

Forschung und Konstruktion

Grundlagen
Werkstoffe
Maschinenelemente
Maschinenausrüstung

Steuerung berechenbar

Thermische Verformungen von Werkzeugmaschinen wärmeabhängig kompensieren

Uwe Heisel

Thermische Verformungen einer Werkzeugmaschine, die Abweichungen von der idealen Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück zur Folge haben, lassen sich mit temperaturabhängig gesteuerten Werkzeugzustellbewegungen ausgleichen. Das Prinzip dieses Verfahrens beruht darauf, daß die zwischen Werkzeug und Werkstück auf tretenden Verlagerungen in einem ursächlichen Zusammenhang mit bestimmten Temperaturänderungen an der Maschine stehen. Die funktionale Abhängigkeit kann experimentell ermittelt werden. Sie liefert unter der Voraussetzung der Reproduzierbarkeit Gleichungen, nach deren Maßgabe eine Steuerung für die thermische Kompensation arbeiten kann.

Thermische Verformungen an Werkzeugmaschinen, die auf die Arbeitsgenauigkeit einen unerwünschten Einfluß ausüben, können auf verschiedene Weise ausgeglichen werden (Bild 1). Aus der Sicht des Anwenders von Werkzeugmaschinen haben dabei besonders diejenigen Maßnahmen große Bedeutung, die auch nachträglich im Fertigungsprozeß angewandt werden können.

Diese Maßnahmen umfassen die Verfahren, bei denen entweder geregelt oder gesteuert versucht wird, keine thermisch bedingten Fehler am Werkstück entstehen zu lassen. Dabei sind zwei Gruppen zu unterscheiden, und zwar die eine, bei der das Entstehen thermischer Verformungen beispielsweise mit entsprechender Kühlung verhindert wird, und die andere, bei der die entstehenden Fehler am Werkstück gemessen und mit Korrekturbewegungen des Werkzeugs kompensiert werden. Besonders bei der zweiten Verfahrensgruppe besteht die Schwierigkeit, mit empfindlichen Instrumenten Meßwerte im Bereich der Wirkstelle zuverlässig zu erfassen. Die wirkenden Kräfte, die Zerspanungswärme, die ablaufenden Späne sowie das Vorhandensein von Kühlschmierstoff und Schmutz tragen dazu bei, daß solche Messungen schwierig sind. In der Praxis versucht man deshalb, anstelle des direkten Messens der am Werkstück entstehenden Fehler solche Meßgrößen zu er-

fassen, die der Fehlergröße proportional sind [1].

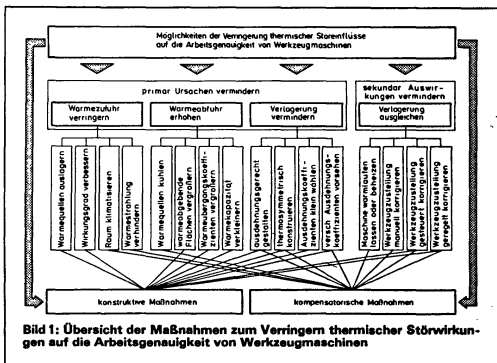
Für den Ausgleich thermisch verursachter Fehler eignen sich als indirekte Meßgrößen besonders Temperaturen an der Werkzeugmaschine, die für das thermische Verhalten als signifikant anzusehen sind [1, 2]. Die Struktur eines betrachteten Temperaturfeldes an einer Maschine hängt sowohl von der Betriebsdauer und den Betriebsbedingungen, als auch von den herrschenden Umgebungsbedingun-

gen ab. Zwischen der Gestalt des Temperaturfeldes und der Relativverlagerung zwischen Werkzeug und Werkstück an der Wirkstelle besteht eine feste Relation [2]. Sie kann experimentell ermittelt und in Form mathematischer Funktionen dargestellt werden. Nach Maßgabe dieser Funktionen kann man dann mit geregelten oder gesteuerten Parametern den thermischen Fehleranteil am Werkstück kompensieren [1 bis 4].

Temperaturabhängige Kompensationssteuerung

Eine Steuerung für die temperaturabhängige Kompensation besteht allgemein aus mehreren Temperaturmeßfühlern mit geeigneter Signalverstärkung sowie gegebenenfalls entsprechenden Wandlern für die Transformation der Meßsignale, einem logischen Element mit Rechenwerk und einem Stellglied. Der Aufbau ist von der Art der Maschinensteuerung sowie vom Automatisierungsgrad abhängig.

