



(19)  
**Bundesrepublik Deutschland**  
**Deutsches Patent- und Markenamt**

(10) **DE 198 00 033 B4 2004.10.14**

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **198 00 033.2**  
 (22) Anmeldetag: **02.01.1998**  
 (43) Offenlegungstag: **15.07.1999**  
 (45) Veröffentlichungstag  
 der Patenterteilung: **14.10.2004**

(51) Int Cl.7: **G05B 19/404**  
**B23Q 15/18, B24B 49/00**

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden.

(71) Patentinhaber:  
**Elb-Schliff Werkzeugmaschinen GmbH, 64832**  
**Babenhhausen, DE**

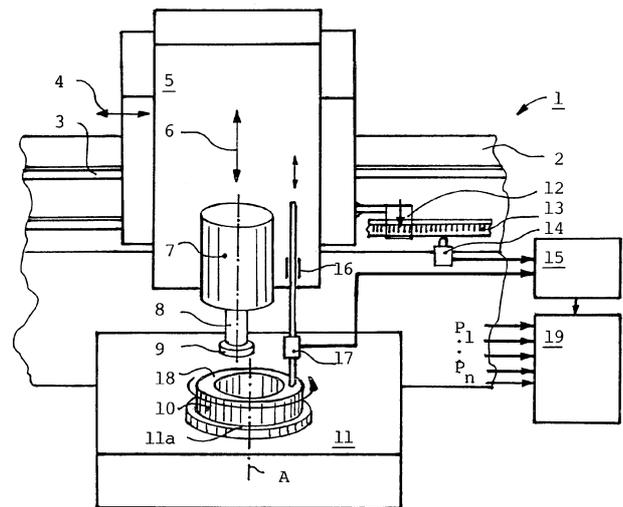
(74) Vertreter:  
**Zapfe, H., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 63150**  
**Heusenstamm**

(72) Erfinder:  
**Thormählen, Klaus-Hermann, Dr.-Ing., 63110**  
**Rodgau, DE; Dörr, Peter, 63303 Dreieich, DE; Mohr,**  
**Hans, 64832 Babenhhausen, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
 gezogene Druckschriften:  
**DE 38 28 305 A1**  
**EP 05 55 796 A1**  
**Armbruster, N.: Baldur, K.: "Meßsteuerungen für**  
**CNC-**  
**Drehmaschinen", In: wt-Z. ind. Fertigung 1980,**  
**S.511-514;**  
**Pascher, M.: "Kompensation thermisch bedingter**  
**Ver-**  
**lagerungen an Werkzeugmaschinen (Teil 1)":**  
**Indus-**  
**trie-Anzeiger Nr.75 v. 19.9.84, S.55, 56;**  
**Backé et al.: "Gestaltung der Werkzeugmaschine**  
**und**  
**deren Elemente". In: Industrie Anzeiger Nr.61,**  
**30.Juli 1965, S.1446-1453;**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Kompensieren von temperaturabhängigen Lageänderungen an Werkzeugmaschinen und Werkzeugmaschine hierfür**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Kompensieren von temperaturabhängigen relativen Lageänderungen zwischen einem Werkstück (10) und einem Bearbeitungswerkzeug (9) an Werkzeugmaschinen mit einer Steuereinheit (19), die eine Recheneinheit (15) mit Speicherplätzen besitzt, und mit mindestens einer Längenmeßeinrichtung (12), sowie mit Mitteln zur Messung und Übertragung von Temperaturwerten der Längenmeßeinrichtung (12) und des Werkstücks (10) auf die Steuereinheit (19), derart, daß durch die Steuereinheit (19) temperaturabhängige Lageänderungen von Bearbeitungswerkzeug (9) und Werkstück (10) kompensiert werden, wobei zu Beginn der Bearbeitung eine Oberflächentemperatur  $T_{wu}$  des unbearbeiteten Werkstücks (10) gemessen wird, an mindestens einem späteren Meßzeitpunkt  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  im Bearbeitungsablauf eine Oberflächentemperatur  $T_{wb}$  des bearbeiteten Werkstücks (10) gemessen wird und wobei sowohl aus Temperaturänderungen einer jeden Längenmeßeinrichtung (12) als auch aus Temperaturänderungen des Werkstücks (10) selbst durch die Temperaturmessungen Korrektursignale erzeugt und zu einer Sollmaßkorrektur auf von einer Bezugstemperatur abweichende Lageverhältnisse von einer Werkstückoberfläche (18) und dem Bearbeitungswerkzeug (9) verwendet werden.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kompensieren von temperaturabhängigen relativen Lageänderungen zwischen einem Werkstück und einem Bearbeitungswerkzeug an Werkzeugmaschinen und eine Werkzeugmaschine hierfür.

**[0002]** Zur Kompensation von temperaturabhängigen Lage- und Längenänderungen und zur Normierung auf eine Bezugstemperatur  $T_{\text{bez}}$  von beispielsweise 20°C gilt der bekannte physikalische Zusammenhang:

$$L_T$$

$$L_{\text{bez}} = \frac{L_T}{d \cdot \Delta T + 1}$$

wobei:  $L_{\text{bez}}$  = Länge bei der Bezugstemperatur,

$L_T$  = Länge bei der Temperatur "T"

d = Werkstoff-Ausdehnungskoeffizient,

$\Delta T$  = Abweichung der IST-Temperatur von der Bezugstemperatur.

