um dann in der Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine unter Verwendung der charakteristischen Größen der wenigstens einen Korrekturfunktion korrigiert zu werden.

**[0021]** Mit "Ausgangsdaten" sind im Folgenden sowohl die korrigierten als auch die unkorrigierten Ausgangsdaten gemeint. Bei den "unkorrigierten Ausgangsdaten" handelt es sich um die vom Taster erzeugten Ausgangssignale, vorzugsweise in Form einer Analoggröße (beispielsweise Ausgangsspannung in Volt). Die "korrigierten Ausgangsdaten" stehen für die berechneten Auslenkungen des Taststifts (beispielsweise in mm). Die Linearisierung oder Umrechnung der zur Auslenkung des Taststifts zumindest bereichsweise wenigstens annähernd proportionalen Ausgangsdaten erfolgt mittels der „Korrekturfunktion“. Die Verarbeitung "unkorrigier-

ter" Daten in "korrigierte" bezieht sich einmal auf den Prozess der Abbildung der erfassten Ausgangsspannung, also dem Ausgangssignal des Messtastersensors in Auslenkungswerte, also den Ausgangsdaten. Insgesamt findet eine Umrechnung oder Überführung der Spannungswerte in die Auslenkungswerte statt.

**[0022]** Im Vorliegenden werden die „Korrekturfunktion“, die Verarbeitung "unkorrigierter" Daten in "korrigierte" neben dieser Linearisierung/Umrechnung auch bei der SOLL-Pfad-Korrektur verwendet.

**[0023]** Die Aufzeichnung der die Kontur des noch nicht fertig bearbeiteten Werkstücks wiedergebenden unkorrigierten Ausgangsdaten, das Berechnen von korrigierten Ausgangsdaten aus den unkorrigierten Ausgangsdaten unter Verwendung wenigstens einer Korrekturfunktion, das Verrechnen der korrigierten Ausgangsdaten mit Maschinenkoordinaten der zu fertigenden Kontur und das Erzeugen der Steuerungsbefehle für die Werkzeugmaschine für die Endbearbeitung des Werkstücks kann ohne Unterstützung eines externen Messrechners innerhalb eines NC-Programms der Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine stattfinden.

**[0024]** Für das Bestimmen wenigstens einer Korrekturfunktion zumindest eines Bereichs der Ausgangsdaten bezogen auf die zugehörige Auslenkung des Taststifts des Messtasters in einer Vorbereitungsphase sind unterschiedliche Varianten vorgesehen. Dazu ist zunächst der Verlauf der Kennlinie des Messtasters relevant. In der Realität ist der Verlauf der Kennlinie nur auf einem mittleren Teil des analogen Messbereichs linear. An einem oder beiden Rändern der Kennlinie befinden sich Krümmungsabschnitte. Die Kennlinie beschreibt hierbei den exakten Zusammenhang zwischen der Auslenkung des Taststiftes (zum Beispiel in Längeneinheiten) und dem im Messtaster aufgrund der Auslenkung des Taststiftes erzeugten analogen Ausgangssignal (zum Beispiel als Spannungswert).

**[0025]** Abhängig von der Länge des Taststifts des Messtasters zwischen zum Beispiel 30 mm und 100 mm kann der Messtaster einen Analoghub zwischen zum Beispiel 500  $\mu\text{m}$  und 1200  $\mu\text{m}$  haben. Bei einem Spannungsbereich des Ausgangssignals zwischen zum Beispiel 0 Volt und 10 Volt kann dann der Messtaster eine Auflösung zwischen zum Beispiel 5,0 mV/ $\mu\text{m}$  und 12,6 mV/ $\mu\text{m}$  haben.

**[0026]** Um praktisch den gesamten analogen Messbereich für die Messwertaufnahme nutzen zu können und dabei mit hoher Genauigkeit messen zu können, ist diese Kennlinie so genau wie möglich zu bestimmen. So lässt sich – abhängig vom eingesetzten Messtaster, dessen Auslenkungssensor, der Länge und der Steifigkeit des Taststifts sowie der Beschaffenheit (Form, Größe, Material) des Tastkörpers am Ende des Taststifts – zum Beispiel eine Kennlinie in einem Messbereich zumindest zwischen etwa 20% und etwa 90% des Ausgangssignals mit einem Polynom ab 6. Ordnung sehr genau korrigieren:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6$$

**[0027]** Die Ordnung des zur Korrektur zu verwendenden Polynoms kann über einen Parameter in dem Verfahren gewählt werden. Zum Beispiel kann, abhängig von der geforderten Messgenauigkeit, dem verwendeten Messbereich und der Nichtlinearität des Messtasters auch ein Korrekturpolynom 1., 2., oder 3. Ordnung verwendet werden:

1. Ordnung:  $y = a_0 + a_1x$

2. Ordnung:  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2$

3. Ordnung:  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$

**[0028]** Nach einer Variante werden die Koeffizienten  $a_0, \dots, a_n$  des Polynoms  $y = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$  bestimmt und während der Messung die Ausgangssignale des Messtasters korrigiert, indem die jeweiligen unkorrigierten Ausgangsdaten als  $x$  in die Polynomfunktion eingesetzt wird um die korrigierten Ausgangsdaten als  $y$  durch Berechnen des Polynoms mit dem jeweiligen Wert  $x$  zu erhalten.

**[0029]** Zur Bestimmung der Koeffizienten  $a_0, \dots, a_n$  des Polynoms sind unterschiedliche Varianten vorgesehen. Bei einer Variante des vorliegenden Verfahrens erfolgt eine Polynomapproximation nach der Methode der kleinsten Quadrate. Dazu werden in der Vorbereitungsphase für zumindest einen Teil des Messbereichs des Messtasters eine Vielzahl (unkorrigierter) Ausgangsdaten bezogen auf die zugehörige Auslenkung des Taststifts des Messtasters gemessen und als Tabelle aus Datenpunkten gespeichert. In diese Ansammlung aus Datenpunkten wird eine möglichst genau passende, parameterabhängige Modellkurve gelegt. Dazu bestimmt man in einer Variante die Parameter dieser Kurve numerisch, indem die Summe der quadratischen

Abweichungen der Kurve von den beobachteten Punkten minimiert wird. Die Parameter dieser Funktion werden so bestimmt, dass die Quadratsumme der senkrechten Abweichungen der jeweiligen Ausgangsdaten von der Kurve minimiert wird.

**[0030]** Bei einer anderen Variante des vorliegenden Verfahrens wird ein Polynom interpoliert. Dabei wird die Polynomfunktion derart konstruiert, dass diese an den Messwerten exakt erfüllt ist. Die Stützstellen und Stützwerte, also die  $x$ - und  $y$ -Werte sind die Koordinaten der vorher erfassten Datenpunkte. Eine Variante hierfür ist die Lagrange-Interpolation. Dabei werden zu  $n + 1$  paarweise verschiedenen Stützstellen  $x_0, \dots, x_n$  und zugehörigen gegebenen Stützwerten  $y_0, \dots, y_n$  ein Polynom  $p$  so bestimmt, so dass die Interpolationsbedingung  $p(x_k) = y_k, k = 0, \dots, n$ , erfüllt ist. Bei der relativ einfachen Lagrangeschen Darstellung des Interpolationspolynoms hängt jedes Basispolynom von sämtlichen Stützstellen  $x_0, \dots, x_n$  ab. Wenn zur Steigerung der Genauigkeit eine Stützstelle  $x_{n+1}$  hinzugenommen werden soll, müssen hier sämtliche Basispolynome neu bestimmt werden.

**[0031]** Um ein Interpolationspolynom zu finden, wird in einer anderen Variante des vorliegenden Verfahrens die Newtonsche Darstellung des Lagrangeschen Interpolationspolynoms gewählt. Sie löst dieses Problem durch eine andere Wahl von Basispolynomen. Jedes Basispolynom  $N_k(x)$  der Newtonschen Darstellung hängt nur von den Stützstellen  $x_0, \dots, x_k$  ab. Bei Hinzunahme einer weiteren Stützstelle  $x_{k+1}$  müssen die vorangehenden Basispolynome nicht neu berechnet werden. Sowohl bei der Newton-, als auch bei der Lagrange-Interpolation hängt die Genauigkeit der durch das Verfahren erhaltenen Polynomkoeffizienten von der Anzahl der Stützstellen ab. Da bei der Newtonschen Darstellung die zusätzlichen weiteren Stützstellen  $x_{k+1}$  nicht zu einer Neuberechnung der vorangehenden Basispolynome führen, kann die Genauigkeit dieses Verfahrens ohne gleichzeitig zunehmenden Speicherplatzbedarf gesteigert werden.

**[0032]** Ein Polynom kann nur mit Multiplikationen und Additionen berechnet werden. Dazu dient bei einer Variante des vorliegenden Verfahrens das Horner-Schema. Das Horner-Schema erfordert im Vergleich zur direkten Auswertung nur noch etwa die Hälfte der Multiplikationen. Zudem sind durch Berechnung nach dem Horner-Schema allfällige Rechenfehler kleiner.

**[0033]** Das so gefundene Polynom ist durch seine Polynomkoeffizienten  $a_0, \dots, a_n$  eindeutig definiert. Diese werden als charakteristische Größen dieser wenigstens einen Korrekturfunktion in dem Messtaster oder einer der Werkzeugmaschine zugeordneten Maschinensteuerung abgelegt.

**[0034]** Je nach dem Verlauf der Kennlinie des Messtasters können auch mehrere Polynome mit ggf. unterschiedlicher Ordnung bzw. deren Polynomkoeffizienten  $a_0, \dots, a_n$  bestimmt werden, um den Verlauf der Kennlinie des Messtasters im interessierenden Messbereich abschnittsweise (für jeden Abschnitt ein Polynom) mit hinreichender Genauigkeit kompensieren oder korrigieren zu können.

**[0035]** Sofern die Polynomkoeffizienten  $a_0, \dots, a_n$  in der der Werkzeugmaschine zugeordneten Maschinensteuerung abgelegt werden, erfolgt dies bei einer Variante des vorliegenden Verfahrens in globalen Variablen, damit die korrigierten Ausgangsdaten des Messtasters während der Abtastphase möglichst einfach und schnell berechnet werden können.

**[0036]** Sofern die Korrekturfunktion in dem Messtaster selbst abgelegt wird, können dies neben den die Polynomkoeffizienten  $a_0, \dots, a_n$  auch eine Umsetzungstabelle (engl.: look up table, LUT) sein. In die Umsetzungstabelle werden dann in der Vorbereitungsphase aus dem Korrekturpolynom entsprechend vorberechnete Werte eingetragen. Dies vermeidet den Rechenaufwand während der Abtastphase. Ein im Messtaster befindlicher Prozessor muss dann nicht die notwendige Rechenleistung für die Polynomauswertung bereitstellen, um mit der hohen Datenerfassungsrate des Messtasters Schritt zu halten. Deshalb wird während der abtastenden Datenerfassung des Messtasters in der Abtastphase kein Polynom berechnet. Vielmehr wird direkt auf die während der Vorbereitungsphase in die Umsetzungstabelle eingetragenen Werte der Polynomrechnung zugegriffen. Diese Werte werden dann als korrigierte Ausgangsdaten der der Werkzeugmaschine zugeordneten Maschinensteuerung bereitgestellt.

**[0037]** Beim Korrigieren der Ausgangsdaten wird in einer Variante des vorliegenden Verfahrens aus drei, fünf, sieben oder mehr, also einer ungeraden Anzahl aufeinanderfolgender Ausgangsdaten ein gleitender gewichteter Mittelwert gebildet. Dies kompensiert zusätzlich zufällige Schwankungen der Ausgangsdaten.

