

Fertigungsplanung und Fabrikeinrichtungen

Kompensation thermischer Deformationen an Werkzeugmaschinen

Von Dr.-Ing. P. de Haas und Dipl.-Ing. U. Heisel, Berlin

DK 621.9.014-589:536.4

1 Einleitung

Die Genauigkeit von auf spanenden Werkzeugmaschinen gefertigten Werkstücken hängt davon ab, wie genau die Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug ausgeführt wird. Tritt infolge von Störeinflüssen eine Abweichung von der idealen Relativbewegung auf, bildet sich diese auf dem Werkstück ab. Die verschiedenen Störgrößen sind in Bild 1 dargestellt. Sie können aus der Umgebung oder aus dem Zerspanungsprozeß selbst herrühren und bewirken eine Verformung der betroffenen Bauteile, so daß infolgedessen eine Störbewegung entsteht. Aus der Umgebung können Wärmeströme und dynamische Kräfte (z. B. aus einer Fundamentalschwingung) auf das System einwirken. Der größere und bedeutendere Anteil der Störgrößen entsteht innerhalb des Fertigungssystems durch den Prozeß. Die dem System zugeführte elektrische Energie wird vollständig in Wärmeenergie umgewandelt, und zwar zum Teil in der Werkzeugmaschine und zum Teil in der Zerspanungszone. Damit ergibt sich eine thermische Verformung der Werkzeugmaschine, des Werkzeuges und des Werkstückes. Verformungen ergeben sich auch durch statische und dynamische Kräfte, wobei als wichtigste die Zerspankraft sowie Gewichts- und Unwuchtkräfte zu nennen sind. Weitere Störgröße ist der Verschleiß, der sich kurzfristig beim Werkzeug an der Schneide und langfristig bei der Werkzeugmaschine an den Führungselementen auswirkt. Wenn die am Fertigteil festgestellte Abweichung der geometrischen Gestalt größer als die zulässige Toleranz ist, entsteht wirtschaftlicher Verlust durch Nacharbeit oder Ausschuß des Werkstückes. Die Suche nach den Ursachen der entstandenen Fehler gestaltet sich äußerst schwierig. Dem fehlerhaften Werkstück kann meist die Art der beteiligten Störeinflüsse und deren quantitative Verteilung nicht angesehen werden. Der Anteil des thermisch bedingten Fehlers am Gesamtfehler kann dabei so erheblich sein, daß Maßnahmen zur Verringerung oder Kompensation erforderlich werden können, insbesondere bei automatisierten Fertigungsabläufen. In diesem Beitrag soll der thermische Anteil der Störwirkung analysiert und Kompensationsmethoden daraus abgeleitet werden. Aus der schematischen Darstellung des Wirkzusammenhangs der thermischen Wirkungskette lassen sich die verschiedenen Eingriffsmöglichkeiten entwickeln.



Bild 1. Störwirkungen auf das Fertigungssystem

2 Ursache und Auswirkung thermischer Verformungen

2.1 Die thermische Wirkungskette

Um Kompensationsverfahren optimal einsetzen zu können, muß der Wirkzusammenhang analysiert werden. In Bild 2 ist in schematischer Weise der Ablauf dargestellt. Die Ursache thermischer Deformation liegt in der Entstehung von Wärmequellen, bedingt durch die verlustbehaftete Umwandlung von Energie innerhalb der Werkzeugmaschine, sowie von Wärmequellen aus der Umgebung ①. Jedes Bauteil der Werkzeugmaschine wird je nach Betriebsbedingungen von unterschiedlichen Wärmeströmen beaufschlagt, und so bilden sich Temperaturfelder aus, deren örtliche und zeitliche Größen von den geometrischen Abmessungen, der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmespeicherfähigkeit und von den Wärmeübergangsbedingungen an die Umgebung oder die anschließenden Bauteile bestimmt werden ②. Als Folge dieser Temperaturfelder, des thermischen Ausdehnungskoeffizienten und den geometrischen Abmessungen verformen sich die einzelnen Bauteile, wobei jedoch die Dehnung meist durch benachbarte Bauteile behindert wird ③. Der Begriff „Deformationskette“ soll ver-