Für mechanisch gesteuerte Maschinen, wie zum Beispiel für einen kurvengesteuerten Drehautomaten, sind stetig arbeitende Stellglieder erforderlich, mit deren Hilfe das Werkzeug entsprechend der Fehlergröße in Zustellung vor oder während des Bearbeitens verfahren werden kann. Die Funktionsweise und die Art des Ansteuerens des Stellgliedes be-



Dr.-Ing. Uwe Heisel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Berlin.

dingen wiederum die Art der Steuerstrecke und insbesondere die des Wandlers, mit dessen Hilfe ein Temperaturmeßsignal in ein Steuersignal für das Stellglied gewandelt werden kann.

Für numerisch gesteuerte Maschinen müssen geeignete Schnittstellen in der Steuerung zur Verfügung stehen, so daß ein aus aktuellen Maschinentemperaturen errechneter Korrekturwert übergeben werden kann. Das Zustellen des Werkzeuges geschieht über den Vorschubantrieb.

In beiden Fällen spielt die Kompensationsstrategie eine wichtige Rolle. Sie wird hauptsächlich von der Bearbeitungsaufgabe bestimmt. Bei kleinen Hauptzeiten genügt es, unmittelbar vor dem letzten Schnitt zu korrigieren. Dabei sind die jeweils maßgebenden Korrekturwerte solange zu speichern, bis sie im Augenblick des Zustellens vor dem Fertigbearbeiten berücksichtigt werden müssen. Bei großen Hauptzeiten, innerhalb der infolge thermischer Relativverlagerungen im wesentlichen Formfehler entstehen, muß während des Bearbeitens stetig kompensiert werden, ohne daß Rückzugsriefen auf der Werkstückoberfläche entstehen.

Daraus leiten sich höchste Ansprüche an die Positioniergenauigkeit und Steifigkeit der Stellglieder und der Vorschubantriebe ab. Darüber hinaus bedingt die stetige Kompensation auch eine Konzeption der Steuerstrecke, die es erlaubt, den thermischen Fehler am Werkstück aus dem Temperaturgang der Maschine sehr genau zu bestimmen. Dafür sind in besonderem Maße die Wahl der Temperaturmeßorte sowie die Zuverlässigkeit ausschlaggebend, mit der die Abhängigkeit der Relativverlagerung an der Wirkstelle von einem bestimmten Temperaturgang angegeben werden kann.

Wahl der Temperaturmeßorte

Grundsätzlich stellt eine Werkzeugmaschine ein komplexes thermisches Sy-

stem dar, bei dem in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen verschiedene Wärmequellen an unterschiedlichem Ort wirksam sind. Das thermische Verhalten einer Werkzeugmaschine hängt ab von den konstruktiven Gegebenheiten und den Werkstoffeigenschaften. Die in der thermischen Wirkungskette befindlichen Bauteile unterliegen thermischen Dehnungen und Biegungen, die frei oder behindert sein können. Weil die unmittelbar auf die Arbeitsgenauigkeit wirkende Verlagerung an der Wirkstelle einer Superposition aller beteiligten Bauteildeformationen darstellt, kann man versuchen, eine mittlere Temperaturänderung zu finden, die der Verlagerung an der Wirkstelle direkt proportional ist. De Haas [5] hat in einem Modellversuch an einem Getriebekasten die vertikale Verlagerung der Spindelachse gemessen und gleichzeitig den Temperaturverlauf an mehreren Orten in der Getriebewand unterhalb des Lagers beobachtet. Erwartungsgemäß nahm die Temperatur mit der Entfernung von der Wärmequelle (Spindellager) ab. Der so betrachtete Temperaturfeldabschnitt enthält bei stetigem Gradienten eine mittlere Temperatur, die der gemessenen Vertikalverlagerung direkt proportional ist.

Eine Änderung des Temperaturfeldes, zum Beispiel als Folge geänderter Betriebsbedingungen, bewirkt jedoch, daß der Ort, an dem die mittlere Temperatur auftritt, ebenfalls verändert wird. Daraus kann man bereits ableiten, daß das Messen einer Temperatur an einem festen Ort bezüglich der Proportionalität zu einer Deformation stets mit einem Fehler behaftet ist. Er bewirkt eine Streuung der Betriebspunkte um eine Regressionsgerade, die um so größer ist, je größer die Änderung des Ortes der mittleren Temperatur ist.