**[0038]** Die Maschinenkoordinaten des zu fertigenden Werkstücks werden mit den korrigierten Ausgangsdaten verrechnet, wobei in einer Variante des vorliegenden Verfahrens zum Ermitteln der Steuerungsbefehle für die Werkzeugmaschine eine lineare, quadratische oder kubische Spline-Interpolation aus den korrigierten

Ausgangsdaten zwischen den jeweiligen ermittelten Stützpunkten ausgeführt wird, um das Werkstück mit dem Werkzeug zur Bearbeitung abzufahren.

**[0039]** Die Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens ist ein System mit einem einen Taststift aufweisenden Messtaster. Der Messtaster ist zur Aufnahme anstelle eines Werkzeugs in einer Spindel der Werkzeugmaschine in einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine eingerichtet und bestimmt. Dieser Messtaster ist dazu eingerichtet, ein einer Auslenkung seines Taststifts zumindest bereichsweise wenigstens annähernd proportionale Ausgangsdaten abzugeben. Der Verlauf der Ausgangsdaten gibt mit dem Taststift des Messtasters abgefahrene Abweichungen der IST-Kontur eines Werkstücks gegenüber der SOLL-Kontur zumindest annähernd wieder.

**[0040]** Der Messtaster ist hier ein analog abtastender Messtaster, welcher für die Konturabtastung in die Spindel der Werkzeugmaschine eingewechselt wird und die unkorrigierten Ausgangsdaten oder in einem im Messtaster befindlichen Prozessor daraus errechneten korrigierten Ausgangsdaten drahtlos (durch eine Infrarot- oder Funkschnittstelle) oder drahtgebunden an die Steuerung der Werkzeugmaschine übermittelt. Ein analog abtastender Messtaster liefert ein Ansteigen und Abfallen einer Auslenkung der Tastspitze des Messtasters wiedergebende Ausgangsdaten. Dies ist im Unterschied zu einem digital abtastenden Messtaster zu sehen, welcher lediglich ein Ein-Aus- oder Aus-Ein-Schaltsignal liefert, wenn der Taststift um ein vorbestimmtes Maß aus seiner Ruhelage ausgelenkt wird.

**[0041]** Eine Variante eines solchen Messtasters funktioniert mit einem z. B. rotationssymmetrischen Messwerk, bei dem ein analoges Mess-Signal aus der Abschattung einer Miniaturlichtschranke generiert wird. Dabei wird der Beginn der Abschattung der Lichtschranke erkannt. Das analoge Mess-Signal kann auch den Anstieg und den Abfall der Abschattung wiedergeben, welche entstehen, wenn die Tastspitze des Messeinsatzes mehr oder weniger ausgelenkt wird. So wird ein analoges Mess-Signal generiert.

**[0042]** Der Messtaster hat einen Tragkörper, an dem zum Aufnehmen eines Taststifts eine Taststiftaufnahme angeordnet ist. Des Weiteren hat der Messtaster einen Analogsensor, der Bewegungen des Tragkörpers in für die Kontur einer Oberfläche des Werkstücks charakteristische Ausgangssignale umsetzt. Der Messtaster hat einen mit dem Tragkörper zu koppelnden Taststift, der einen stangenförmigen Schaft und einen an dem Schaft angebrachten Tastkopf umfasst. Mit dem Analogsensor ist eine Verarbeitungseinheit gekoppelt, um aus den Ausgangssignalen zumindest eine für die Kontur der Oberfläche des Werkstücks charakteristische Messgröße zu ermitteln, wobei die Verarbeitungseinheit entweder in dem Gehäuse des Messtasters angeordnet ist, oder davon getrennt ist.

**[0043]** Die Verarbeitungseinheit weist einen Prozessor und einen Speicher auf, und ist dazu eingerichtet und bestimmt, folgende Schritte auszuführen:

- a) Bestimmen, in einer Vorbereitungsphase, wenigstens einer Korrekturfunktion zumindest eines Bereichs der Ausgangsdaten bezogen auf die zugehörige Auslenkung des Taststifts des Messtasters; und
- b) Ablegen charakteristischer Größen dieser wenigstens einer Korrekturfunktion in dem Messtaster oder einer der Werkzeugmaschine zugeordneten Maschinensteuerung;
- c) zumindest abschnittsweise kontinuierliches Abtasten der Kontur, in einer Abtastphase, eines in der Werkzeugmaschine eingespannten, noch nicht fertig bearbeiteten Werkstücks mit dem Taststift des in der Aufnahme der Werkzeugmaschine bereitgestellten Messtasters;
- d) Korrigieren der Ausgangsdaten des Messtasters unter Verwendung der charakteristischen Größen der Korrekturfunktion; und
- e) Bereitstellen der korrigierten Ausgangsdaten an die der Werkzeugmaschine zugeordnete Maschinensteuerung.

**[0044]** In einer Variante des Konturmeseinsatzes ist dieser ausgestaltet mit einem Gehäuse, in dem ein ringförmiges Stützlager ausgebildet ist, das eine X, Y-Lagerebene und eine dazu normale zentrale Achse Z des Konturmeseinsatzes definiert. Der Konturmeseinsatz hat einen Tragkörper, an dem zum Aufnehmen eines Taststifts eine Taststiftaufnahme zentral angeordnet ist. Der Konturmeseinsatz hat des Weiteren ein Übertragungsglied, das im Gehäuse entlang der zentralen Achse Z verschiebbar geführt ist, um beliebige Auslenkungen des Tragkörpers aus seiner Ruhelage in geradlinige Bewegungen umzusetzen. Das Übertragungsglied fluchtet in seiner Ruhelage zumindest abschnittsweise mit der zentralen Achse Z. Der Konturmeseinsatz hat außerdem einen Analogsensor, der die geradlinigen Bewegungen des Übertragungsgliedes in für die Kontur einer Oberfläche eines Werkstücks charakteristische Ausgangsdaten umsetzt. Mit dem Übertragungsglied ist ein stiftförmiges Bauteil oder der Taststift gekoppelt, das den stangenförmigen Schaft und den an dem Schaft angebrachten Tastkopf umfasst. Dabei umfasst der Tastkopf des Konturmeseinsatzes zumindest einen Ab-

schnitt eines zu der zentralen Achse Z im Wesentlichen rotationssymmetrischen und im Wesentlichen kugelförmigen Tastkopfes.

**[0045]** Hier kann der Analogsensor eine Lichtschranke der oben beschriebenen Art sein.

**[0046]** Der Stab oder Schaft des Taststifts kann aus unterschiedlichen Materialien einschließlich Hartmetall, nicht-magnetischem, rostfreiem Stahl, Keramik und Kohlefasern sein.

**[0047]** Das hier beschriebene Konturmessverfahren zeichnet sich auch dadurch aus, dass die obigen Verfahrensschritte in einer Werkzeugmaschine ausgeführt werden, wobei der Konturmesseinsatz anstelle eines Werkzeugs in einer Spindel der Werkzeugmaschine eingesetzt wird und die Messsignale und/oder die Messgröße an eine Maschinensteuerung der Werkzeugmaschine ausgegeben werden.

**[0048]** Dabei können die Verfahrensschritte nach und/oder vor Bearbeitungsschritten mittels wenigstens eines Werkzeuges an dem Werkstück in der Werkzeugmaschine ausgeführt werden.

**[0049]** Die hier vorgestellten Konturmesseinsätze zur Konturmessung von Werkstückoberflächen können direkt in den Zerspanungsprozess integriert werden. Durch die prozessintegrierte Überwachung der Werkstückkonturen sind die Fertigungsprozesse wesentlich effizienter als bisher. Eine mögliche Steigerung der Produktivität der Werkzeugmaschine wird erreicht durch Eliminierung langwieriger, in Einzelschritten tastender Konturmessungen.

**[0050]** In den Zeichnungen sind Ausführungsformen und Abwandlungen des Konturmesseinsatzes mit dem Taststift mit einem zur Mittelängsachse des Taststifts rotationssymmetrischen Tastkopf dargestellt.

**[0051]** Fig. 1 zeigt schematisch eine Variante eines hier offenbarten Systems zur Konturmessung in der Werkstückbearbeitung.

**[0052]** Fig. 1a zeigt schematisch ein Bearbeiten der Kante eines Werkstücks durch Erzeugen einer Fase mittels eines Fasenfräasers.

**[0053]** Fig. 2 und Fig. 3 zeigen in Ruhelage bzw. in ausgelenkter Stellung einen schematischen Längsschnitt durch einen Messtaster zur Konturmessung aus Fig. 1.

**[0054]** Fig. 4 zeigt einen Verlauf einer Kennlinie eines Messtasters aus dem System zur Konturmessung in Fig. 1

**[0055]** Fig. 5 veranschaulicht einen Vergleich zwischen mit dem Messtaster aus Fig. 1 gemessenen Stützpunkten und aus einem berechneten Polynom ermittelten Werten.

**[0056]** Fig. 6 veranschaulicht in einem Flussdiagramm den Ablauf dreier voneinander getrennter Phasen „Vorbereitungsphase“, „Abtastphase“ und „Fertigungsphase“ eines hier vorgestellten Verfahrensaspekts.

#### Detaillierte Beschreibung der Zeichnung

**[0057]** In Fig. 1 ist eine Aufnahme AN einer Spindel einer nicht weiter veranschaulichten Werkzeugmaschine WZM gezeigt. In dieser Aufnahme AN ist anstelle eines sonst darin aufgenommenen Werkzeugs ein Messtaster MT zur Konturmessung aufgenommen. Dieser Messtaster MT hat einen Taststift TS. Des Weiteren hat der Messtaster MT einen Analogsensor AS, der Bewegungen des Taststifts TS in für die Kontur einer Oberfläche eines Werkstücks WS charakteristische Ausgangsdaten umsetzt. Der Taststift TS hat einen stangenförmigen Schaft und einen an dem Schaft angebrachten Tastkopf TK. Mit dem Analogsensor AS ist eine Verarbeitungseinheit ECU gekoppelt, in der ein Analog-Digital-Wandler ADC die Ausgangsdaten des Analogensors AS in für einen Prozessor CPU verarbeitbare Daten wandelt. Die CPU ist mit einem nicht weiter veranschaulichten Speicher verbunden, in dem ein Programm enthalten ist, um die Ausgangsdaten in ein Format umzusetzen, das eine NC-Steuerung NCC verarbeiten kann. Die NC-Steuerung NCC erzeugt unter Verwendung der Ausgangsdaten des Messtasters MT Maschinensteuerbefehle MSB, welche in X-, Y-, Z-Achsantriebe der Werkzeugmaschine WZM eingespeist werden. Diese X-, Y-, Z-Achsantriebe der Werkzeugmaschine WZM positionieren die Aufnahme AN mit dem Messtaster MT entsprechend diesen Maschinensteuerbefehlen MSB. Diese Maschinensteuerbefehle MSB beschreiben einen Konturabtastpfad KAP, entlang dem sich das Werkstück WS und der Tastkopf TK des Messtasters MT relativ zueinander bewegen. In der vorliegenden Variante bewegt



sich der Messtaster MT relativ zum feststehenden Werkstück WS. Es ist aber auch das umgekehrte Szenario vorgesehen, bei dem sich das Werkstück WS relativ zum feststehenden Messtaster MT bewegt. Der "Kontur-abtastpfad KAP" ist dabei gleichbedeutend mit dem "unkorrigierten SOLL-Pfad".