**[0003]** Die temperaturabhängige Längenänderung begrenzt meß- und regelungstechnisch realisierbare Toleranzen, insbesondere bei größeren Werkstücken und/oder bei von der Bezugstemperatur von beispielhaft 20°C abweichenden Temperaturen.

**Stand der Technik**

**[0004]** Durch die DE 38 28 305 A1 ist es bekannt, Teile von Werkzeugmaschinen dadurch auf konstanter Temperatur zu halten, daß man sie mit einem Netz von Temperaturfühlern überzieht und mit thermostatisch geregelten Heiz- oder Kühlfluiden beaufschlagt. Zu diesem Zweck müssen jedoch in den betroffenen Bauteilen voneinander getrennte Fluidkanäle vorgesehen werden, denen einzeln regelbare Heiz- oder Kühleinrichtungen zugeordnet sind. Eine solche Lösung erfordert jedoch einen großen Bauaufwand und hat eine erhebliche Zeitkonstante. Die Werkstücktemperatur ist in die Regelkreise nicht einbezogen, bleibt also unberücksichtigt.

**[0005]** Durch den Aufsatz "Gestaltung der Werkzeugmaschine und deren Elemente", veröffentlicht in "Industrie-Anzeiger", Essen, 30.07.1965, Seiten 1446 bis 1453, ist es gleichfalls bekannt, thermostatisch geregelte Kühl- und Schmiermittelkreisläufe vorzusehen, um einem Wärmeverzug von Maschinenteilen entgegenzuwirken (z.B. Bild 18). Es ist weiterhin angegeben, durch Temperatureinflüsse bedingte Verlagerungen während der Bearbeitung zu messen und als Korrekturwerte in die Steuerung einzugeben. Beispielhaft ist in einem Spindelkasten eine Invarstange vorgesehen, deren Relativbewegung gegenüber dem Spindelkasten auf eine Meßuhr mit einem Winkelgeber (Weggeber) übertragen wird. Dessen elektrisches Ausgangssignal wird der Steuerung zugeführt, so daß eine elektrische Kompensation von Verlagerungen an der Schnittstelle möglich ist (Bild 21 und zugehöriger Text auf Seite 1452). Die Invarstange als Längenmeßeinrichtung dient hierbei gewissermaßen über ihre Relativbewegung mittelbar als Temperaturfühler, ihre Temperatur selbst wird aber nicht gemessen. Die Werkstücktemperatur ist auch in diesem Falle nicht in den Regelkreis einbezogen, bleibt also gleichfalls unberücksichtigt.

**[0006]** Durch den Aufsatz von Pascher "Kompensation thermisch bedingter Verlagerungen an Werkzeugmaschinen (Teil 1)", veröffentlicht in "HGF Kurzberichte im Industrie-Anzeiger" Nr. 75, 19.09.1984, Seiten 55/56, ist es gleichfalls bekannt, Maschinentemperaturen zu erfassen, die daraus resultierenden Verlagerungen zwischen Werkzeug und Werkstück zu berechnen und diese dann aktiv, bei NC-Maschinen beispielsweise mit Hilfe der NC-Steuerung, zu kompensieren (Seite 55, linke Spalte, Absatz 1; Seite 56, mittlere Spalte, Bild 4, und rechte Spalte, unter "Versuchsaufbau"). Die Werkstücktemperatur ist auch in diesem Falle nicht in den Regelkreis einbezogen, bleibt also gleichfalls unberücksichtigt.

**[0007]** Durch die nächstkommende EP 0 555 796 A1 ist bei Werkzeugmaschinen vom Typ Fräsmaschinen eine Wärmedehnungs-Kompensationseinrichtung bekannt, bei der mittels dreier Temperaturfühler die Temperaturen von Maschinenständer, Schlitten und Bearbeitungskopf bestimmt werden, wobei der Temperaturfühler des Schlittens oberhalb einer vorderen Maßstabsaufhängung angeordnet ist und wobei durch den Temperaturfühler des Bearbeitungskopfes die Temperatur im Lagerbereich des Bearbeitungskopfes bestimmt wird. Durch eine Recheneinrichtung werden die Wärmeausdehnungen der genannten Komponenten bestimmt, und daraus wird ein Korrekturwert errechnet, der der Kompensationseinrichtung aufgeschaltet ist, um dadurch die

Bewegung des Bearbeitungswerkzeugs zur Einhaltung enger Toleranzen in Abhängigkeit vom Korrekturwert zu beeinflussen. Diese Eingriffe erfolgen aufgrund der Beobachtung, daß sich während des Betriebes infolge von Reibung an Lagern und Führungen, Reibung im Getriebe, Verlustwärme im Motor u. dgl. die einzelnen Komponenten durch Wärmeentwicklung ausdehnen, was sich negativ auf die Arbeitsgenauigkeit der Maschine auswirkt (Spalte 5, Zeilen 15 bis 23). Die Erfassung der Werkstücktemperatur selbst und die Berücksichtigung der Ausdehnung des Werkstücks ist ebensowenig beschrieben wie die Anordnung entsprechender Temperaturfühler für die Erfassung der Werkstücktemperaturen vor und während der Bearbeitung.