Die Bilder 2 und 3 zeigen am Beispiel der axialen Spindelverlagerung Δz den für verschiedene Drehzahlen im Bereich zwischen $n = 82 \dots 4600 \text{ min}^{-1}$ ermittel-

ten Zusammenhang zu den Temperaturen am vorderen und hinteren Spindellagerflansch einer Drehmaschine. Die Meßstelle am hinteren Lagerflansch ist für die Kompensation der axialen Spindelverlagerung vor allem wegen der geringeren Streuung der Meßwerte besser geeignet. Darüber hinaus gilt für diesen Ort, daß die Regressionsfunktion eine geringere Steigung aufweist. Dies bedeutet, daß sich Ungenauigkeiten der Temperaturmessung beim Berechnen des Korrekturwertes aus der Regressionsfunktion geringer auswirken. Für die Wahl eines Temperaturmeßortes gilt deshalb der Grundsatz, daß die Streuung der Meßwerte klein und die Ableitung der Funktion $f(\Delta\vartheta)$ möglichst klein sein soll. Allgemein lassen sich die Kriterien für die Wahl geeigneter Orte für die Temperaturmeßstellen wie folgt darstellen:

- Es sind möglichst solche Meßorte zu wählen, die unmittelbar in der thermischen Wirkungskette liegen, also Orte an Maschinenteilen, deren Deformation direkte Auswirkung auf die Verlagerung an der Wirkstelle haben.
- Es sind aus Gründen der Meßgenauigkeit weiterhin Meßorte zu wählen, an denen beim Betrieb der Maschine gegenüber der Umgebung vergleichsweise hohe Temperaturen auftreten, also Orte in der Nähe wirksamer Wärmequellen.
- Es sind schließlich solche Meßorte zu wählen, die in ihrer Gesamtheit die Messung von Temperaturverläufen derart zulassen, daß möglichst alle thermischen Einflußgrößen erfaßt werden. Insbesondere sollen die verschiedenen Betriebsparameter einer Werkzeugmaschine und gegebenenfalls des Zerspanungsprozesses sowie die Umgebungstemperatur berücksichtigt werden können.

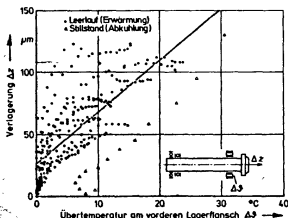


Bild 2: Axiale Relativverlagerung der Hauptspindel einer Drehmaschine in Abhängigkeit von der Temperatur am vorderen Spindellager

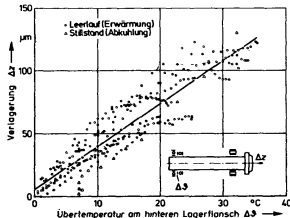


Bild 3: Axiale Relativverlagerung der Hauptspindel einer Drehmaschine in Abhängigkeit von der Temperatur am hinteren Spindellager

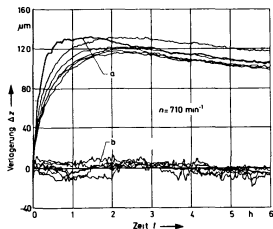


Bild 4: Streuung der Restverlagerung aufgrund der eingeschränkten Reproduzierbarkeit des Verlagerungsverlaufs am Beispiel der axialen Relativverlagerung einer NC-Drehmaschine

a ohne Kompensation, b mit Kompensation

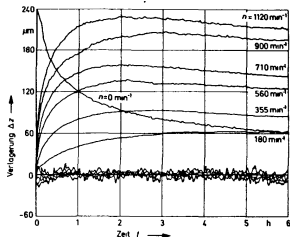


Bild 5: Axiale Relativverlagerung einer NC-Drehmaschine in Abhängigkeit von verschiedenen Drehzahlen und verbleibende Restverlagerung

Darüber hinaus ist aber als weiteres Kriterium bei der Wahl der Temperaturmeßstellen für eine Kompensationssteuerung aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit anzustreben, allgemein möglichst wenige Meßstellen in einer Steuerkette vorzusehen. Dabei ist zu beachten, daß der Einfluß der Meßfehler der einzelnen Temperaturmeßstelle auf den Gesamtfehler mit kleiner werdender Anzahl der Meßstellen zunimmt.