**[0058]** In der in **Fig. 1** veranschaulichten Variante befindet sich die Verarbeitungseinheit ECU außerhalb des Messtasters MT. Es sind aber auch Varianten vorgesehen, bei denen die Verarbeitungseinheit ECU in den Messtaster MT integriert ist. Des Weiteren sind Varianten vorgesehen, bei denen die Signalverarbeitung einschließlich der Korrektur der Ausgangsdaten in der in **Fig. 1** veranschaulichten NC-Steuerung NCC stattfindet. Es sind aber auch Varianten vorgesehen, bei denen die Verarbeitungseinheit ECU (innerhalb oder außerhalb des Messtasters MT) zumindest Teile der Signaldatenverarbeitung (einschließlich der Korrektur der Ausgangsdaten) ausführt. Sofern in dem Messtaster MT Teile der Signalverarbeitung ausgeführt werden, ist auch eine Kommunikationsverbindung zwischen der NC-Steuerung NCC und dem Messtaster MT vorgesehen, damit z. B. die NC-Steuerung NCC dem Messtaster MT Informationen über Maschinenkoordinaten des Messtasters übermittelt. Mit anderen Worten ist in diesem Fall die Verbindung zwischen der NC-Steuerung NCC und dem Messtaster MT eine bidirektionale, drahtlose oder drahtgebundene Schnittstelle.

**[0059]** **Fig. 1a** zeigt schematisch ein Bearbeiten der Kante eines Werkstücks WS. Hier wird eine Fase mittels eines Fasenfräasers WZG erzeugt. Die Aufgabe ist dabei, auch bei einem Werkstück WS mit welliger Deck- und/oder Seitenfläche DF, SF (siehe vergrößerter Ausschnitt) eine gleichmäßige Fase, also eine Fase mit konstanter Breite, zu erzeugen. Dabei ist die X-Achse die Führung Achse, und die Z-Achse oder die Y-Achse die Folgeachse. In einem vorherigen Arbeitsschritt wurde die IST-Kontur der Deck- und/oder der Seitenfläche DF, SF mit dem Messtaster MT zur Konturmessung entlang des unkorrigierten SOLL-Pfades abgetastet, um die Abweichungen der IST-Kontur von der SOLL-Kontur zu ermitteln. Nun kann das Bearbeiten des Werkstücks (hier das Anbringen der Fase) unter Berücksichtigung der Ausgangsdaten aus der Abtastung erfolgen. Dazu wird der Fasenfräser entlang des korrigierten SOLL-Pfades (= korrigierter Werkzeugpfad) verfahren, wobei der Fasenfräser entsprechend der Korrekturen des SOLL-Pfades zum Beispiel in Z-Richtung angehoben oder abgesenkt und/oder in Y-Richtung seitlich versetzt wird.

**[0060]** Bei der drahtlosen Übertragung der Ausgangsdaten von dem Messtaster an die der Werkzeugmaschine WZM zugeordnete Maschinensteuerung NCC tritt eine Verzögerung (Latenzzeit) auf. Um die Ausgangsdaten den Maschinenkoordinaten korrekt zuordnen zu können wird vorzugsweise in der numerischen Steuerung eine Verzögerung bestimmt, die zumindest durch das Erfassen der IST-Kontur, das Erzeugen und das Übertragen der Ausgangsdaten von dem Messtaster an die numerische Steuerung hervorgerufen wird.

**[0061]** In der numerischen Steuerung werden die Ausgangsdaten des Messtasters den Maschinenkoordinaten unter Berücksichtigung der Verzögerung zwischen der Erfassung und dem Verarbeiten der Daten in der numerischen Steuerung zugeordnet. Dazu werden die eingehenden Ausgangsdaten und die jeweiligen Maschinenkoordinaten in ein FIFO – First In First Out – Schieberegister eingespeist, dessen Inhalt so getaktet ausgegeben wird, dass dieser Zeitversatz kompensiert ist. Alternativ dazu kann auch in der Maschinensteuerung NCC eine Tabelle geführt werden, in der in einer ersten Zeile die jeweiligen Maschinenkoordinaten und in einer zweiten Zeile die Ausgangsdaten um die ermittelte Verzögerung (zeitlich nach vorne) versetzt eingetragen werden. Dabei wird in einer Variante auch ein gleitender gewichteter Mittelwert über eine Anzahl von in einer Variante zum Beispiel fünf Ausgangsdaten zur Kompensation von Schwankungen der Ausgangsdaten gebildet.

**[0062]** Würde diese Verzögerung nicht berücksichtigt, führte dies dazu, dass sich die Spindel der Werkzeugmaschine WZM zum Zeitpunkt der Messwertaufnahme im Messtaster an einem anderen Ort befindet, als zum Zeitpunkt, an dem die zugehörigen Ausgangsdaten in der Maschinensteuerung NCC ankommen. Dieser Fehler würde sich in die Bearbeitung des Werkstücks fortpflanzen.

**[0063]** Der taktile Messtaster MT wird in einer Aufnahme der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine eingespannt. Der Messtaster gibt einer Auslenkung seines Taststifts zumindest bereichsweise wenigstens annähernd proportionale Ausgangsdaten ab. Der Messtaster MT tastet eine IST-Kontur durch Abfahren des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks WS entlang eines unkorrigierten SOLL-Pfades mit seinem Taststift ab. Dabei erzeugt der Messtaster MT kontinuierlich Ausgangsdaten, die Abweichungen der IST-Kontur von der SOLL-Kontur entlang der Führung Achse (in der **Fig. 1a** der X-Achse) des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks WS wiedergeben. Diese Ausgangsdaten werden von dem Messtaster MT an eine der Werkzeugmaschine zugeordnete numerische Steuerung NCC übertragen. In der numerischen Steuerung werden bereitgehaltene Maschinenkoordinaten, welche den unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergeben, diesen

Ausgangsdaten zugeordnet. Dieses Zuordnen geschieht in oben beschriebener Weise unter Berücksichtigung der Verzögerung mit den Ausgangsdaten des Messtasters.

**[0064]** In einer Variante werden in der numerischen Steuerung der Werkzeugmaschine die Maschinenkoordinaten in einem Anwendungsprogramm bereitgehalten. Nach dem Zuordnen werden die den unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergebenden Maschinenkoordinaten mit den Ausgangsdaten in dem Anwendungsprogramm miteinander verrechnet um den korrigierten SOLL-Pfad zu erhalten. Später wird die Werkzeugmaschine mit den Maschinenkoordinaten des korrigierten SOLL-Pfades (= korrigierter Werkzeugpfad) aus dem Anwendungsprogramm bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks angesteuert.

**[0065]** In einer anderen Variante werden in der numerischen Steuerung der Werkzeugmaschine die Maschinenkoordinaten in einem Anwendungsprogramm bereitgehalten. Nach dem Zuordnen werden die den unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergebenden Maschinenkoordinaten und die Ausgangsdaten einer steuerungsinternen Kompensationsfunktion der numerischen Steuerung übergeben. Dies kann in einer Variante ein Kopplungssystem einer Folgeachse an eine Leitachse sein. Die Maschinenkoordinaten des unkorrigierten SOLL-Pfades werden zum nach dem Ausgeben an die Werkzeugmaschine unter Verwendung der Ausgangsdaten durch die steuerungsinternen Kompensationsfunktion korrigiert. Die Werkzeugmaschine wird mit den Maschinenkoordinaten des durch die steuerungsinterne Kompensationsfunktion korrigierten SOLL-Pfades (= korrigierter Werkzeugpfad) bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks angesteuert.

**[0066]** Die **Fig. 2** und **Fig. 3** zeigen den Messtaster MT aus **Fig. 1** in Ruhelage bzw. in ausgelenkter Stellung. Dieser Messtaster MT hat ein im wesentlichen zylindrisches Gehäuse, das aus einem proximalen, in den Zeichnungen oberen Gehäuseteil **12** mit einem Ansatz **14** einerseits und einem distalen, in den Zeichnungen unteren Gehäuseteil **16** mit einem radial nach innen ragenden Gehäuseflansch **18** andererseits zusammengesetzt ist.

**[0067]** Die beiden Gehäuseteile **12** und **16** des Messtasters MT sind miteinander dicht und fest verbunden, beispielsweise unmittelbar miteinander verschraubt. An der proximalen, in der Zeichnung oberen Seite des radial nach innen ragenden Gehäuseflansches **18** ist ein ringförmiges Stützlager **20** in Form einer Ringrille ausgebildet, das eine radial innere, konvexe Kegelstumpffläche **22** und eine radial äußere, konkave Kegelstumpffläche **24** aufweist; diese beiden Kegelstumpfflächen sind bei den dargestellten Messtastern im axialen Querschnitt ungefähr rechtwinklig zueinander angeordnet. In einer Variante ist die radial äußere, konkave Kegelstumpffläche **24** steiler, beispielsweise um  $75^\circ$  gegen die Ebene der distalen Stirnfläche des Gehäuseflansches **18** geneigt. In jedem Fall ist es zweckmäßig, wenn die Kegelstumpfflächen **22** und **24** mit reibungsminderndem Material beschichtet sind.

**[0068]** Innerhalb des distalen Gehäuseteils **16** des Konturmesseinsatzes M ist ein pilzförmiger Tragkörper **26** angeordnet, an dem ein ringförmiges Gegenlager **28** ausgebildet ist. Das Gegenlager **28** hat einen ungefähr halbkreisförmigen oder aus mehreren Bogenabschnitten mit unterschiedlichen Radien zusammengesetzten Querschnitt und lässt sich in jedem Fall als Ringwulst bezeichnen. Der Tragkörper **26** nimmt in **Fig. 2** eine Ruhelage ein, in der das Gegenlager **28** das Stützlager **20** längs einer ebenen kreisförmigen Berührungslinie **30** – und sonst nirgends – berührt. Diese kreisförmige Berührungslinie liegt auf der konvexen, radial inneren Kegelstumpffläche **22** des ringförmigen Stützlagers **20**. Von der konkaven, radial äußeren Kegelstumpffläche **24** des Stützlagers hat das ringförmige Gegenlager **28** hingegen einen minimalen Abstand von vorzugsweise einigen wenigen  $\mu\text{m}$  (2–10  $\mu\text{m}$ ), solange der Tragkörper **26** seine Ruhelage einnimmt. Dieser Abstand kann dabei an einer Stelle auf den Betrag Null abnehmen, d. h. dass der Tragkörper **26** eine leicht exzentrische Ruhelage einnimmt, in der das Gegenlager **28** die radial äußere, konkave Kegelstumpffläche **24** des Stützlagers **20** an einem Punkt berührt. Die Ebene der Berührungslinie **30** wird im Folgenden als Lagerebene X, Y bezeichnet; orthonormal, also rechtwinklig dazu, erstreckt sich die im Folgenden als zentrale Achse Z bezeichnete Achse des Messtasters MT, d. h. seines Gehäuses **12**, **14**. Der Tragkörper **26** hat eine eigene Längsachse T, die in Ruhelage sowie bei rein axialer Auslenkung des Tragkörpers **26** mit der zentralen Achse Z praktisch übereinstimmt.

**[0069]** Wenn der Tragkörper **26** des Messtasters MT durch Kippen aus seiner Ruhelage ausgelenkt wird, wie dies z. B. in **Fig. 3** dargestellt ist, so berührt das ringförmige Gegenlager **28** die radial innere, konvexe Kegelstumpffläche **22** des ringförmigen Stützlagers **20** nur noch in einem radial inneren Berührungspunkt **32**; zusätzlich berührt das Gegenlager **28** die radial äußere, konkave Kegelstumpffläche **24** des Stützlagers **20** in einem radial äußeren Berührungspunkt **34**.

**[0070]** Der Tragkörper **26** des Messtasters MT ist mit einer zentralen Taststiftaufnahme **36** ausgestattet, die sich in distaler Richtung entlang der Längsachse T erstreckt und in Richtung der Längsachse T am Tragkörper **26** des Messtasters MT verschiebbar ist. Die Taststiftaufnahme **36** ist dazu bestimmt, einen auswechselbaren Taststift **38** aufzunehmen, der einen Tastkopf TK trägt.