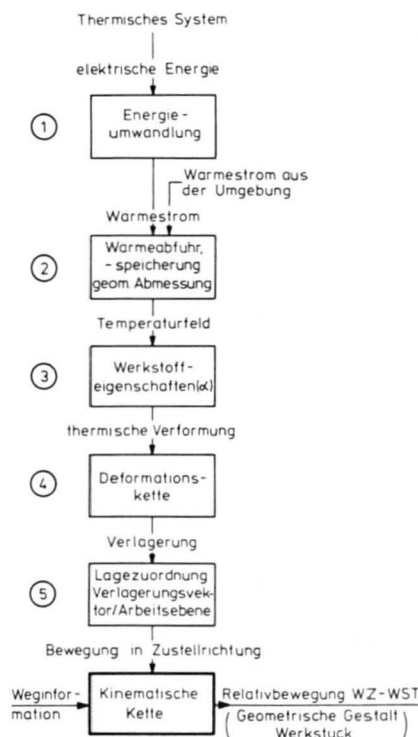


Bild 2. Thermische Wirkungskette

anschaulichen, daß sich die Verlagerung zwischen Werkstück und Werkzeug aus einer Kette von Einzelverformungen zusammensetzt ④. Diese Verlagerung, als Vektor aufgefaßt, kann eine beliebige Stellung innerhalb des Werkzeug-Bezugsystems haben; die Vektorkomponente in Zustellrichtung stellt dann die Störbewegung dar, die sich auf die Arbeitsgenauigkeit auswirkt ⑤.

2.2 Art des Fehlers

Die Relativbewegung von Werkstück und Werkzeug wird durch die Führungselemente bestimmt. Damit hängt die Arbeitsgenauigkeit im wesentlichen von der gegenseitigen Lage der Achsen der Rundführungen zu den Ebenen der Geradführungen ab. Aus der Art der Verschiebung der Achse zu der Ebene ergibt sich dann die Art des Werkstückfehlers: eine Maß-, Lage- oder Formabweichung bzw. eine Kombination derselben.

2.3 Zeitlicher Verlauf des Fehlers

Wirkt eine konstante Wärmequelle, so entsteht ein Temperaturfeld, das analog einer Wachstumsfunktion zunächst schnell anwächst und dann einem Gleichgewichtszustand zustrebt. Entsprechend verhält sich der zeitliche Verlauf der Fehlerfunktion. Der Verlauf wird durch die Anstiegsgeschwindigkeit (ausgedrückt durch die Zeitkonstante T , abhängig von der Wärmespeicherfähigkeit und Wärmeabgabefähigkeit des Bauteils) und der Höhe des Beharrungswertes charakterisiert (abhängig von der Stärke des Wärmestroms und dem Wärmeübergang vom Bauteil an die Umgebung). Wirken mehrere Wärmequellen verschiedener Stärke auf unterschiedliche Bauteile der Deformationskette, dann setzt sich der Verlagerungsverlauf aus mehreren Verformungsanteilen mit gegebenenfalls unterschiedlicher Zeitkonstante und unterschiedlichem Beharrungswert zusammen. Dabei können die Anteile gleich- aber auch gegeneinander gerichtet sein.

Der zeitliche Verlauf des Fehlers am Werkstück ergibt sich aus dem Zusammenwirken des zeitlichen Verlaufs der Werkzeugmaschinen deformation und dem zeitlichen Ablauf der Ferti-