Ermitteln der Korrekturfunktion

Die Anzahl der erforderlichen Temperaturmeßstellen richtet sich nach dem Grad der Annäherung der Approximationsfunktion an die experimentell ermittelte Abhängigkeit zwischen Temperaturänderung und Verlagerung. Der Grad der Annäherung läßt sich durch das Bestimmtheitsmaß ausdrücken. Ein Bestimmtheitsmaß von eins bedeutet die völlige Übereinstimmung und somit auch vollständige Approximation des Ansatzes mit der Zielfunktion. Demnach kann eine für Kompensationszwecke geeignete Funktion gefunden werden, die nach vorheriger Wahl der Temperaturmeßorte schon dann der Forderung nach möglichst vollständiger Kompensation genügt, wenn das Bestimmtheitsmaß eines Teils der gesamten Approximationsfunktion nahe dem Wert eins liegt. Für die Berechnung der Approximationsfunktionen

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = f(\Delta \vartheta_i)$$

stehen Programme zur Verfügung. Anhand experimentell gewonnener Daten für die Verlagerungs- und Temperaturverläufe ist es bei geringem Zeitaufwand möglich, mit Hilfe der multiplen, schrittweisen Regressionsrechnung Funktio-

nen zu ermitteln, deren Bestimmtheitsmaß zwischen 0,95 und 0,99 liegt. Die Funktionen sind als Linearkombinationen beliebig vieler Temperaturverläufe zum Beispiel für die axiale Relativverlagerung in der Form

$$\Delta z = a_1 \Delta \vartheta_{1k} + a_2 \Delta \vartheta_{2k} + \dots + a_n \Delta \vartheta_{nk}$$

$$\Delta z = \sum_{i=1}^n a_i \Delta \vartheta_{ik}, \quad i, k = 1, 2, \dots, n$$

darstellbar. Darin bedeutet i die Anzahl der beliebig gewählten Temperaturverläufe oder Meßstellen an der Werkzeugmaschine und k die Anzahl der Wertepaare für Δz und $\Delta \vartheta$ zum jeweiligen Zeitpunkt $t = t_k$. Man erstellt die approximierten Funktion für eine aus experimentellen Untersuchungen gewonnene Abhängigkeit, indem man die numerischen Werte für die Koeffizienten a_i bestimmt.

Erfolg der Kompensation

Die ermittelte Abhängigkeit stellt die Steuerfunktion für die Kompensations-einrichtung dar. Entsprechend den gemessenen Temperaturänderungen wird das Werkzeug vor oder während des Fertigbearbeitens eines Werkstücks zugestellt. Die kinematische Lageordnung zum Werkstück kann jedoch in der betrachteten Koordinate nur unter der Voraussetzung beibehalten werden, daß 100% des Verlagerungsganges mit der Steuerfunktion für die thermische Kompensation approximiert und keinerlei Ungenauigkeiten der Maschine wirksam sind. Andernfalls ist ein verbleibender, also nicht kompensierbarer Anteil der Verlagerung unvermeidbar. Neben der Unzulänglichkeit der approximierten Funktion bedingt vor allem auch die

Streuung vergleichbarer Verlagerungswerte die Restverlagerung.

Wie anhand des in Bild 4 dargestellten Verlaufs der axialen Relativverlagerung der Hauptspindel einer Drehmaschine für wiederholte Dauerversuche im Leerlauf ersichtlich, liegt eine eingeschränkte Reproduzierbarkeit des Verlagerungsganges vor. Besonders im Bereich großer Verlagerungsgeschwindigkeiten während der ersten zwei Stunden streut der Verlagerungsverlauf derart, daß eine nicht kompensierte Restverlagerung von $\pm 13 \mu\text{m}$ gegenüber einer maximalen Verlagerung von $132 \mu\text{m}$ verbleibt. Als wesentlicher Einfluß für die eingeschränkte Reproduzierbarkeit eines Verlagerungsverlaufs und die sich daraus ergebende Streubreite bei gleichbleibenden Betriebsparametern wirken sich veränderliche Umgebungsbedingungen aus.