**[0071]** Bei dem in **Fig. 2** und **Fig. 3** dargestellten Messtaster MT ist jeweils am distalen Ende des Ansatzes **14**, innerhalb des proximalen Gehäuseteils **12**, ein bezüglich der zentralen Achse Z konzentrischer kreisringförmiger Federsitz **42** ausgebildet, und diesem steht ein ebenfalls kreisringförmiger Federsitz **44** gegenüber, der an der proximalen Seite des Tragkörpers **26** konzentrisch zu dessen Längsachse Z ausgebildet ist. Zwischen diesen beiden Federsitzen **42** und **44** ist eine kegelstumpfförmig gewendelte Schraubenfeder **46** eingespannt, die ständig bestrebt ist, den Tragkörper **26** in seiner Ruhelage zu halten.

**[0072]** Der Ansatz **14** des proximalen Gehäuseteils **14** hat eine vom Inneren des Gehäuses **10** ausgehende axiale, also zur zentralen Achse Z konzentrische Bohrung **48**, in die radial ein analoger Sensor AS, und diesem diametral gegenüber, ein Emitter **52** für einen Mess-Strahl hineinragen. In den dargestellten Beispielen ist der Emitter **52** eine Lichtquelle, die zusammen mit dem Sensor AS zum Beispiel einem PSD eine Miniaturlichtschranke mit analogem Ausgangssignal bildet. Diese PSD Bauelemente nutzen den Effekt der lateralen Aufteilung des generierten Fotostromes. PSD (engl.: position sensitive detector) bezeichnet ein Bauelement, das auf der Silizium PIN Diodentechnologie beruht und mit dem die Messung der Position des integralen Schwerpunktes eines auftreffenden Lichtsignals ermöglicht wird. Ein PSD konvertiert die Energie eines zum Beispiel darauf abgebildeten Lichtspots in ein kontinuierliches der Position des Schwerpunktes dieses Spots entsprechenden elektrisches Signal. Die Position einer Richtung wird aus dem Verhältnis zweier Ausgangsströme gewonnen. Es sind aber auch andere Sensoranordnungen einsetzbar.

**[0073]** Jegliche Auslenkung des Tastkopfes TK, und somit auch der Taststiftaufnahme **36**, aus ihrer Ruhelage wird dem Sensor AS durch ein Übertragungsglied **54** mitgeteilt, welches ein schlanker, gerader Biegestab ist und vorzugsweise aus gezogenem Federstahldraht von kreisförmigem Querschnitt mit einem Durchmesser von 0,5 bis 1,2 mm besteht. Dadurch wird der Mess-Strahl aus dem Emitter **52** gegenüber der Ruhelage weiter oder weniger weit abgeschattet, wie dies in **Fig. 2** veranschaulicht ist. Dies wird in einer in den **Fig. 2** und **Fig. 3** nicht weiter veranschaulichten Elektronik ausgewertet. Für den Messtaster MT hat sich ein Federstahldraht von 0,8 mm Durchmesser bewährt; für besonders kleine Konturmesseinsätze M kommt aber auch Federstahldraht erheblich kleineren Durchmessers von beispielsweise 0,2 mm in Frage.

**[0074]** Das Übertragungsglied **54** erstreckt sich in Ruhelage geradlinig längs der zentralen Achse Z des Messtasters MT; sein distales Ende **56** ist zentral an der Taststiftaufnahme **36** befestigt. Nahe seinem proximalen Ende **58** ist das Übertragungsglied **54** in einer Führungsbuchse **60** geführt. Die Führungsbuchse **60** kann aus gegenüber dem Material des Übertragungsgliedes **54** – gezogenem Federstahldraht – reibungsarmem Werkstoff, wie z. B. Polyamid oder Sinterbronze bestehen. Besonders bewährt hat sich jedoch eine Alternative, bei der die Führungsbuchse **60** eine handelsübliche gehärtete Bohrbuchse mit geschliffener Bohrung ist. In diesem Fall ist das Übertragungsglied **54** in dem an sein proximales Ende **58** angrenzenden Abschnitt mit reibungsminderndem Material beschichtet.

**[0075]** In Ruhelage ragt das proximale Ende **58** des Übertragungsgliedes **54** über das proximale Ende der Führungsbuchse **60** hinaus und reicht bis in die Mitte des vom Emitter **52** in Richtung zum Sensor **50** ausgesandten Lichtstrahls.

**[0076]** Das Übertragungsglied **54** ist hier ein Federstahldraht, dessen zum Biegen nutzbare Länge mit dem Abstand zwischen dem distalen, in den Zeichnungen also unteren Ende der Führungsbuchse **60** und der proximalen, also oberen Stirnfläche des Tragkörpers **26** übereinstimmt. Anstatt des Federstahldrahtes kann auch ein starrer Stift eingesetzt werden, welcher pendelnd gelagert ist.

**[0077]** Das am distalen Gehäuseteil **16** ausgebildete ringförmige Stützlager **20** und das am Tragkörper **26** ausgebildete ringförmige Gegenlager **28** ist in einer Variante von je einer Planverzahnung gebildet. Dadurch ist der Tragkörper **26** in seiner Ruhelage sowie bei allen radialen Auslenkungen des von ihm getragenen Tastkopfes TK daran gehindert, sich um seine Längsachse T zu drehen. Eine der beiden miteinander zusammenwirkenden Verzahnungen ist in einer Variante bogenförmig abgerundet. Damit können die Verzahnungen sich beim Kippen des Tragkörpers **26** aneinander abwälzen.

**[0078]** Das in **Fig. 2** und **Fig. 3** gezeigte stiftförmige Bauteil, ein Taststift, hat einen stangenförmigen Schaft oder Stift **38** und einen an dem Stift **38** angebrachten Tastkopf TK. Der stangenförmige Schaft **38** ist in dieser

Variante aus Hartmetall gefertigt. Der Tastkopf TK auch aus Hartmetall, Rubin oder Diamant gefertigt. Der Tastkopf TK kann z. B. ein  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Rubin-Doppelkegel aus synthetischem monokristallinem Rubin sein, ein Doppelkegel aus Siliziumnitrid aus presshartem  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , ein Doppelkegel aus Zirkonoxid aus gesintertertem  $\text{ZrO}_2$ , ein hohler Doppelkegel aus Aluminium aus weißer Aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Sinterkeramik, ein Doppelkegel aus Wolframkarbid oder ein Doppelkegel aus einem anderem harten Werkstoff, zum Beispiel Hartmetall, sein.

**[0079]** Um die Belastung auf der Werkstückoberfläche in akzeptierbaren Grenzen zu halten, wird ein kugelförmiger Tastkopf verwendet. In Abhängigkeit von der zu erwartenden Kontur, Vorschub, der Werkstückgeometrie und der Werkstoff-Festigkeit ist eine für die Messaufgabe optimale Tastkopfgeometrie zu definieren.

**[0080]** Die in **Fig. 4** gezeigte Kennlinie des Messtasters aus dem System zur Konturmessung in **Fig. 1** zeigt die analoge Ausgangsspannung des Analogensors AS des Messtasters MT (Ordinate) über der Auslenkung des Tastkopfes TK des Messtasters MT (Abszisse). Diese Kennlinie hat ersichtlich keinen linearen Verlauf. Bei nicht ausgelenktem Messtaster liefert der Analogsensor AS ein Ausgangssignal von etwa 1,8 Volt. Zwischen etwa 0,2 mm und 0,9 mm Auslenkung des Tastkopfes TK des Messtasters MT (dieser Wertebereich ist auch abhängig von der Länge des Taststiftes TS) liefert der Analogsensor AS ein Ausgangssignal zwischen etwa 2 Volt und 10 Volt. Im Überhub-Bereich (in dieser Variante größer als 0,9 mm) wird ein von der Auslenkung unabhängige Ausgangssignal von etwa 10 Volt abgegeben. Der nutzbare Bereich zwischen 2 Volt und etwa 9 Volt Ausgangssignal ist in etwa linear. Für eine im Fertigungsbetrieb präziser Maschinenteile geforderte Messgenauigkeit ist jedoch eine Korrektur erforderlich.

**[0081]** Für diese Korrektur wird zunächst in einer Vorbereitungsphase eine Korrekturfunktion der Ausgangssignale bezogen auf die zugehörige Auslenkung des Taststiftes TS, genauer gesagt dessen Tastkopfes TK des Messtasters MT ermittelt. Hierzu wird der Messtaster MT so positioniert, dass er an einer Prüffläche (zum Beispiel einem Werkstück) steht, die senkrecht zur gewünschten Auslenkungsrichtung orientiert ist. Anschließend wird der Messtaster MT soweit in der gewünschten Auslenkungsrichtung verfahren, dass der Analogsensor AS ein Ausgangssignal von 2 Volt hat. Anschließend wird der Messtaster MT weiter in der gewünschten Auslenkungsrichtung verfahren und kontinuierlich die Achspositionen und die zugehörigen Ausgangssignale, zum Beispiel in der NC-Steuerung NCC, aufgezeichnet, bis 9 Volt Ausgangssignal erreicht sind. Hieraus ergibt sich in einer Variante eines Messtasters MT folgendes Datenfeld:

Messwertnr.	1	2	3	4	5	6	7	8	
Ausgangssignal	2	3	4	5	6	7	8	9	Volt
Auslenkung	0	0.04	0.1	0.15	0.23	0.27	0.36	0.45	mm

**[0082]** In einer Variante des Verfahrens werden die drei Koeffizienten  $a_0, \dots, a_2$  des Polynoms 2. Ordnung  $y_{\text{poly}} = a_0 + a_1x + a_2x^2$  bestimmt. Zur Bestimmung dieser Koeffizienten  $a_0, \dots, a_n$  des Polynoms dient in einer Variante die Polynomapproximation nach der Methode der kleinsten Quadrate (bei der hier erläuterten Variante ist  $n = 2$ ). Dazu werden aus dem obigen Datenfeld das Ausgangssignal als  $x_{\text{mess}}$  und die Auslenkung als  $y_{\text{mess}}$  in die nachstehende Tabelle als Eingangsgröße übernommen und die übrigen Größen  $x^2, x^3, x^4, yx, yx^2$  sowie deren Mittelwerte zum Beispiel in der NC-Steuerung NCC arithmetisch ermittelt.

Messwertnr.	1	2	3	4	5	6	7	8	Mittelwert
$x_{\text{mess}}$	2	3	4	5	6	7	8	9	5.5
$x^2$	4	9	16	25	36	49	64	81	35.5
$x^3$	8	27	64	125	216	343	512	729	253
$x^4$	16	81	256	625	1296	2401	4096	6561	1916.5
$y_{\text{mess}}$	0	0.04	0.1	0.15	0.23	0.27	0.36	0.45	0.2
$yx$	0	0.12	0.4	0.75	1.38	1.89	2.88	4.05	1.43375
$yx^2$	0	0.36	1.6	3.75	8.28	13.23	23.04	36.45	10.8388

**[0083]** Die Mittelwerte gehen zur Bestimmung der Koeffizienten  $a_0, \dots, a_2$  des Polynoms in folgendes Gleichungssystem ein:

$$\begin{pmatrix} \overline{y_{mess}} \\ \overline{y\bar{x}} \\ \overline{yx^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \overline{x_{mess}} & \overline{x^2} \\ \overline{x_{mess}} & \overline{x^2} & \overline{x^3} \\ \overline{x^2} & \overline{x^3} & \overline{x^4} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0.2 \\ 1.43375 \\ 10.8388 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 5.5 & 35.5 \\ 5.5 & 35.5 & 253 \\ 35.5 & 253 & 1916.5 \end{pmatrix}$$

**[0084]** Die Matrix wird in einer Variante mit dem Gauss-Jordan-Verfahren invertiert. Damit erhält man mit dem vorliegenden Datensatz das nachstehende Gleichungssystem:

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 1.43375 \\ 10.8388 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 36.52381 & -14.14286 & 1.19048 \\ -14.14286 & 5.95238 & -0.52381 \\ 1.19048 & -0.52381 & 0.04762 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.069285714 \\ 0.028214286 \\ 0.003214286 \end{pmatrix}$$

**[0085]** Für das Polynom 2. Ordnung ergeben sich hieraus im obigen Mess-Beispiel die folgenden Koeffizienten  $a_0, \dots, a_2$ :

$$y_{\text{polynom}} = a_0 + a_1x + a_2x^2$$

$$a_2 = 0.003214286$$

$$a_1 = 0.028214286$$

$$a_0 = -0.069285714$$

**[0086]** Durch Einsetzen in die Polynomgleichung ergeben sich folgende Stützpunkte/Stützwerte:

$x_{\text{polynom}}$	2	3	4	5	6	7	8
$y_{\text{polynom}}$	0.000000	0.044286	0.095000	0.152143	0.215714	0.285714	0.362143
$y_{\text{mess}}$	0	0.04	0.1	0.15	0.23	0.27	0.36

**[0087]** In dem Diagramm in **Fig. 5** ist der Vergleich zwischen den gemessenen Stützwerten  $y_{\text{mess}}$  und den berechneten Polynomwerten  $y_{\text{polynom}}$  graphisch sowie deren Abweichung voneinander veranschaulicht.