**[0008]** Durch den Aufsatz von Armbruster und Badur "Meßsteuerungen für CNC-Drehmaschinen" in "wt-Z. ind. Fertig.", 70 (1980), Seiten 511 bis 514, ist es bekannt, einen mehrstufigen Zerspanungsprozeß durch Drehen vor der letzten Bearbeitungsstufe, der Fertigbearbeitung, zu unterbrechen und die Temperatur des erwärmten Werkstücks vor dem Einlegen in das Spannfutter für die Fertigbearbeitung gegen einen federnden Temperaturfühler zu drücken, den Meßwert mit der Raumtemperatur zu vergleichen und die ermittelte Temperaturdifferenz, multipliziert mit dem Ausdehnungskoeffizienten einem Korrekturspeicher für die Bewegung des Werkzeugs aufzuschalten. Dadurch soll eine automatische Toleranzfeldverschiebung entsprechend der Temperatur von der Maschinensteuerung automatisch in die Werkzeugkorrektur übernommen werden. Zwar werden dadurch Zwischenlagerungen für die Abkühlung der Werkstücke vermieden, jedoch wird die Bearbeitungszeit durch das Aus- und Umspannen des Werkstücks und die Temperaturmessung verlängert. Außerdem verändert sich die Temperatur wieder während des Einspannens des Werkstücks. Die Messung der Temperatur des eingespannten Werkstücks während der Bearbeitung und die Wiederholung der Messung zur Bestimmung eines Beharrungszustandes der Werkstücktemperatur sind weder beschrieben, noch werden sie nahegelegt. Soweit eine Messung am eingespannten Werkstück beschrieben ist, handelt es sich um die Bestimmung der geometrischen Lage der Meßfläche.

#### Aufgabenstellung

**[0009]** Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Kompensieren von temperaturabhängigen Lageänderungen an Werkzeugmaschinen und eine Werkzeugmaschine hierfür anzugeben, bei denen auch solche Lageänderungen zwischen Werkstück und Werkzeug berücksichtigt werden, die auf thermische Gestaltsänderungen des Werkstücks während der Bearbeitung selbst zurückzuführen sind.

**[0010]** Die Lösung der gestellten Aufgabe erfolgt bei dem eingangs angegebenen Verfahren erfindungsgemäß durch die Merkmale des Patentanspruch 1 und bei der eingangs angegebenen Werkzeugmaschine durch die Merkmale des Patentanspruchs 5.

**[0011]** Durch den Erfindungsgegenstand wird die gestellte Aufgabe in vollem Umfange gelöst, d.h., es werden auch solche Lageänderungen zwischen Werkstück und Werkzeug berücksichtigt, die auf thermische Gestaltsänderungen des eingespannten Werkstücks selbst während der Bearbeitung zurück zu führen sind. Jedenfalls genügt diese Lösung für kleine und mittlere Werkstückgrößen und/oder bei ausreichend großen Toleranzfeldern, wenn angenommen werden kann, daß die durch Aufnahme der Bearbeitungsenergie gestiegene oder durch an das Kühlmittel abgegebene Wärme gesunkene Werkstücktemperatur sich einigermaßen gleichmäßig über das gesamte Werkstück ausgebreitet hat.

**[0012]** Die Oberflächentemperatur  $T_{wb}$  eines Werkstücks ergibt sich aus folgender allgemeinen Beziehung:

$$T_{wb} = f_{(E, O/V, c, t)}$$

wobei: E = Energietransfer-Menge im Prozeß,  
O/V = Oberflächen:Volumen-Verhältnis,  
c = Wärmekapazität des spezifischen Werkstoffs,  
t = Prozeßzeit.

**[0013]** Aus dieser lassen sich Aufheiz- oder Abkühlkurven für die Oberfläche eines Werkstücks bestimmen.

**[0014]** Restprobleme bleiben aber bei folgenden Werkstücken bestehen:

- a) mit großen Abmessungen, insbesondere großem Abstand zwischen dem Kern des Werkstücks bzw. dem "kalten" Ende und der Meß-Oberfläche,
- b) mit unregelmäßigen Querschnitten,
- c) mit ungünstigem Verhältnis von Oberfläche zu Volumen,

- d) mit großem Werkstoff-Ausdehnungskoeffizienten "d",
- e) mit schlechter Wärmeleitfähigkeit,
- f) bei großen Zerspanungsmengen pro Zeiteinheit,

**[0015]** Um mindestens eine dieser Fehlerquellen zusätzlich auszuschalten und noch kleinere Toleranzen einhalten zu können, wird daher im Zuge einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung vorgeschlagen, die Werkstücktemperatur zu "gewichten", d.h. einen Temperaturwert zu ermitteln, durch dessen rechnerische Erfassung und entsprechender Steuerung der Maschine, die Toleranzen kleinstmöglich sind. Dies geschieht dadurch, daß zusätzlich zu Beginn der Bearbeitung die Oberflächentemperatur  $T_{wu}$  des unbearbeiteten Werkstücks gemessen wird, an mindestens einem späteren Meßzeitpunkt  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  im Bearbeitungsablauf die Oberflächentemperatur  $T_{wb}$  des bearbeiteten Werkstücks gemessen wird und daß hieraus eine gewichtete Werkstücktemperatur  $\Delta T_{wg}$  nach der Beziehung

$$\Delta T_{wg} = (1 - X) \cdot T_{wu} + X \cdot T_{wb} - \text{Bezugstemperatur} \quad (1)$$

bestimmt wird, wobei "X" der prozeßabhängige Gewichtungsfaktor ist und  $0 < X < 1$  beträgt, und wobei hieraus nach der Beziehung

$$(2) \quad L_{T_{wg}} = L_{T_m} \cdot \frac{d_w \cdot \Delta T_{wg} + 1}{d_m \cdot \Delta T_m + 1}$$

die Längenmaßkorrektur  $L_{T_{wg}}$  bestimmt und als Korrekturfaktor auf die Steuereinheit aufgeschaltet wird, wobei  $d_w$  der Ausdehnungskoeffizient des Werkstücks,  $d_m$  der Ausdehnungskoeffizient der Längenmeßeinrichtung und  $L_{T_m}$  die Länge der Längemeßeinrichtung bei der Temperatur  $T_m$  und  $\Delta T_m$  das Maß für die Temperaturänderung der Längenmeßeinrichtung ist.