gungsoperation. In Bild 3 soll an einem Bohr- und Fräswerk beispielhaft gezeigt werden, welche Bedeutung der Zeitpunkt und die Zeitdauer der Bearbeitungsoperation, gerechnet vom Betriebsbeginn der Werkzeugmaschine an, auf die Fehlerart und -größe hat. Vereinfachenderweise ist der Verformungsverlauf bei konstanter Drehzahl gewählt worden; der Verlagerungsverlauf ist charakteristisch für das Vorherrschen nur einer Wärmequelle, in diesem Fall die Reibungswärme in der Spindellagerung. Die Verlagerung der Arbeitsspindel in axialer Richtung relativ zum Aufspanntisch ist zuvor in der schematisch dargestellten Weise gemessen und aufgetragen worden. Jetzt wird der Fall betrachtet, daß mehrere Werkstücke nacheinander stirnseitig bearbeitet werden sollen, wobei sie jeweils in gleicher Aufspannung (angedeutet durch eine Anschlagleiste) auf dem Tisch gespannt werden sollen. Die Bearbeitung des ersten Werkstücks beginne zur Zeit $t = 5$ min nach Betriebsbeginn. Dabei hat sich die relative Lage der Spindel zum Tisch oder Werkstück bereits um den Betrag $\Delta z_1 = 35 \mu\text{m}$ geändert, der sich als Maßfehler bemerkbar macht. Während der Bearbeitungszeit von $(t_2 - t_1) = 10$ min ergibt sich ein Anwachsen der Verlagerung von $(z_2 - z_1) = 45 \mu\text{m}$, wodurch ein Formfehler am Werkstück entsteht. Für ein später (in der Zeitspanne t_3 bis t_4) gefertigtes Werkstück ergibt sich dagegen ein wesentlich größerer Anfangsfehler $z_3 = 130 \mu\text{m}$, aber der nur geringe Zuwachs von $(z_4 - z_3) = 5 \mu\text{m}$. Die gleiche Betrachtungsweise kann auch auf ein einziges Werkstück übertragen werden, dessen Stirnfläche in mehreren Durchgängen bearbeitet werden muß. Hierbei ergeben sich die in der Praxis häufig zu beobachtenden Stufen zwischen den einzelnen Teilen der Fläche.

3 Kompensationsverfahren

Zu den Kompensationsverfahren sollen solche gezählt werden, bei denen geregelt oder gesteuert versucht wird, keine thermisch bedingten Fehler am Werkstück entstehen zu lassen. Dabei sind zwei Gruppen zu unterscheiden, und zwar die einen, die die Entstehung einer thermischen Verformung z. B. durch entsprechende Kühlung verhindern, und die anderen, die die entstandenen Deformationen messen und z. B. durch eine Korrekturbewegung des Werkzeugs ausgleichen. Eine wichtige Bedeutung hat der Automatisierungsgrad auf die Wahl der Kompensationsverfahren. Bei manuell bedienten Maschinen führt der Bedienungsmann vor dem letzten Schnitt einen Probeschnitt aus, der nachgemessen wird. Bis dahin entstandene Fehler durch thermische Deformationen der Maschine und auch durch andere Störgrößen wie Verschleiß können somit durch eine Nullpunkt Korrektur ausgeglichen werden. Der Fehler, der hierbei nicht erfaßt wird, ist derjenige, der während der Hauptzeit entsteht und im wesentlichen Formfehler nach sich zieht. Kompensationseinrichtungen sind also nur für diesen Anwendungsfall sinnvoll und erfordern stetig arbeitende Stellglieder.

Bei automatisierten Fertigungssystemen, insbesondere der Einzel- oder Kleinserien-Fertigung, sollten Meßschnitte nach Möglichkeit entfallen können, weshalb Kompensationssysteme anzustreben sind, die über längere Zeiträume entstehende Fehler kontinuierlich ausgleichen.