**[0088]** Diese Polynomfaktoren (d. h. Koeffizienten  $a_0, \dots, a_2$ ) werden nun in der NC-Steuerung NCC abgespeichert und in der nachfolgend beschriebenen Weise während einer Abtastphase verwendet.

**[0089]** Der Messtaster MT wird in der oben beschriebenen Weise (**Fig. 1**) an einer Oberfläche eines zu bearbeitenden Werkstücks WS positioniert. Dabei wird der Messtaster MT soweit an die Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks WS herangefahren, dass der Tastkopf TK des Messtasters MT etwa zur Hälfte/Mitte des Messbereichs ausgelenkt ist, also im vorliegenden Beispiel ein Ausgangssignal von etwa 5,5 Volt liefert. Sofern eine nicht zur Mitte des Messbereichs symmetrische Auslenkung erwartet wird, ist ein entsprechend andere Anfangsauslenkung zu wählen. Anschließend wird der Messtaster MT in der Werkzeugmaschine WZM durch die NC-Steuerung NCC gesteuert entlang eines Konturabtastpfades KAP geführt, so dass der Tastkopf TK des Messtasters MT das Werkstück WS kontinuierlich abtastet und Ausgangsdaten liefert, die die Kontur des Werkstücks wiedergeben. Abhängig von der erwarteten Kontur des Werkstücks WS und der maximalen Auslenkung des Taststiftes TS kann dies entweder ein geradliniger Konturabtastpfad KAP sein, oder ein der Kontur des Werkstücks WS folgender, ggf. (auch abschnittsweise) gekrümmter oder geknickter Konturabtastpfad KAP (= "unkorrigierter SOLL-Pfad") sein.

**[0090]** Der Einfachheit halber sei nachstehend für das hier erläuterte Beispiel angenommen, dass die abzutastende Oberfläche des Werkstücks WS geradlinig sein soll (SOLL-Kontur), aber aufgrund von Bearbeitungsungenauigkeiten davon abweicht (IST-Kontur), und der Konturabtastpfad KAP geradlinig ist. Dabei folgt die

Auslenkung des Messtasters direkt der IST-Kontur und die (kontinuierliche) Folge der Ausgangsdaten gibt unmittelbar den Verlauf der Abweichung von der SOLL-Kontur wider. Bei einer gekrümmten oder geknickten Gestalt der abzutastenden Oberfläche des Werkstücks WS ist diese (gekrümmte oder geknickte) Gestalt entsprechend mit der Folge der Ausgangsdaten zu verrechnen um den korrigierten SOLL-Pfad zu erhalten.

**[0091]** Basierend auf dem in diesem Beispiel entlang der X-Achse verlaufenden Konturabtastpfad KAP wird zum Beispiel eine Folge von äquidistanten Achspositionen ermittelt.

Pos X-Achse (mm)	0	1	2	3	4	5	6	...
Ausgangssignal (Volt)	5,500	4,253	3,333	3,000	3,333	4,253	5,500	...
Auslenkung des Messtasters (mm)	0,1831	0,1097	0,0603	0,0443	0,0603	0,1087	0,1831	...

**[0092]** Die Soll-Achs-Positionen der Folgeachse entlang einer Führungsachse für die Werkstückbearbeitung lassen sich durch Verrechnen der Auslenkungen des Messtasters entlang des Konturabtastpfades KAP ermitteln.

**[0093]** Bei der drahtlosen Übertragung der Ausgangsdaten von dem Messtaster an die der Werkzeugmaschine WZM zugeordnete Maschinensteuerung NCC tritt eine Verzögerung (Latenzzeit) auf, die dazu führt, dass sich die Spindel der Werkzeugmaschine WZM zum Zeitpunkt der Messwertaufnahme im Messtaster an einem anderen Ort befindet, als zum Zeitpunkt, an dem die zugehörigen Ausgangsdaten in der Maschinensteuerung NCC ankommen. Deshalb werden die eingehenden Ausgangsdaten und die jeweiligen Maschinenkoordinaten in ein FIFO – First In First Out – Schieberegister eingespeist, dessen Inhalt so getaktet ausgegeben wird, dass dieser Zeitversatz kompensiert ist. Dabei wird in einer Variante auch ein gleitender gewichteter Mittelwert über eine Anzahl von in einer Variante zum Beispiel fünf Ausgangsdaten zur Kompensation von Schwankungen der Ausgangsdaten gebildet.

**[0094]** Basierend auf diesen, mit Maschinenkoordinaten der zu fertigenden Kontur korrigierten Ausgangsdaten werden dann in der NC-Steuerung NCC die entsprechenden, für die Bearbeitung des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks erforderlichen Steuerungsbefehle generiert und das eingespannte Werkstück mit einem in der Aufnahme der Werkzeugmaschine bereitgestellten Werkzeug bearbeitet.

**[0095]** Wie auch die **Fig. 6** veranschaulicht, ist ein hier vorgestelltes Verfahren zur Werkstückbearbeitung dreigeteilt. Die Vorbereitungs-, die Abtast- und die Fertigungsphase sind voneinander getrennt und unabhängig. Auch ist vorgesehen, dass diese drei Phasen für sich genommen implementiert werden.

**[0096]** Es sei bemerkt, dass obwohl hier numerische Bereiche und numerische Werte offenbart wurden, dass alle numerischen Werte zwischen den offenbarten Werten und jedem numerischen Unterbereich innerhalb der genannten Bereiche als ebenfalls offenbart anzusehen sind.

**[0097]** Die vorangehend beschriebenen Varianten des Verfahrens und der Vorrichtung sowie deren Aufbau- und Betriebsaspekte dienen lediglich dem besseren Verständnis der Struktur, der Funktionsweise und der Eigenschaften; sie schränken die Offenbarung nicht etwa auf die Ausführungsbeispiele ein. Die Fig. sind teilweise schematisch, wobei wesentliche Eigenschaften und Effekte zum Teil deutlich vergrößert dargestellt sind, um die Funktionen, Wirkprinzipien, technischen Ausgestaltungen und Merkmale zu verdeutlichen. Dabei kann jede Funktionsweise, jedes Prinzip, jede technische Ausgestaltung und jedes Merkmal, welches/welche in den Fig. oder im Text offenbart ist/sind, mit allen Ansprüchen, jedem Merkmal im Text und in den anderen Fig., anderen Funktionsweisen, Prinzipien, technischen Ausgestaltungen und Merkmalen, die in dieser Offenbarung enthalten sind oder sich daraus ergeben, frei und beliebig kombiniert werden, so dass alle denkbaren Kombinationen der beschriebenen Vorgehensweise zuzuordnen sind. Dabei sind auch Kombinationen zwischen allen einzelnen Ausführungen im Text, das heißt in jedem Abschnitt der Beschreibung, in den Ansprüchen und auch Kombinationen zwischen verschiedenen Varianten im Text, in den Ansprüchen und in den Fig. umfasst. Auch die Ansprüche limitieren nicht die Offenbarung und damit die Kombinationsmöglichkeiten aller aufgezeigten Merkmale untereinander. Alle offenbarten Merkmale sind explizit auch einzeln und in Kombination mit allen anderen Merkmalen hier offenbart.

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Erzeugen eines korrigierten SOLL-Pfades zum Bearbeiten eines Werkstücks in einer Werkzeugmaschine, mit den Schritten:

- Bereitstellen eines einen Taststift aufweisenden taktilen Messtasters in einer Aufnahme einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine, wobei der Messtaster dazu eingerichtet ist, einer Auslenkung seines Taststifts zumindest bereichsweise wenigstens annähernd proportionale Ausgangsdaten abzugeben;
- zumindest abschnittsweise kontinuierliches Abtasten einer IST-Kontur durch Abfahren des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks entlang eines unkorrigierten SOLL-Pfades mit dem Taststift des Messtasters;
- kontinuierliches Erzeugen von Ausgangsdaten durch den Messtaster, die Abweichungen der IST-Kontur von der SOLL-Kontur des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks wiedergeben;
- Übertragen dieser Ausgangsdaten von dem Messtaster an eine der Werkzeugmaschine zugeordnete numerische Steuerung – NCC –;
- Zuordnen dieser Ausgangsdaten zu in der numerischen Steuerung bereitgehaltenen Maschinenkoordinaten, welche einen unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergeben;
- Korrigieren des unkorrigierten SOLL-Pfades mit den Ausgangsdaten; und
- Ansteuern der Werkzeugmaschine mit dem korrigierten SOLL-Pfad bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks.

2. Verfahren zum Erzeugen eines korrigierten SOLL-Pfades nach Anspruch 1, wobei

- zum Zuordnen der Ausgangsdaten zu den Maschinenkoordinaten vorzugsweise in der numerischen Steuerung eine Verzögerung bestimmt wird, die zumindest durch das Erfassen der IST-Kontur, das Erzeugen und das Übertragen der Ausgangsdaten von dem Messtaster an die numerische Steuerung hervorgerufen wird, und vorzugsweise in der numerischen Steuerung die Ausgangsdaten den Maschinenkoordinaten unter Berücksichtigung der Verzögerung zugeordnet werden.

3. Verfahren zum Erzeugen eines korrigierten SOLL-Pfades nach Anspruch 1 oder 2, wobei

- in der numerischen Steuerung der Werkzeugmaschine die Maschinenkoordinaten in einem Anwendungsprogramm – NC-Code – bereitgehalten werden; und
- nach dem Zuordnen die den unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergebenden Maschinenkoordinaten mit den Ausgangsdaten in einem Anwendungsprogramm – NC-Code – miteinander verrechnet werden; und
- die Werkzeugmaschine mit den Maschinenkoordinaten des korrigierten SOLL-Pfades aus dem Anwendungsprogramm – NC-Code – bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks angesteuert wird.

4. Verfahren zum Erzeugen eines korrigierten SOLL-Pfades nach Anspruch 1 oder 2, wobei

- in der numerischen Steuerung der Werkzeugmaschine die Maschinenkoordinaten in einem Anwendungsprogramm – NC-Code – bereitgehalten werden;
- nach dem Zuordnen die den unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergebenden Maschinenkoordinaten und die Ausgangsdaten einer steuerungsinternen Kompensationsfunktion der numerischen Steuerung übergeben werden;
- die Maschinenkoordinaten des unkorrigierten SOLL-Pfades zum Ausgeben an die Werkzeugmaschine unter Verwendung der Ausgangsdaten durch die steuerungsinterne Kompensationsfunktion korrigiert werden; und
- die Werkzeugmaschine mit den Maschinenkoordinaten des durch die steuerungsinterne Kompensationsfunktion korrigierten SOLL-Pfades bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks angesteuert wird.