**[0016]** Die erforderliche Software, deren Erstellung keine Schwierigkeiten bereitet, normiert einerseits die von  $L_{bez}$  (siehe die weiter oben angegebene Beziehung hierfür) abweichenden Längenmaße der Längemeßeinrichtungen, auf die Bezugstemperatur von beispielhaft 20°C, andererseits auch die Temperatur des Werkstücks nach der vorstehenden Beziehung. Dabei wird in der Regel vorausgesetzt, das das unbearbeitete, d.h. zur Bearbeitung angelieferte Werkstück über seinen gesamten Querschnitt die Temperatur  $T_{wu}$  angenommen hat.

**[0017]** Die Bestimmung des Gewichtungsfaktors "X" erfolgt in besonders einfacher Weise dadurch, daß zunächst anhand eines Musterwerkstücks eine werkstückspezifische und von den eine Temperaturänderung bewirkenden Bearbeitungsparametern beeinflusste Temperaturkurve K ermittelt und abgespeichert wird, die von der anfänglichen Oberflächentemperatur  $T_{wu}$  des unbearbeiteten Werkstücks bis zu einer virtuellen Grenztemperatur  $T_g$  verläuft, daß dieser Temperaturkurve K eine äquidistant unterteilte Skala S für den Gewichtungsfaktor "X" zugeordnet wird, deren Nullpunkt  $X = 0$  der anfänglichen Oberflächentemperatur  $T_{wu}$  zugeordnet ist und deren Endpunkt  $X = 1$  der Grenztemperatur  $T_g$  zugeordnet ist, daß ferner aus der Temperturkurve K zu mindestens einem Meßzeitpunkt  $t_1, t_2$  mindestens ein Temperaturwert  $T_{wb1}, T_{wb2}$  ermittelt und auf die Skala (S) herübergelotet wird und daß dort der mindestens eine Gewichtungsfaktor " $X_1$ ", " $X_2$ " für die Rechenoperation nach Formel (1) bestimmt, abgespeichert und für alle weiteren Werkstücke der gleichen Art abgerufen und in der Recheneinheit (15) verwendet wird.

**[0018]** Eine besonders vorteilhafte Ausgestaltung der Werkzeugmaschine ist gemäß der weiteren Erfindung dadurch gekennzeichnet, daß an dem mindestens einen Werkzeugschlitten

- a) mindestens eine, parallel zu einer Zustellrichtung des Bearbeitungswerkzeugs ausgerichtete, einen Längemaßstab aufweisenden Längenmeßeinrichtung mit einem Temperaturfühler für die Erfassung der Temperatur der Längemeßeinrichtung angeordnet ist, und
- b) mindestens ein weiterer Temperaturfühler angeordnet ist, der zumindest vorübergehend mit dem Werkstück in Berührung bringbar ist, und daß die elektrischen Ausgänge der Temperaturfühler einer Recheneinheit für eine Temperaturbewertung und eine Zielmaßberechnung aus allen Temperaturmessungen aufgeschaltet sind, und daß der mindestens eine Ausgang der Recheneinheit der als CNC-Steuerung ausgebildeten Steuereinheit für die Zustellbewegungen des mindestens einen Werkzeugschlittens aufgeschaltet ist.

## Ausführungsbeispiel

[0019] Ein Ausführungsbeispiel des Erfindungsgegenstandes und seine Wirkungsweise werden nachstehend anhand der Fig. 1 und 2 näher erläutert.

[0020] Es zeigen:

[0021] Fig. 1 eine perspektivische Frontalansicht einer als Schleifmaschine ausgeführten Werkzeugmaschine mit einem rotierbaren Maschinenwerkzeug, das als Schleifscheibe ausgeführt ist, sowie eine Meß- und Steuereinheit und

[0022] Fig. 2 ein Diagramm zur Ermittlung des Gewichtungsfaktors "X".

[0023] Die nachstehende Beschreibung bezieht sich beispielhaft auf eine Schleifmaschine.

[0024] In Fig. 1 sind Teile einer Schleifmaschine **1** dargestellt, nämlich ein Ständer **2**, an der eine Querführung **3** in Richtung des Doppelpfeils **4** horizontal beweglich angeordnet ist. Diese Querführung **3** trägt wiederum einen Schleifspindelschlitten **5**, der in Richtung des Doppelpfeils **6** vertikal beweglich an der Querführung **3** gelagert ist. Der Schleifspindelschlitten **5** trägt einen Spindelmotor **7** mit einer Schleifscheibenspindel **8** und einem Bearbeitungswerkzeug **9**, das als Schleifscheibe ausgeführt ist, die sich außer Eingriff mit einem Werkstück **10** befindet, das als Ring ausgeführt und um die Achse "A" drehbar ist. Das Werkstück **10** ist wiederum auf eine drehbare Aufspanvorrichtung **11a** eines Werkstückträgers **11** aufgespannt.

[0025] Mittels des Bearbeitungswerkzeugs **9** (Schleifscheibe) ist sowohl eine Innen- als auch eine Außenbearbeitung sowie eine Bearbeitung der Werkstückoberfläche **18**, hier der oberen Stirnfläche möglich, die im vorliegenden Fall die Meßfläche ist.