3.1 Verlagerung als Regelgröße

Stehen Meßgeräte zur Verfügung, die in der Lage sind, die Abmessungen des Werkstückes während des Schnittes unmittelbar hinter dem Werkzeug festzustellen, ergibt sich damit die Möglichkeit, eine Korrektur z. B. durch Nachstellen des Werkzeuges sofort wirksam werden zu lassen. Bei dem Verfahren mit dem Namen GAC (geometrical adaptive control)

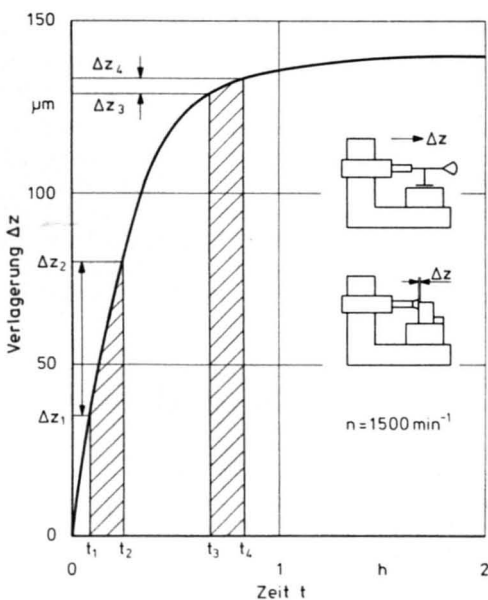


Bild 3. Einfluß des Zeitpunktes und der Dauer der Bearbeitung eines Werkstückes relativ zur Bearbeitungsdauer der Werkzeugmaschine, Beispiel: axiale Verlagerung an einem Bohr- und Fräswerk

befinden sich derartige relativ aufwendige Meßsysteme in der Entwicklung und konnten für das Drehen in Einzelfällen verwirklicht werden. Nachteilig wirkt sich bei dem Verfahren aus, daß erst eine bearbeitete Fläche vorhanden sein muß, damit die Messung und die Kompensation vorgenommen werden können. So besteht die Gefahr, daß der Anschnitt bereits außerhalb der Toleranzgrenze liegt, wenn der Verformungszustand der Deformationskette zu Beginn der Bearbeitung schon sehr groß ist.

3.2 Temperatur als Regelgröße

Ist es aus meßtechnischen oder verfahrenstechnischen Gründen entweder nicht möglich, oder zu aufwendig, vor oder während der Bearbeitung Verlagerungen zu messen, so kann versucht werden, fehlerproportionale Größen heranzuziehen. Bei thermisch bedingten Verformungen bietet sich dafür die Temperatur an. Wenn eine Temperatur als Regelgröße benutzt werden soll, müßte die Verlagerung der Enden der Deformationskette nur auf die Verformung des einen Bauteils zurückzuführen sein, dessen Temperatur gemessen wird. Da aber immer mehrere Bauteile erwärmt werden, ist eine vollkommene Kompensation so nicht zu erreichen. Die Größe der zulässigen Fehler ist dann dafür entscheidend, ob sich dieses vom meßtechnischen Aufwand her einfache Verfahren anwenden läßt. Die Erfassung mehrerer Bauteiltemperaturen im Sinne einer Steuerung wird unter 3.3 beschrieben. Zunächst soll gezeigt werden, welcher Erfolg sich mit einer Regelung der Öltemperatur erreichen läßt. Die Öltemperatur ist zwar keine Bauteiltemperatur, steht aber im Zusammenhang mit dem mittleren Erwärmungszustand der Maschine. Der Spindelkasten eines Waagrecht- Bohr- und Fräswerks ist zu diesem Zweck mit einer Ölkühlung ausgerüstet worden.