Abgesehen von den ersten Minuten nach Betriebsbeginn liegt die Streubreite der Restverlagerung aber innerhalb der Streubreite, die sich aus der Restverlagerung für alle approximierten Verlagerungsverläufe bei unterschiedlichen Drehzahlen ergibt (Bild 5). Sie beträgt bei der untersuchten NC-Drehmaschine etwa $\pm 15 \mu\text{m}$. Dieses gute Ergebnis ist mit einer Kompensationssteuerung aber nur dann zu erreichen, wenn für jede einzelne Drehzahl eine Approximationsfunktion bestimmt und in die Maschinensteuerung programmiert wird. Damit verbunden ist ein beträchtlicher experimenteller Aufwand. Dieser Nachteil wird teilweise ausgeglichen, wenn man die Abhängigkeit der Koeffizienten a_i von der Drehzahl n ebenfalls mit Regressionsfunktionen approximiert und als Bestandteil der Korrekturfunktion betrachtet. Dafür sind lediglich drei bis vier Versuche erforderlich, bei denen die Drehzahl variiert wird.

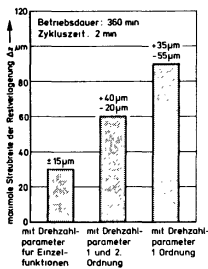


Bild 6: Maximale Streubreite der Restverlagerung in Abhängigkeit von der Approximationsart des Drehzahlparameters

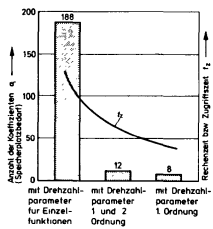


Bild 7: Änderung der Anzahl der Koeffizienten in Abhängigkeit von der Approximationsart des Drehzahlparameters

Es empfiehlt sich dabei, aus dem möglichen Drehzahlbereich einer Werkzeugmaschine eine niedrige, eine mittlere und eine hohe Drehzahl zu wählen. Ist die Abhängigkeit der betrachteten Verlagerungskomponente von der Drehzahl linear, genügen zwei Versuchsläufe. Der Erfolg der Kompensation hängt zusätzlich von dem Grad der Annäherung der

Approximationsfunktion für die Drehzahlabhängigkeit der Koeffizienten ab. Die Bilder 6 und 7 zeigen an einem Beispiel die Änderung der maximalen Streubreite der Restverlagerung sowie der Anzahl der zu speichernden Koeffizienten bei linear und quadratisch approximierter Funktion $a_i = f(n)$. Die Anzahl der Koeffizienten des Gleichungssystems $\Delta z = \sum a_i(n) \Delta \theta_i$ verringert sich beispielsweise im Verhältnis 188 : 12, wenn man ein Polynom 2. Ordnung für das Gleichungssystem $a_i = f(n)$ berechnet. Gleichzeitig aber muß eine Verdoppelung der maximal verbleibenden Restverlagerung hingenommen werden. Weil für den Erfolg der Kompensation letztlich nur Wirtschaftlichkeitskriterien maßgebend sind, orientiert sich die Größenordnung der maximal verbleibenden Restverlagerung unter Berücksichtigung des Aufwandes im Einzelfall an den einzuhaltenden Toleranzgrenzen bei der Fertigung.

chungs-systems $\Delta z = \sum a_i(n) \Delta \theta_i$ verringert sich beispielsweise im Verhältnis 188 : 12, wenn man ein Polynom 2. Ordnung für das Gleichungssystem $a_i = f(n)$ berechnet. Gleichzeitig aber muß eine Verdoppelung der maximal verbleibenden Restverlagerung hingenommen werden. Weil für den Erfolg der Kompensation letztlich nur Wirtschaftlichkeitskriterien maßgebend sind, orientiert sich die Größenordnung der maximal verbleibenden Restverlagerung unter Berücksichtigung des Aufwandes im Einzelfall an den einzuhaltenden Toleranzgrenzen bei der Fertigung.

Schrifttum

- [1] Heisel, U.: Ausgleich thermischer Deformationen an Werkzeugmaschinen. Produktionstechnik, Band 10. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1980.
- [2] Okushima, K., Kakino, Higashimoto, A.: Compensation of Thermal Displacement by Coordinate System Correction. Annals of CIRP, 24 (1975) 1, S. 327-331.
- [3] Ichimiya, R., Heisel, U.: Neue Möglichkeiten der Kompensation thermischer Störeinflüsse an Werkzeugmaschinen. Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung, 17 (1976) 10, S. 441-444.
- [4] Haas, P. de, Heisel, U.: Kompensation thermischer Deformationen an Werkzeugmaschinen. Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung, 73 (1978) 11, S. 555-560.
- [5] Haas, P. de: Thermisches Verhalten von Werkzeugmaschinen unter besonderer Berücksichtigung von Kompensationsmöglichkeiten. Berlin: Technische Universität, Dr.-Ing. Diss., 1975.