[0026] Zur Erfassung der Quer- oder Horizontalbewegung bzw. zur Positionsmeldung des Schleifspindelschlittens **5** dient eine Längenmeßeinrichtung **12**, die einen Linearmaßstab **13** mit Skalenteilung und einer optischen Abtastung besitzt. Zur Erfassung der Temperatur des Linearmaßstabs **13** und damit zur rechnerischen Erfassung von dessen Längenänderungen dient ein erster Temperaturfühler **14**, dessen Ausgangssignal einem Rechner **15** zur Temperaturbewertung und zur Zielmaßberechnung aufgeschaltet ist.

[0027] Am Schleifspindelschlitten **5** ist ferner mittels einer Vertikalführung **16** ein vertikal verschiebbarer zweiter Temperaturfühler **17** angeordnet, der mit der Werkstückoberfläche **18** in Berührung bringbar ist und deren Temperatur erfaßt. Auch das Ausgangssignal dieses Temperaturfühlers **17** ist dem Rechner **15** aufgeschaltet.

[0028] Zur Schleifmaschine **1** gehört eine Steuereinheit **19**, die als CNC-Steuerung ausgeführt und mit dem Rechner **15** verbunden ist und die Speicherplätze, Eingabetasten und ein Display enthält, die jedoch nicht besonders dargestellt sind. Wie bereits weiter oben ausgeführt wurde, besitzt die Schleifmaschine **1** weitere Positionsgeber für die relativen Lagen weiterer beweglicher Teile der Schleifmaschine **1**. Auch deren Ausgangssignale werden der Steuereinheit **19** zugeführt, was durch die Pfeile  $P_1$  bis  $P_n$  angedeutet ist.

## Beispiel:

[0029] Ein Ring aus dem Stahl 100Cr6 mit einer Anfangstemperatur von  $19,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , einem Außendurchmesser  $D_a$  von  $400(+0,2)$  mm, einem Innendurchmesser von  $300(-0,2)$  mm und einer axialen Länge von 170 mm wird auf das Maß  $D_a = 400(\pm 0,0)$  mm heruntergeschliffen. Dieser Werkstoff hat einen Ausdehnungskoeffizienten  $d_w$  von  $11,5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ . Der zeitliche Ablauf des Prozesses war wie folgt:

Bearbeitungs- vorgang	Einzelzeiten min	Summenzeiten min	Zeitpunkt
Messen	3	3	$t_0$
Schruppen	30	33	
Messen	3	36	$t_1$
Schlichten	55	91	
Kontrollmessen	3	94	$t_2$

**[0030]** Anhand der Fig. 2 wird nun erläutert, wie der Gewichtungsfaktor "X" bestimmt wird: Auf der Abszisse ist die Prozeßzeit "t" mit den Meßzeitpunkten  $t_0$ ,  $t_1$  und  $t_2$  aufgetragen. Zugehörig sind die Temperaturen  $T_{wu}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $T_{wb1}$  und  $T_{wb2}$  als Ordinatenwerte. Aus diesen Meßwerten läßt sich mit hinreichender Genauigkeit die Temperaturkurve "K" für das vorstehend beschriebene spezielle Werkstück **10** darstellen, die sich asymptotisch einem Grenzwert " $T_g$ ", der sogenannten Beharrungstemperatur nähert, bei der ein Gleichgewicht herrscht. In das Diagramm wird nun eine zweite Ordinate eingetragen, deren unterster Wert bei " $T_{wu}$ ", der anfängliche Oberflächentemperatur, liegt. Dieser Wert entspricht " $X$ " = 0. Der oberste Wert liegt bei der Grenztemperatur " $T_g$ " und entspricht " $X$ " = 1.

**[0031]** Die Strecke zwischen  $X = 0$  und  $X = 1$  wird nun äquidistant unterteilt, und die Ordinatenwerte für  $t_0$ ,  $t_1$  und  $t_2$ , d.h.,  $T_{wu}$ ,  $T_{wb1}$  und  $T_{wb2}$  werden nun lotrecht auf die zweite Ordinate von  $X = 0$  bis  $X = 1$  übertragen, woraus sich der entsprechende Gewichtungsfaktor "X" ergibt. Der vorstehend beschriebenen Fall gilt für den Vorgang des Erwärmens des Werkstücks durch Schleifenergie.

**[0032]** Vergleichsweise ergeben sich folgende Werte für die rechnerisch berücksichtigten Temperaturwerte:

	ungewichtet °C	X	gewichtet °C
$T_m$	20,1	-	
$T_{wu}$	19,0	0	19,0
$T_{wb1}$	21,3	0,25	19,6
$T_{wb2}$	23,1	0,30	20,2

**[0033]** Aus "X" ergeben sich folgende Maßkorrekturen in [ $\mu\text{m}$ ] ohne und mit Gewichtung der Temperatur bei einem Enddurchmesser  $D_a$  von  $400(\pm 0,0)$  mm:

Tw	ohne Gewichtung	mit	ohne Gewichtung	mit	Meßraum
	T <sub>wb1</sub>	T <sub>wg1</sub>	T <sub>wb2</sub>	T <sub>wg2</sub>	20°C
Schruppen	+ 5,7	- 1,5	--	--	--
Schichten	--	--	+ 13,9	+ 0,6	+ 1,5
=====					
L <sub>Twb</sub> -L <sub>Twg</sub>	7,2	0	13,3	0	--

**[0034]** Die Methode läßt sich ohne weiteres auf andere Werkstückparameter, z.B. mit anderen Verhältnissen von Werkstückoberfläche:Volumen übertragen:  $X \wedge O/V$  wobei "O" die Werkstückoberfläche und "V" das Volumen ist.