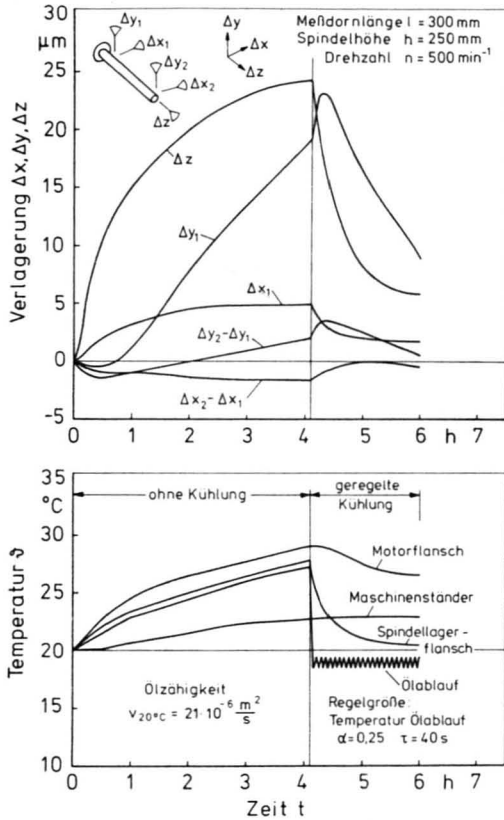


Bild 4. Sprungantworten der Regelstrecke (Werkzeugmaschine) bei einer Änderung der Störgröße (Drehzahl) und einer Änderung der Stellgröße (Kühlung)

Die Temperatur des aus der Werkzeugmaschine abfließenden Öls soll als Regelgröße benutzt werden (20°C), wobei das Kühlaggregat als Stellglied eingesetzt wird. Dieses Verfahren hat im Gegensatz zu einer Regelung der Zulauftemperatur den Vorteil einer automatischen Anpassung an die Wärmeerzeugung in der Maschine. Das Kühlöl sollte dabei in der Nähe der Wärmequellen zugeführt werden. Bei großer Verlustleistung, d. h. großer Wärmeerzeugung, wird die Temperatur des zufließenden Öls durch das Stellglied so lange erniedrigt, bis sich die Abflußtemperatur von 20°C ergibt. Bei stillstehender Maschine, d. h. keine Wärmeerzeugung, steigt die Zuflußtemperatur auch auf 20°C an, so daß keine Unterkühlung auftreten kann.

In Bild 4 sind die Verlagerungen und die Temperaturen des Bohr- und Fräswerkes unter dem Einfluß der Störwirkung (Spindeldrehzahl $n = 500 \text{ min}^{-1}$) und der Stellgröße (Ölkühlung) dargestellt. Die Verlagerungen in axialer und horizontaler Richtung Δz und Δx verlaufen nach einer Übergangsfunktion erster Ordnung, während die vertikale Verlagerung Δy aus der Überlagerung von zwei entgegengesetzt gerichteten Anteilen mit unterschiedlichem Zeitverhalten hervorgeht. Die nach kurzer Zeit abgeschlossene Verlagerung in negativer Richtung dürfte auf die Verformung des Spindelkasteninneren (das hintere Spindellager ist in einer Zwischenwand aufgenommen) zurückzuführen sein, die Verlagerung in positiver Richtung auf die Dehnung des Maschinenständers. In gleicher Weise wird die Neigung der Spindelachse beeinflusst, ersichtlich aus der Verlagerungsdifferenz $\Delta y_2 - \Delta y_1$. Beim Einschalten der Kühlung ergibt sich bei diesen beiden Verlagerungen zunächst ein weiteres Ansteigen wie bei einer Verzugszeit, während die axiale und die horizontale Verlagerung sofort zurückgehen.

Mit diesem einfachen Verfahren werden die Verlagerungen bereits sehr stark verringert, jedoch nicht zu Null. Diese Art der Kühlung hat pauschalen Charakter; ein proportionaler Zusammenhang zu einer der drei Verlagerungsrichtungen ist nicht zu erwarten.

Wenn eine Fertigungsaufgabe in einer bestimmten Richtung besonders geringe Abweichungen fordert, ergibt sich die Möglichkeit, eine Bauteiltemperatur als Regelgröße einzusetzen. In vielen Fällen liefert innerhalb der Deformationskette ein bestimmtes Bauteil den Hauptbeitrag zu der Verlagerung, so daß sich dieses Teil zur Temperaturmessung anbietet. Bei komplizierter geformten Werkzeugmaschinenbauteilen und der Wirkung mehrerer Wärmequellen ist im allgemeinen keine strenge Proportionalität mehr gegeben. Auf experimentellem Wege läßt sich prüfen, ob sich ein fester Zusammenhang zwischen einer bestimmten Verformung in einer Rich-