5. Verfahren zur Erfassung einer Kontur eines Werkstücks mit folgenden Schritten:

- a) Bereitstellen eines einen Taststift aufweisenden Messtasters in einer Aufnahme einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine, wobei der Messtaster dazu eingerichtet ist, einer Auslenkung seines Taststifts zumindest bereichsweise wenigstens annähernd proportionale Ausgangsdaten abzugeben;
- b) Bestimmen, in einer Vorbereitungsphase, wenigstens einer Korrekturfunktion zumindest eines Bereichs der Ausgangsdaten bezogen auf die zugehörige Auslenkung des Taststifts des Messtasters;
- c) Ablegen charakteristischer Größen dieser wenigstens einer Korrekturfunktion in dem Messtaster oder einer der Werkzeugmaschine zugeordneten Maschinensteuerung;
- d) zumindest abschnittsweise kontinuierliches Abtasten der Kontur, in einer Abtastphase, eines in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks mit dem Taststift des in der Aufnahme der Werkzeugmaschine bereitgestellten Messtasters um Ausgangssignale des Messtasters zu erhalten;
- e) Korrigieren der Ausgangssignale des Messtasters unter Verwendung der charakteristischen Größen der Korrekturfunktion; und
- f) Bereitstellen der korrigierten Ausgangsdaten an die der Werkzeugmaschine zugeordnete Maschinensteuerung.

6. Verfahren zur Erfassung einer Kontur eines Werkstücks nach Anspruch 5, bei dem  
 – als Korrekturfunktion zumindest eines Bereichs der Ausgangsdaten bezogen auf die zugehörige Auslenkung des Taststifts des Messtasters ein Polynom bestimmt wird, dessen Ordnung festzulegen ist; und  
 während des kontinuierlichen Abtastens der Kontur des noch nicht fertig bearbeiteten Werkstücks in der Abtastphase das die Auslenkung des Messtasters wiedergebenden Ausgangssignals korrigiert wird, indem die jeweiligen unkorrigierten Ausgangsdaten als Eingangsgröße in das Polynom eingesetzt werden um korrigierte Ausgangsdaten durch Berechnen des Polynoms mit dieser Eingangsgröße zu bestimmen.

7. Verfahren zur Erfassung einer Kontur eines Werkstücks nach Anspruch 5 oder 6, bei dem Koeffizienten  $[a_0, \dots, a_n]$  des Polynoms  $[y = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n]$  bestimmt werden durch Polynomapproximation nach der Methode der kleinsten Quadrate, durch Interpolation des Polynoms mittels einer Lagrange-Interpolation oder einer Newtonschen Darstellung der Lagrangeschen Interpolation, oder durch Derivate davon.

8. Verfahren zur Erfassung einer Kontur eines Werkstücks nach einem der vorhergehenden Ansprüche 5 bis 7, bei dem die Polynomkoeffizienten  $[a_0, \dots, a_n]$  in der Maschinensteuerung in globalen Variablen abgelegt werden, oder die Korrekturfunktion in dem Messtaster selbst in Form der Polynomkoeffizienten  $[a_0, \dots, a_n]$  oder als Umsetzungstabelle abgelegt wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, bei dem nach dem Bereitstellen der korrigierten Ausgangsdaten an die der Werkzeugmaschine zugeordnete Maschinensteuerung die folgenden Schritte ausgeführt werden:

g) Verrechnen der korrigierten Ausgangsdaten mit Maschinenkoordinaten der zu fertigenden Kontur für die Bearbeitung des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks um Steuerungsbefehle für die Werkzeugmaschine zu erhalten; und

h) Bearbeiten des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks mit einem in der Aufnahme der Werkzeugmaschine bereitgestellten Werkzeug.

10. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem charakteristische Koordinaten des zu fertigenden Werkstücks mit den korrigierten Ausgangsdaten verrechnet werden, wobei zum Ermitteln von Steuerungsbefehlen für die Werkzeugmaschine eine lineare, quadratische oder kubische Spline-Interpolation aus den korrigierten Ausgangsdaten zwischen den jeweiligen ermittelten Stützpunkten ausgeführt wird, um eine Bahnkurve zum Abfahren des Werkstücks mit dem Bearbeitungswerkzeug zu erhalten.

11. Vorrichtung insbesondere zur Durchführung des Verfahrens zum Erzeugen eines korrigierten SOLL-Pfades zum Bearbeiten eines Werkstücks in einer Werkzeugmaschine nach einem der Ansprüche 1 bis 4, umfassend:

– eine numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine mit einer ihr zugeordneten numerischen Steuerung – NCC – und einer Aufnahme,

– einen in der Aufnahme aufgenommenen, einen Taststift aufweisenden taktilen Messtaster, wobei der Messtaster dazu eingerichtet ist, einer Auslenkung seines Taststifts zumindest bereichsweise wenigstens annähernd proportionale Ausgangsdaten abzugeben;

wobei

– die numerische Steuerung – NCC – dazu programmiert und eingerichtet ist,

– der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine Ansteuerbefehle zu übermitteln, die ein zumindest abschnittsweise kontinuierliches Abtasten einer IST-Kontur durch Abfahren des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks entlang eines unkorrigierten SOLL-Pfades mit einem Taststift des Messtasters bewirken, so dass der Messtaster kontinuierlich Ausgangsdaten erzeugt, die Abweichungen der IST-Kontur von der SOLL-Kontur des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks wiedergeben, und der Messtaster diese Ausgangsdaten von dem Messtaster an die der Werkzeugmaschine zugeordnete numerische Steuerung – NCC – überträgt;

– diese Ausgangsdaten zu in der numerischen Steuerung bereitgehaltenen Maschinenkoordinaten zuzuordnen, welche einen unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergeben;

– den unkorrigierten SOLL-Pfad mit den Ausgangsdaten zu korrigieren; und

– die Werkzeugmaschine mit dem korrigierten SOLL-Pfad bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks mit einem in der Aufnahme aufgenommenen Werkzeug anzusteuern.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, wobei

– die numerische Steuerung – NCC – dazu programmiert und eingerichtet ist,

– zum Zuordnen der Ausgangsdaten zu den Maschinenkoordinaten vorzugsweise in der numerischen Steuerung eine Verzögerung zu bestimmen, die zumindest durch das Erfassen der IST-Kontur, das Erzeugen und



das Übertragen der Ausgangsdaten von dem Messtaster an die numerische Steuerung hervorgerufen wird; und vorzugsweise in der numerischen Steuerung die Ausgangsdaten den Maschinenkoordinaten unter Berücksichtigung der Verzögerung zuzuordnen.

13. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, wobei

- die numerische Steuerung – NCC – dazu programmiert und eingerichtet ist,
- in der numerischen Steuerung der Werkzeugmaschine die Maschinenkoordinaten in einem Anwendungsprogramm – NC-Code – bereit zu halten,
- nach dem Zuordnen die den unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergebenden Maschinenkoordinaten mit den Ausgangsdaten in einem Anwendungsprogramm – NC-Code – miteinander zu verrechnen; und
- die Werkzeugmaschine mit den Maschinenkoordinaten des korrigierten SOLL-Pfades aus dem Anwendungsprogramm – NC-Code – bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks anzusteuern.

14. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, wobei

- die numerische Steuerung – NCC – dazu programmiert und eingerichtet ist,
- in der numerischen Steuerung der Werkzeugmaschine die Maschinenkoordinaten in einem Anwendungsprogramm – NC-Code – bereit zu halten;
- nach dem Zuordnen die den unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergebenden Maschinenkoordinaten und die Ausgangsdaten einer steuerungsinternen Kompensationsfunktion der numerischen Steuerung zu übergeben;
- die Maschinenkoordinaten des unkorrigierten SOLL-Pfades zum Ausgeben an die Werkzeugmaschine unter Verwendung der Ausgangsdaten durch die steuerungsinterne Kompensationsfunktion zu korrigieren; und
- die Werkzeugmaschine mit den Maschinenkoordinaten des durch die steuerungsinterne Kompensationsfunktion korrigierten SOLL-Pfades bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks anzusteuern.

15. Vorrichtung insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 5 bis 10, umfassend einen, einen Taststift aufweisenden taktilen Messtaster, der zur Aufnahme in einer Spindel der Werkzeugmaschine in einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine eingerichtet und bestimmt ist, wobei der Messtaster dazu eingerichtet ist, ein einer Auslenkung seines Taststifts zumindest bereichsweise wenigstens annähernd proportionales Ausgangssignal abzugeben, und wobei der Verlauf der Ausgangssignale eine Kontur eines Werkstücks zumindest annähernd wiedergibt; mit

- einem Tragkörper, an dem zum Aufnehmen eines Taststifts eine Taststiftaufnahme angeordnet ist;
- einem Analogsensor, der Bewegungen des Tragkörpers in für die Kontur einer Oberfläche des Werkstücks charakteristische Ausgangssignale umsetzt;
- einem mit dem Tragkörper zu koppelnden Taststift, der
- einen stangenförmigen Schaft und
- einen an dem Schaft angebrachten Tastkopf umfasst; und mit
- einer mit dem Analogsensor gekoppelten Verarbeitungseinheit, um aus den Ausgangssignale zumindest eine für die Kontur der Oberfläche des Werkstücks charakteristische Messgröße zu ermitteln, wobei die Verarbeitungseinheit entweder in dem Gehäuse des Messtasters angeordnet ist, oder davon getrennt ist.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, wobei die Verarbeitungseinheit einen Prozessor und einen Speicher aufweist, und dazu eingerichtet und bestimmt ist, folgende Schritte auszuführen:

- a) Bestimmen, in einer Vorbereitungsphase, wenigstens einer Korrekturfunktion zumindest eines Bereichs der Ausgangssignale bezogen auf die zugehörige Auslenkung des Taststifts des Messtasters;
- b) Ablegen charakteristischer Größen dieser wenigstens einen Korrekturfunktion in dem Messtaster oder einer der Werkzeugmaschine zugeordneten Maschinensteuerung;
- c) zumindest abschnittsweise kontinuierliches Abtasten der Kontur, in einer Abtastphase, eines in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks mit dem Taststift des in der Aufnahme der Werkzeugmaschine bereitgestellten Messtasters um Ausgangssignale des Messtasters zu erhalten;
- d) Korrigieren der Ausgangssignale des Messtasters unter Verwendung der charakteristischen Größen der Korrekturfunktion; und
- e) Bereitstellen korrigierter Ausgangsdaten an die der Werkzeugmaschine zugeordnete Maschinensteuerung.

17. Computerprogrammprodukt in Form eines nicht-flüchtigen Datenträgers, enthaltend ein zum Ausführen in wenigstens einem Prozessor codiertes Computerprogramm mit den Schritten:

- Ansteuern der Werkzeugmaschine mit Maschinenkoordinaten, so dass der Taststift des Messtasters zumindest abschnittsweise kontinuierlich eine IST-Kontur durch Abfahren des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks entlang eines unkorrigierten SOLL-Pfades abtastet;

- Erfassen von Ausgangsdaten eines einen Taststift aufweisenden taktilen Messtasters in einer Aufnahme einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine, wobei die Ausgangsdaten einer Auslenkung seines Taststifts zumindest bereichsweise wenigstens annähernd proportional sind;
- Zuordnen dieser Ausgangsdaten zu in der numerischen Steuerung bereitgehaltenen Maschinenkoordinaten, welche den unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergeben,
- Korrigieren des unkorrigierten SOLL-Pfades mit den Ausgangsdaten; und
- Ansteuern der Werkzeugmaschine mit dem korrigierten SOLL-Pfad bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks mit einem Werkzeug.

18. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 17 in Form eines nicht-flüchtigen Datenträgers, enthaltend ein zum Ausführen in wenigstens einem Prozessor codiertes Computerprogramm mit den Schritten:

- zum Zuordnen der Ausgangsdaten zu den Maschinenkoordinaten wird vorzugsweise in der numerischen Steuerung eine Verzögerung bestimmt, die zumindest durch das Erfassen der IST-Kontur, das Erzeugen und das Übertragen der Ausgangsdaten von dem Messtaster an die numerische Steuerung hervorgerufen wird, und vorzugsweise in der numerischen Steuerung werden die Ausgangsdaten den Maschinenkoordinaten unter Berücksichtigung der Verzögerung zugeordnet.

19. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 17 oder 18 in Form eines nichtflüchtigen Datenträgers, enthaltend ein zum Ausführen in wenigstens einem Prozessor codiertes Computerprogramm mit den Schritten:

- in der numerischen Steuerung der Werkzeugmaschine werden die Maschinenkoordinaten in einem Anwendungsprogramm – NC-Code – bereitgehalten;
- nach dem Zuordnen werden die den unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergebenden Maschinenkoordinaten mit den Ausgangsdaten in einem Anwendungsprogramm – NC-Code – miteinander verrechnet; und
- die Werkzeugmaschine wird mit den Maschinenkoordinaten des korrigierten SOLL-Pfades aus dem Anwendungsprogramm – NC-Code – bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks angesteuert.

20. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 17 oder 18 in Form eines nichtflüchtigen Datenträgers, enthaltend ein zum Ausführen in wenigstens einem Prozessor codiertes Computerprogramm mit den Schritten:

- in der numerischen Steuerung der Werkzeugmaschine werden die Maschinenkoordinaten in einem Anwendungsprogramm – NC-Code – bereitgehalten;
- nach dem Zuordnen werden die den unkorrigierten SOLL-Pfad wiedergebenden Maschinenkoordinaten und die Ausgangsdaten einer steuerungsinternen Kompensationsfunktion der numerischen Steuerung übergeben;
- die Maschinenkoordinaten des unkorrigierten SOLL-Pfades werden zum Ausgeben an die Werkzeugmaschine unter Verwendung der Ausgangsdaten durch die steuerungsinterne Kompensationsfunktion korrigiert; und
- die Werkzeugmaschine wird mit den Maschinenkoordinaten des durch die steuerungsinterne Kompensationsfunktion korrigierten SOLL-Pfades bei einer anschließenden Bearbeitung des Werkstücks angesteuert.

21. Computerprogrammprodukt in Form eines nicht-flüchtigen Datenträgers, enthaltend ein zum Ausführen in wenigstens einem Prozessor codiertes Computerprogramm mit den Schritten

- a) Empfangen, in einer Vorbereitungsphase, der Ausgangssignale eines Messtasters;
- b) Bestimmen wenigstens einer Korrekturfunktion zumindest eines Bereichs der Ausgangssignale bezogen auf die zugehörige Auslenkung eines Taststifts des Messtasters; und
- c) Ablegen charakteristischer Größen dieser wenigstens einen Korrekturfunktion in dem Messtaster oder einer der Werkzeugmaschine zugeordneten Maschinensteuerung.

22. Computerprogrammprodukt in Form eines nicht-flüchtigen Datenträgers, enthaltend ein zum Ausführen in wenigstens einem Prozessor codiertes Computerprogramm mit den Schritten

- d) Empfangen, in der Abtastphase, der Ausgangssignale eines Messtasters, die eine zumindest abschnittsweise kontinuierlich abgetastete Kontur eines in der Werkzeugmaschine eingespannten, noch nicht fertig bearbeiteten Werkstücks wiedergeben;
- e) Korrigieren der Ausgangssignale des Messtasters unter Verwendung der charakteristischen Größen der Korrekturfunktion; und
- f) Bereitstellen der korrigierten Ausgangsdaten an die der Werkzeugmaschine zugeordnete Maschinensteuerung.

23. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 22, bei dem nach dem Bereitstellen der korrigierten Ausgangsdaten an die der Werkzeugmaschine zugeordnete Maschinensteuerung die folgenden Schritte ausgeführt werden:

- g) Verrechnen der korrigierten Ausgangsdaten mit Maschinenkoordinaten der zu fertigenden Kontur für die Bearbeitung des in der Werkzeugmaschine eingespannten Werkstücks um Steuerungsbefehle für die Werkzeugmaschine zu erhalten; und
- h) Ausgeben der Steuerungsbefehle für die Werkzeugmaschine.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