**[0035]** Die Temperaturkurve "K" gilt für einen anderen Fall, bei dem das Werkstück **10** durch Verdunstungswärme gekühlt wird.

#### Bezugszeichenliste

1	Schleifmaschine
2	Ständer
3	Querführung
4	Doppelpfeils
5	Schleifspindelschlitten
6	Doppelpfeils
7	Spindelmotor
8	Schleifscheibenspindel
9	Bearbeitungswerkzeug
10	Werkstück
11	Werkstückträger
11a	Aufspannvorrichtung
12	Längenmeßeinrichtung
13	Linearmaßstab
14	Temperaturfühler
15	Rechner
16	Vertikalführung
17	Temperaturfühler
18	Werkstückoberfläche
19	Steuereinheit
A	Achse
K	Temperaturkurve
K'	Temperaturkurve
P1 bis P <sub>n</sub>	Pfeile
X	Gewichtungsfaktor

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Kompensieren von temperaturabhängigen relativen Lageänderungen zwischen einem Werkstück (**10**) und einem Bearbeitungswerkzeug (**9**) an Werkzeugmaschinen mit einer Steuereinheit (**19**), die eine Recheneinheit (**15**) mit Speicherplätzen besitzt, und mit mindestens einer Längenmeßeinrichtung (**12**), sowie mit Mitteln zur Messung und Übertragung von Temperaturwerten der Längenmeßeinrichtung (**12**) und des Werkstücks (**10**) auf die Steuereinheit (**19**), derart, daß durch die Steuereinheit (**19**) temperaturabhängige Lageänderungen von Bearbeitungswerkzeug (**9**) und Werkstück (**10**) kompensiert werden, wobei zu Beginn

der Bearbeitung eine Oberflächentemperatur  $T_{wu}$  des unbearbeiteten Werkstücks (10) gemessen wird, an mindestens einem späteren Meßzeitpunkt  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  im Bearbeitungsablauf eine Oberflächentemperatur  $T_{wb}$  des bearbeiteten Werkstücks (10) gemessen wird und wobei sowohl aus Temperaturänderungen einer jeden Längenmeßeinrichtung (12) als auch aus Temperaturänderungen des Werkstücks (10) selbst durch die Temperaturmessungen Korrektursignale erzeugt und zu einer Sollmaßkorrektur auf von einer Bezugstemperatur abweichende Lageverhältnisse von einer Werkstückoberfläche (18) und dem Bearbeitungswerkzeug (9) verwendet werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch die Anwendung an Schleifmaschinen (1) mit einer Schleifscheibe als Bearbeitungswerkzeug (9)

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Einhaltung kleiner Toleranzen zusätzlich aus den gemessenen Temperaturwerten eine gewichtete Werkstücktemperatur  $\Delta T_{wg}$  nach der Beziehung

$$(1) \Delta T_{wg} = (1 - X) \cdot T_{wu} + X \cdot T_{wb} - \text{Bezugstemperatur}$$

bestimmt wird, wobei "X" der prozeßabhängige Gewichtungsfaktor ist und  $0 < X < 1$  beträgt, und daß hieraus nach der Beziehung

$$(2) \quad L_{T_{wg}} = L_{T_m} \cdot \frac{d_w \cdot \Delta T_{wg} + 1}{d_m \cdot \Delta T_m + 1}$$

eine Längenmaßkorrektur  $L_{T_{wg}}$  bestimmt und als Korrekturfaktor auf die Steuereinheit (19) aufgeschaltet wird, wobei  $d_w$  der Ausdehnungskoeffizient des Werkstücks (10),  $d_m$  der Ausdehnungskoeffizient der Längenmeßeinrichtung (12) und  $L_{T_m}$  die Länge der Längemeßeinrichtung (12) bei der Temperatur  $T_m$  und  $\Delta T_m$  das Maß für die Temperaturänderung der Längenmeßeinrichtung (12) ist.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bestimmung des Gewichtungsfaktors "X" zunächst anhand eines Musterwerkstücks (10) eine werkstückspezifische und von den eine Temperaturänderung bewirkenden Bearbeitungsparametern beeinflusste Temperaturkurve (K) ermittelt und abgespeichert wird, die von der anfänglichen Oberflächentemperatur  $T_{wu}$  des unbearbeiteten Werkstücks (10) bis zu einer virtuellen Grenztemperatur  $T_g$  verläuft, daß dieser Temperaturkurve (K) eine äquidistant unterteilte Skala (S) für den Gewichtungsfaktor "X" zugeordnet wird, deren Nullpunkt  $X = 0$  der anfänglichen Oberflächentemperatur  $T_{wu}$  zugeordnet ist und deren Endpunkt  $X = 1$  der Grenztemperatur  $T_g$  zugeordnet ist, daß ferner aus der Temperaturkurve (K) zu mindestens einem Meßzeitpunkt  $t_1, t_2$  mindestens eine Oberflächentemperatur  $T_{wb1}, T_{wb2}$  ermittelt und auf die Skala (S) herübergelotet wird und daß dort der mindestens eine Gewichtungsfaktor "X<sub>1</sub>", "X<sub>2</sub>" für die Rechenoperation nach Formel (1) bestimmt, abgespeichert und für alle weiteren Werkstücke (10) der gleichen Art abgerufen und in der Recheneinheit (15) verwendet wird.