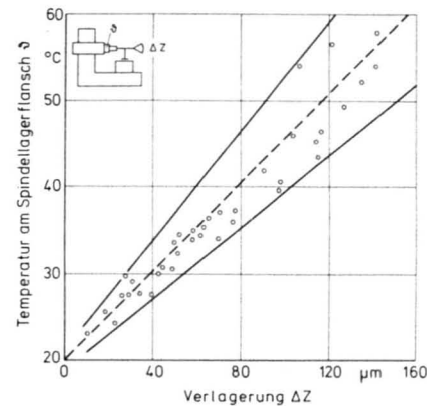


Bild 5. Temperatur am Spindellager in Abhängigkeit von der axialen Verlagerung bei verschiedenen Betriebsbedingungen

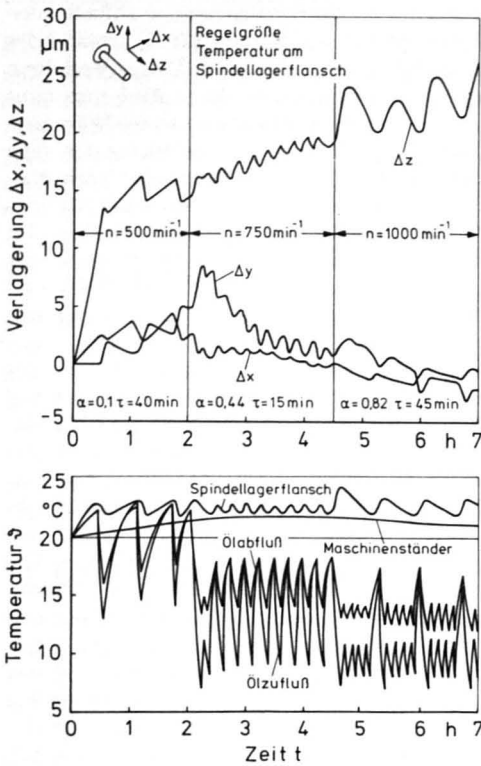


Bild 6. Temperatur- und Verlagerungsverlauf bei der Regelung der Temperatur am Spindellagerflansch (Einschaltverhältnis α , Zykluszeit τ)

tion und der Temperaturerhöhung, die an mehreren Orten probeweise gemessen wird, finden läßt. Für die Verwendbarkeit im praktischen Betrieb ist zu beachten, daß dieser Zusammenhang bei allen vorkommenden Betriebsbedingungen gelten muß. In Bild 5 ist die Verlagerung der Spindel des Bohr- und Fräswerks in axialer Richtung in Abhängigkeit von der Temperaturerhöhung am vorderen Spindellagerflansch aufgetragen. Die Meßpunkte stellen Verformungszustände zu verschiedenen Zeiten, bei verschiedenen Drehzahlen, bei Stillstand (Abkühlung) und bei interner Ölkühlung dar und sind deshalb nicht gesondert gekennzeichnet. Sie liegen in einem Streubereich, dessen Größe den Fehler angibt, der auftritt, wenn z. B. die Winkelhalbierende als Proportionalitätsgerade angenommen wird. Der Bereich läßt sich einengen, wenn für den Maschinentyp bekannt ist, bei welchen Betriebsbedingungen die Endbearbeitung, bei der die Genauigkeit gefordert wird, vorgenommen wird.

Die Temperatur am Spindellagerflansch des Bohrwerks ist als Regelgröße verwendet worden. In Bild 6 ist aufgetragen, wie sich die Verlagerungen und Temperaturen unter dem Einfluß verschiedener Betriebsbedingungen verhalten. In diesem Fall ist die Solltemperatur auf $22,5^\circ\text{C}$ eingestellt worden, weil erst hierbei die Kühlwirkung ausreichte. Dabei muß eine Anfangsverlagerung in Kauf genommen werden. Es ist zu ersehen, daß sich nach der Anlaufzeit trotz gleichbleibender Temperatur am Spindellager eine Verlagerung in axialer Richtung ergibt; der Grund liegt darin, daß der Zusammenhang zwischen beiden Größen nicht streng proportional ist. Außerdem ergeben sich auch Verlagerungen in den anderen beiden Achsrichtungen. Der Stellbereich der Kühlung bei dieser Solltemperatur reicht für den untersuchten Drehzahlbereich von $n = 500$ bis 1000 min^{-1} gerade aus, ersichtlich aus dem Einschaltverhältnis des verwendeten Zeitpunkt-Reglers.