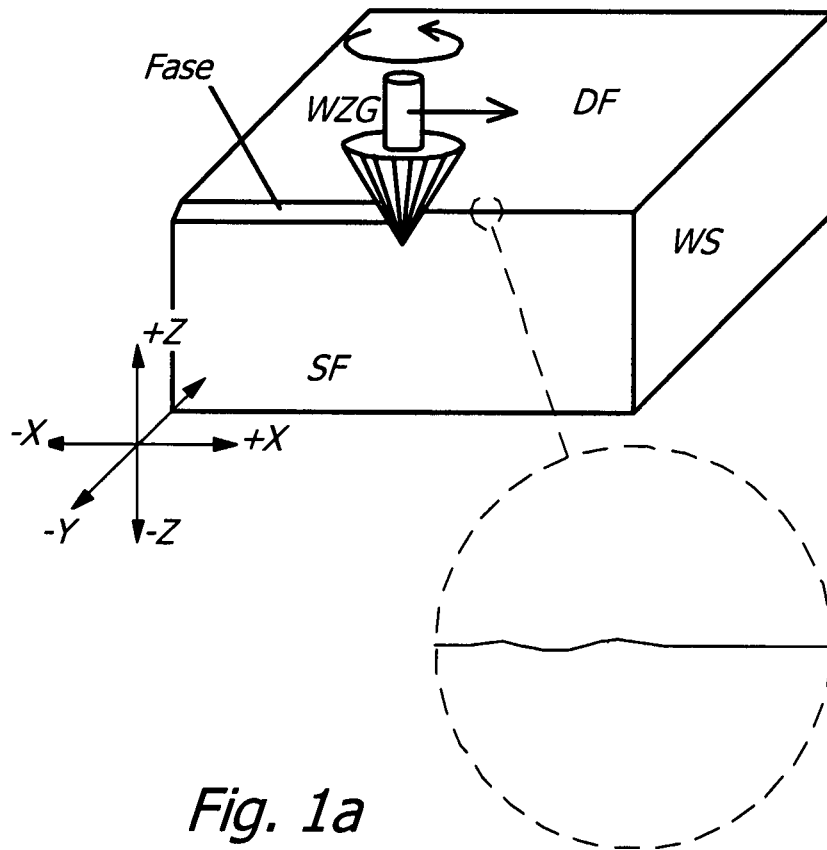
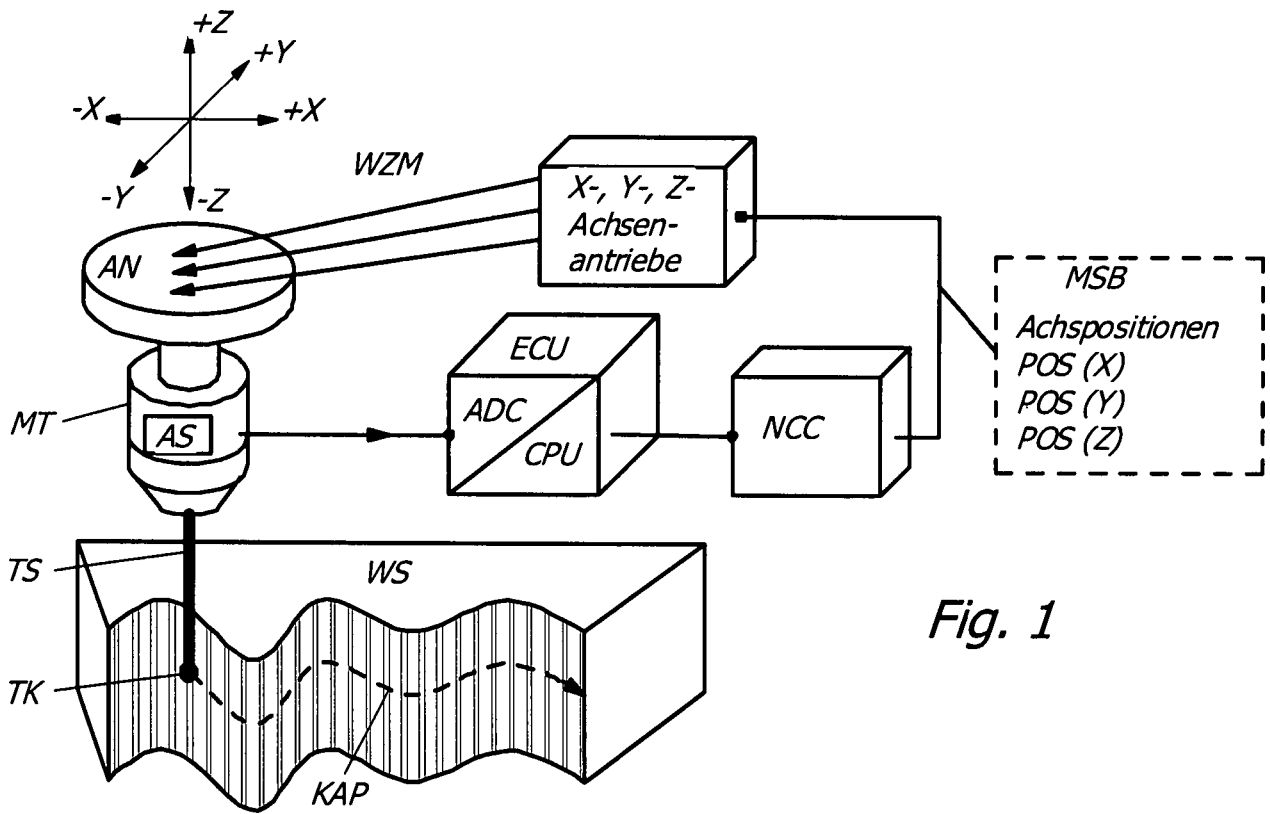
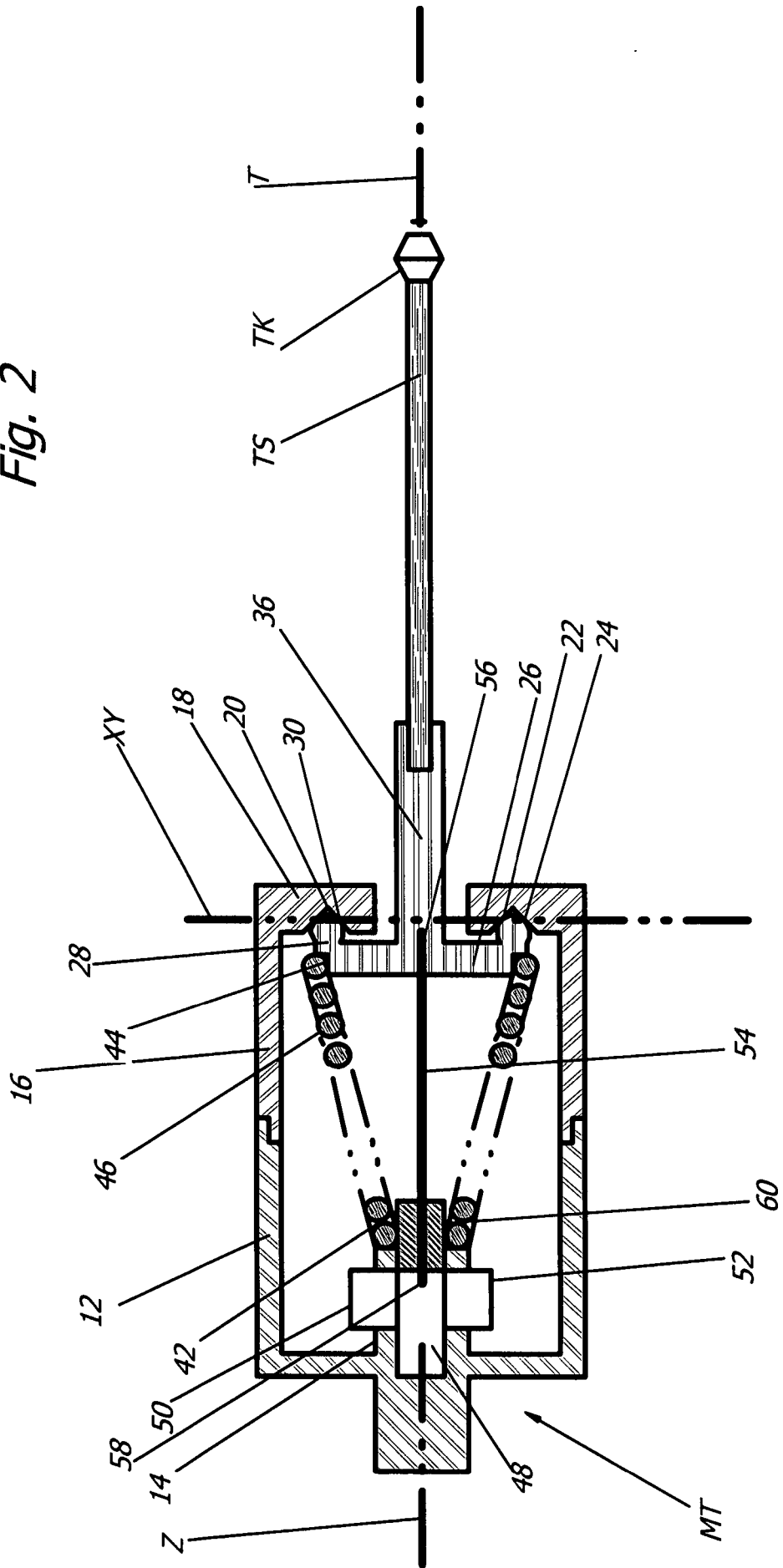
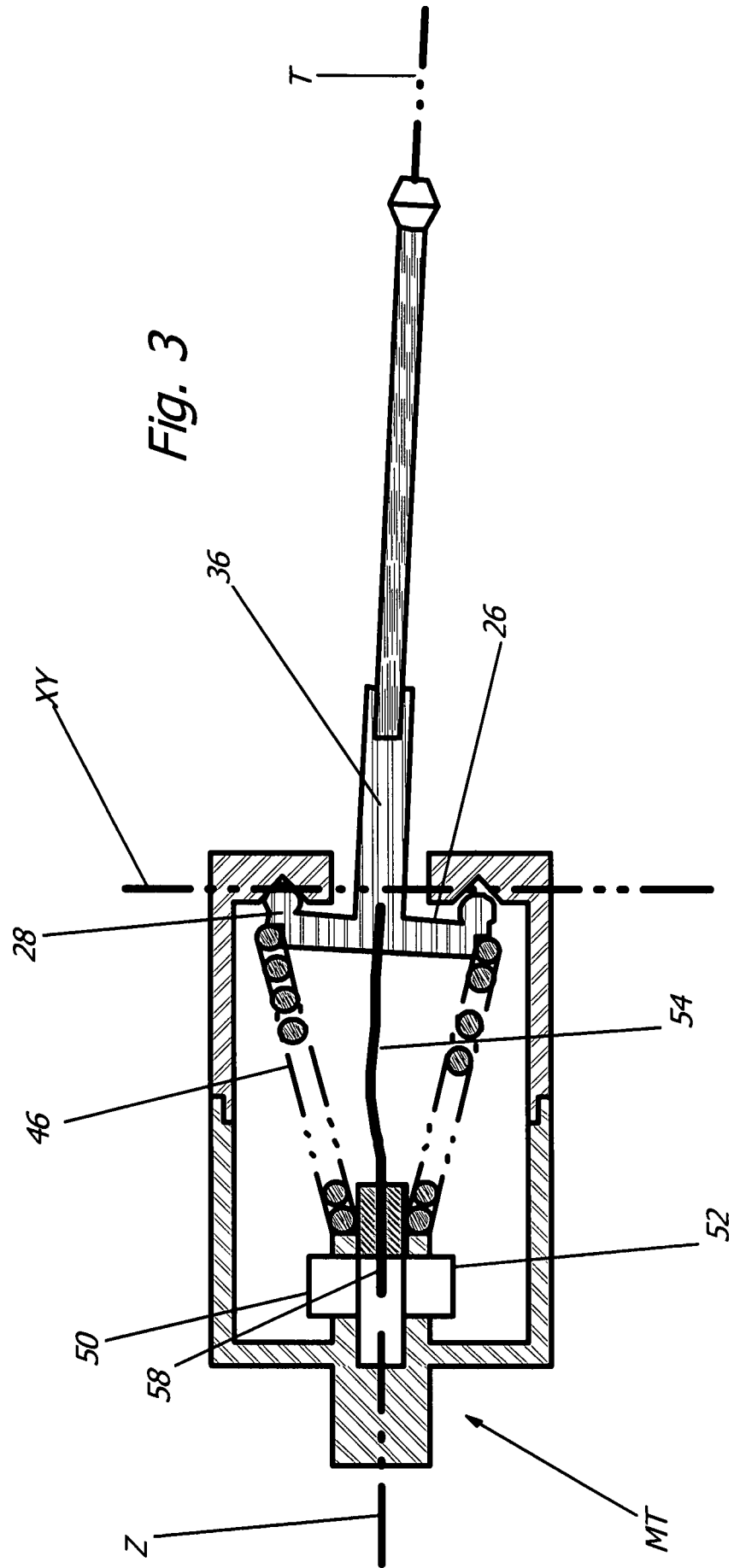
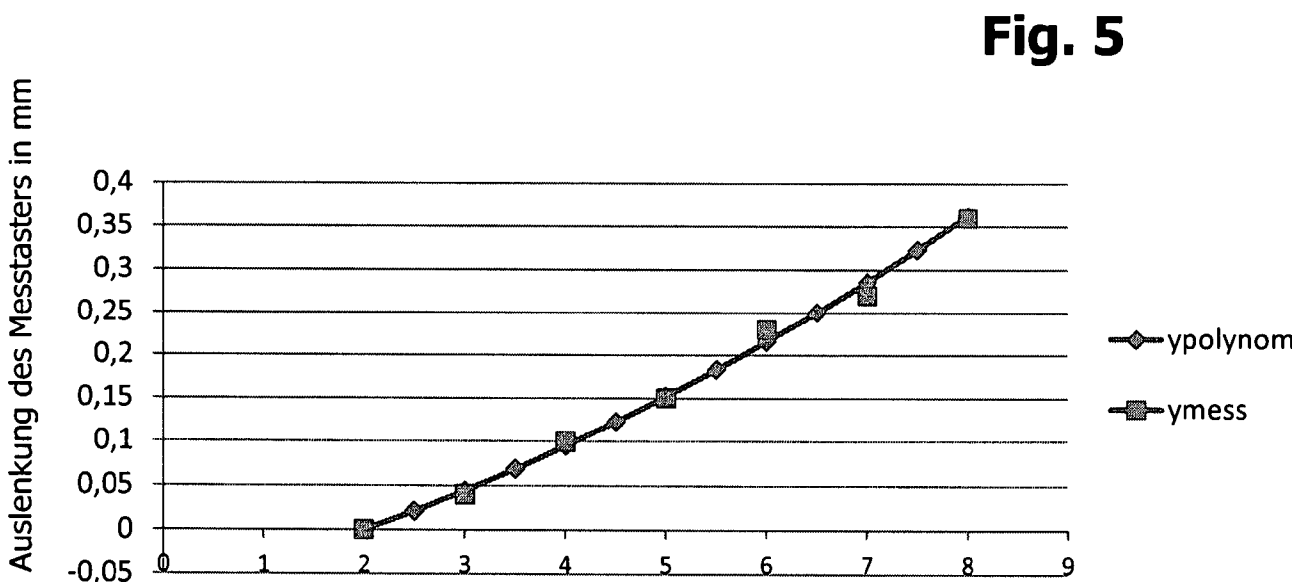
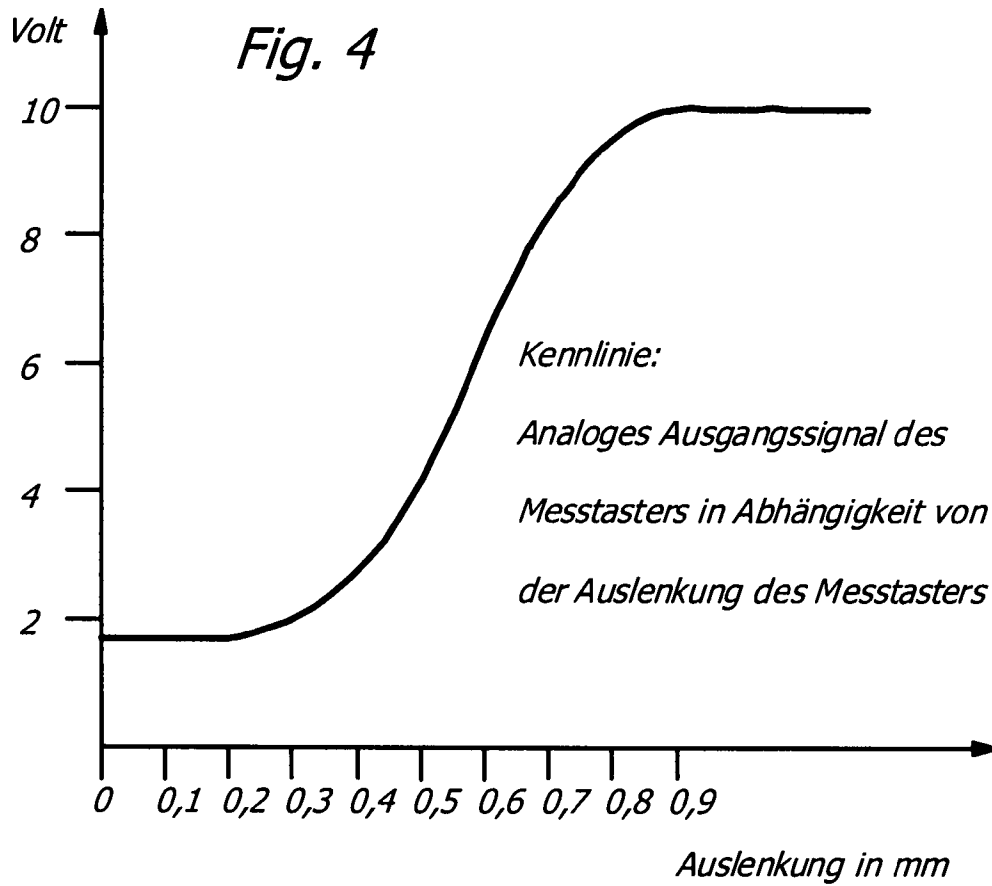


Fig. 2







ymess: Gemessene Einzelwerte der Ausgangsspannung des Analogensors

ypolynom: Durch Rechnung ermittelter Verlauf des Polynoms

**Fig. 6**