5. Werkzeugmaschine mit einer Steuereinheit (19), die eine Recheneinheit (15) mit Speicherplätzen besitzt, zum Kompensieren von temperaturabhängigen relativen Lageänderungen zwischen einem Werkstück (10) mit einer Werkstückoberfläche (18) und mit einem Bearbeitungswerkzeug (9) mit mindestens einem an einem gegenüber einem Ständer (2) und dem Werkstück (10) beweglichen Werkzeugschlitten (5) angeordneten Bearbeitungswerkzeug (9), und mit mindestens einer Längenmeßeinrichtung (12), sowie mit mindestens einem Temperaturfühler (17), der mit der Werkstückoberfläche (18) in Berührung bringbar ist, sowie mit Mitteln zur Übertragung von temperaturabhängigen Längenänderungen der Längenmeßeinrichtung (12) und von Temperaturen der Werkstückoberfläche (18) auf die Steuereinheit (19), wobei sowohl einer jeden Längenmeßeinrichtung (12) als auch dem Werkstück (10) selbst mindestens je ein Temperaturfühler (14, 17) zugeordnet ist, durch den Temperaturmessungen mit elektrischem Ausgangssignal erzeugbar sind, und daß die Recheneinheit (15) und die Steuereinheit (19) in der Weise geschaltet sind, daß aus den Temperaturmessungen an der mindestens einen Längemeßeinrichtung (12) und aus mindestens zwei gemessenen Temperaturwerten  $T_{wu}, t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  der Werkstückoberfläche (18) zu Beginn und während des Bearbeitungsablaufs elektrische Korrektursignale erzeugbar sind, die zur Sollmaßkorrektur auf die von einer Bezugstemperatur abweichenden Lageverhältnisse von Werkstückoberfläche (18) und Bearbeitungswerkzeug (9) verwendbar sind.

6. Werkzeugmaschine nach Anspruch 5, gekennzeichnet durch die Ausbildung als Schleifmaschine mit einer Schleifscheibe als Bearbeitungswerkzeug (9).

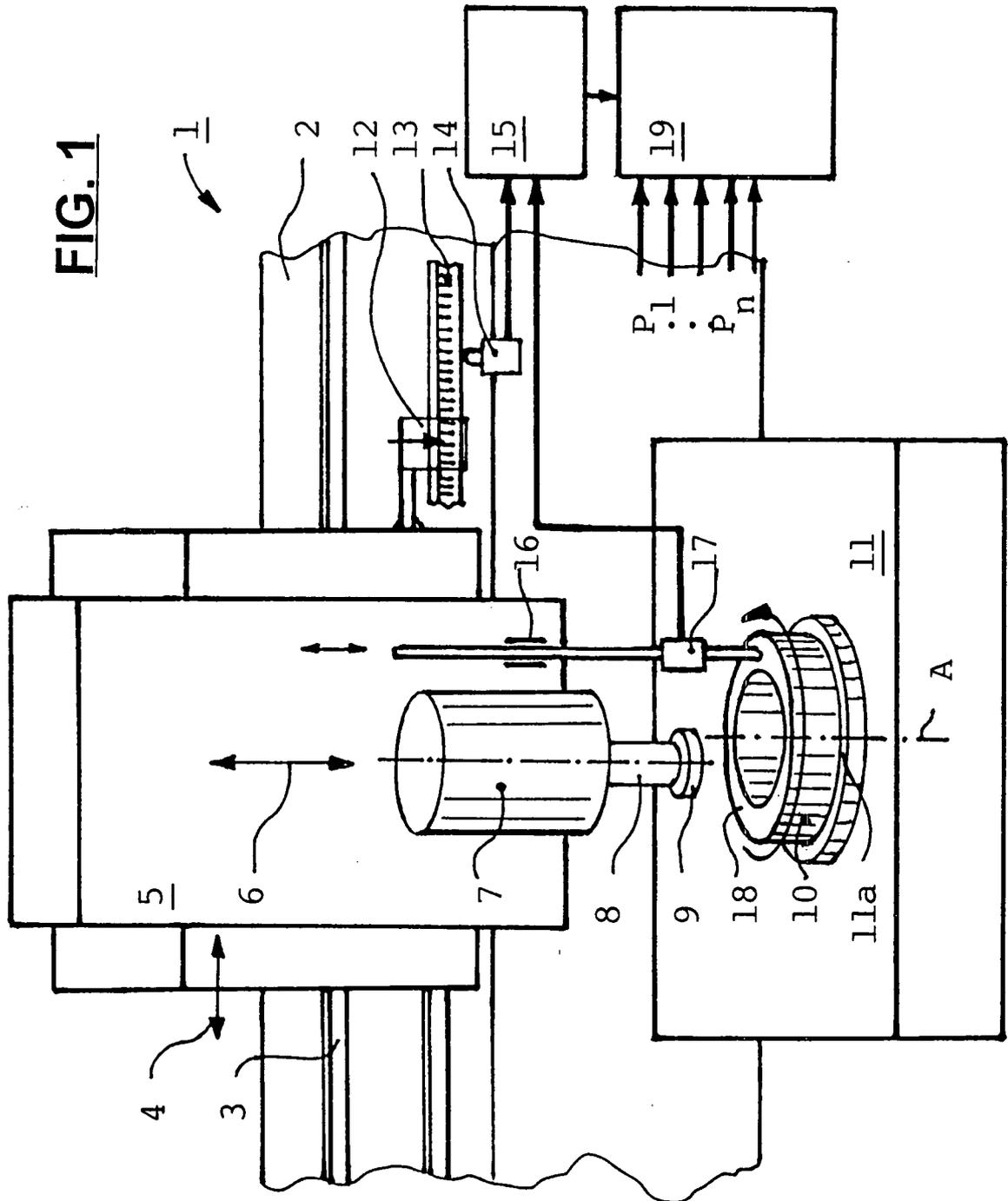
7. Werkzeugmaschine nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß an dem mindestens einen Werkzeugschlitten (5)