Obwohl es nicht gelingt, die Verlagerungen konstant zu halten, ist deren zeitliche Änderung jedoch so gering, daß dieses

Verfahren für den praktischen Einsatz als geeignet angesehen werden kann.

3.3 Steuerung der Werkzeugkorrekturbewegung in Abhängigkeit von Temperaturen

Da die Verlagerung an der Wirkstelle meist durch mehr als nur ein Bauteil verursacht wird, wurde die Möglichkeit untersucht, durch Messen von Temperaturen an mehreren Orten und geeignete Mittelwertbildung zu einem Wert zu kommen, der mit ausreichender Genauigkeit der Verlagerung entspricht. In Abhängigkeit von diesem Wert soll dann das Werkzeug im Sinne einer Steuerung nachgestellt werden. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß der Einfluß verschiedener Wärmequellen erfaßt werden kann, daß die unterschiedlichen Zeitkonstanten der einzelnen Bauteile automatisch berücksichtigt werden und daß es sich mit geringem meßtechnischen Aufwand verwirklichen läßt. Allerdings sind die Maschinenstrukturen oft so komplex, daß man die Bauteile, die zu der Deformation beitragen, nicht immer einwandfrei identifizieren kann. Damit ist man auf experimentelle Untersuchungen an dem betreffenden Maschinentyp angewiesen. Trägt man die Temperaturen der gewählten Meßstellen in Abhängigkeit von der zu kompensierenden Verlagerung auf, so stellt man unterschiedlich gute Korrelationen fest. Der Grad der Annäherung dieser Korrelation wird durch das Bestimmtheitsmaß oder den Korrelationskoeffizienten beschrieben. Ist die Streuung der gemessenen Abhängigkeit zwischen einer Verlagerungskomponente und den betrachteten Temperaturänderungen gering, so strebt das Bestimmtheitsmaß dem Wert eins zu. Eine nach Maßgabe einer ausreichend guten Korrelationsfunktion arbeitende Steuerung für die Werkzeugkorrektur ist geeignet, in Abhängigkeit bestimmter Temperaturänderungen an der Werkzeugmaschine thermisch bedingte Verlagerungen zwischen Werkzeug und Werkstück zu kompensieren.

Die Wahl der Temperaturmeßorte sowie die Anzahl der Temperaturmeßstellen richtet sich dabei nach der Wirkung der einzelnen Wärmequellen. Während in sehr einfachen Fällen die Verlagerung mit Hilfe der Regressionsrechnung auf die Temperaturänderung in einem speziellen Bauteil ursächlich zurückgeführt werden kann, ist bei Zusammenwirken der Dehnungen und relativen Lageänderung mehrerer Maschinenteile im allgemeinen kein unmittelbarer Zusammenhang mehr erkennbar. Aus einer Anzahl von experimentell ermittelten Temperatur-Verlagerungsfunktionen müssen dann die Meßstellen so ausgewählt werden, daß sich möglichst gut korrelierende Verlagerungs-Temperaturfunktionen ergeben. Die Bilder 7 und 8 zeigen für eine untersuchte Drehmaschine die Abhängigkeit der axialen Spindelverlagerung Δz relativ zum Werkzeug von Temperaturen an verschiedenen Orten für einen Drehzahlbereich von $n = 82$ bis 4600 min^{-1} . Das Beispiel zeigt, daß der Zusammenhang zwischen der Verlagerungskomponente und der betrachteten Temperatur aufgrund der geringeren Streuung der Meßwerte und auch der günstigeren Steigung der Kurve bei der Temperaturmessung am Flansch des Axiallagers hinten für Kompensationszwecke besser geeignet ist, als bei der Messung der Temperatur in der Nähe des vorderen Radiallagers.