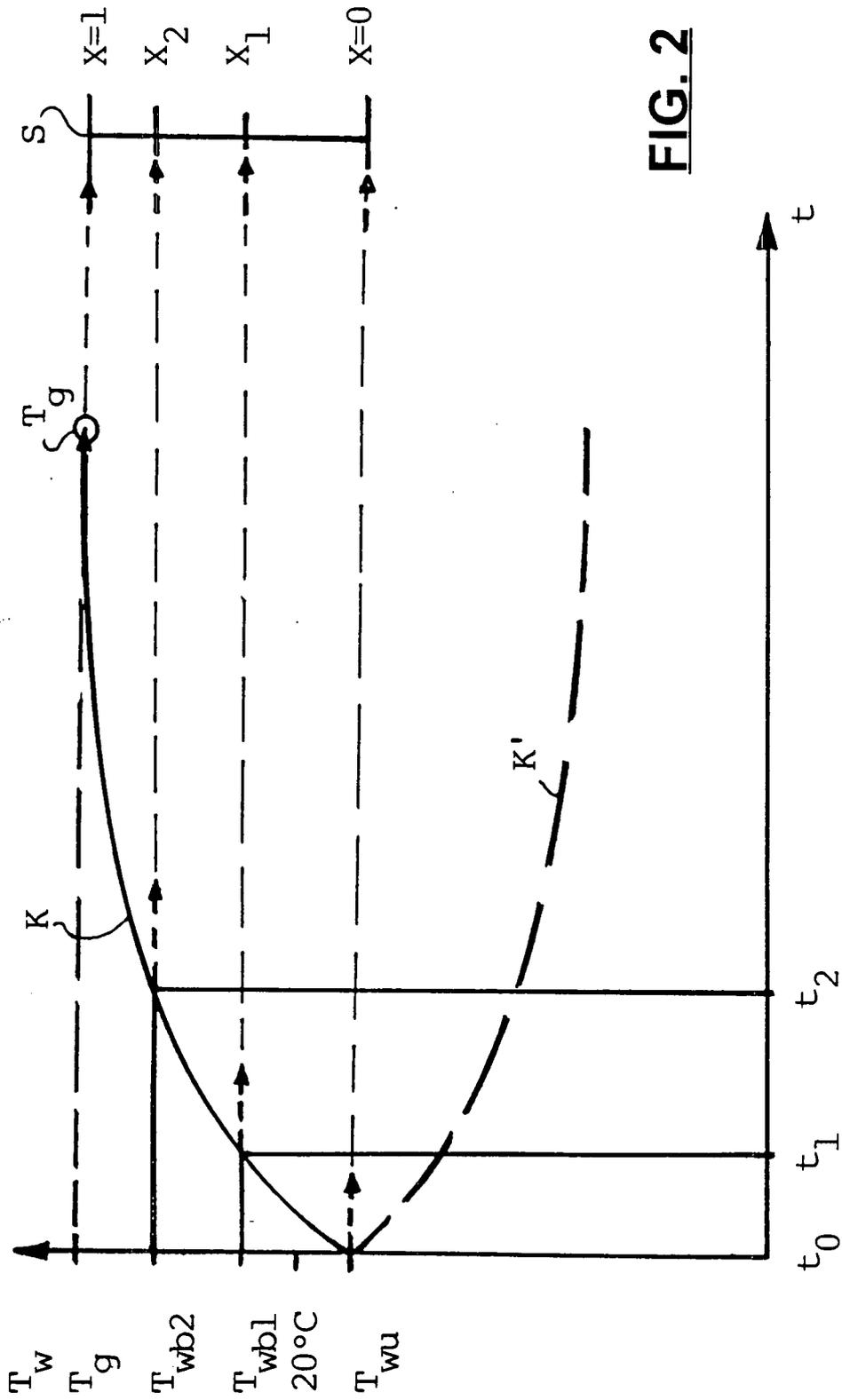
a) mindestens eine, parallel zu einer Zustellrichtung des Bearbeitungswerkzeugs (9) ausgerichtete, einen Linearmaßstab (13) aufweisende Längenmeßeinrichtung (12) mit einem Temperaturfühler (14) für die Erfassung der Temperatur der Längemeßeinrichtung (12) angeordnet ist, und

b) mindestens ein weiterer Temperaturfühler (17) angeordnet ist, der zumindest vorübergehend mit dem Werkstück (10) in Berührung bringbar ist, und daß

die elektrischen Ausgänge der Temperaturfühler (14, 17) einer Recheneinheit (15) für eine Temperaturbewertung und eine Zielmaßberechnung aus allen Temperaturmessungen aufgeschaltet sind, und daß der mindestens eine Ausgang der Recheneinheit (15) der als CNC-Steuerung ausgebildeten Steuereinheit (15) für die Zustellbewegungen des mindestens einen Werkzeugschlittens (5) aufgeschaltet ist.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen





**FIG. 2**