Wird die Funktion aus mehreren Temperaturen gebildet, muß eine multiple Korrelation durchgeführt werden. Auch hier ist die Höhe des Korrelationskoeffizienten ausschlaggebend. An einer mit 15 Temperaturmeßstellen versehenen NC-Drehmaschine wurde das Anwachsen des durch schrittweise, multiple Korrelation berechneten Bestimmtheitsmaßes in Abhängigkeit von der Anzahl beliebig gewählter Meßstellen beobachtet (Bild 9). Man erkennt, daß in diesem Fall bereits mit drei Temperaturverläufen (Meßstellen Nr. 1, 10 und 0) mit einem

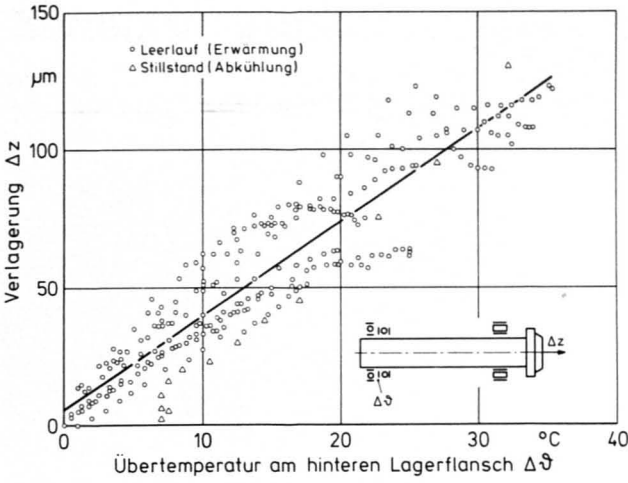


Bild 7. Relation zwischen axialer Spindelverlagerung und Übertemperatur am Festlagerflansch einer Drehmaschine für $n = 82$ bis 4600 min^{-1}

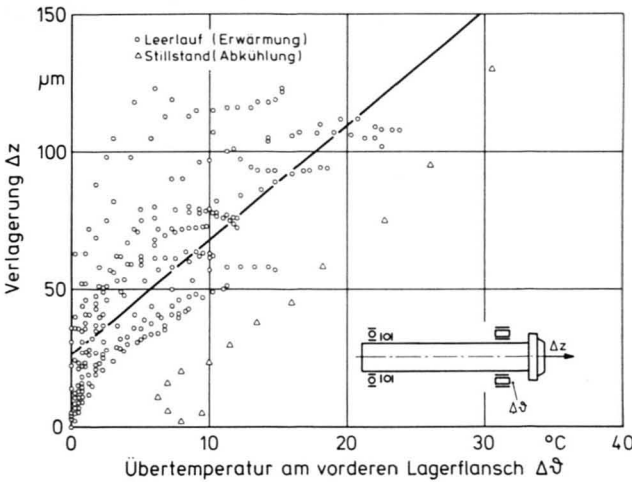


Bild 8. Relation zwischen axialer Spindelverlagerung und Übertemperatur am Loslagerflansch einer Drehmaschine für $n = 82$ bis 4600 min^{-1}

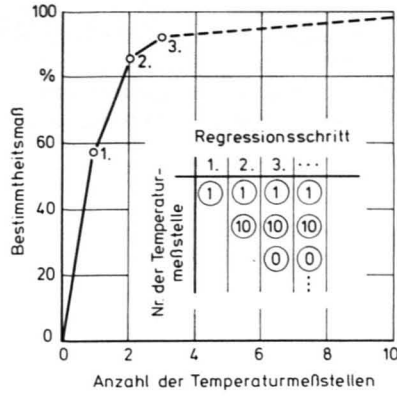


Bild 9. Bestimmtheitsmaß einer Approximation für die axiale Spindelverlagerung einer Drehmaschine mit drei Temperaturen als Variable

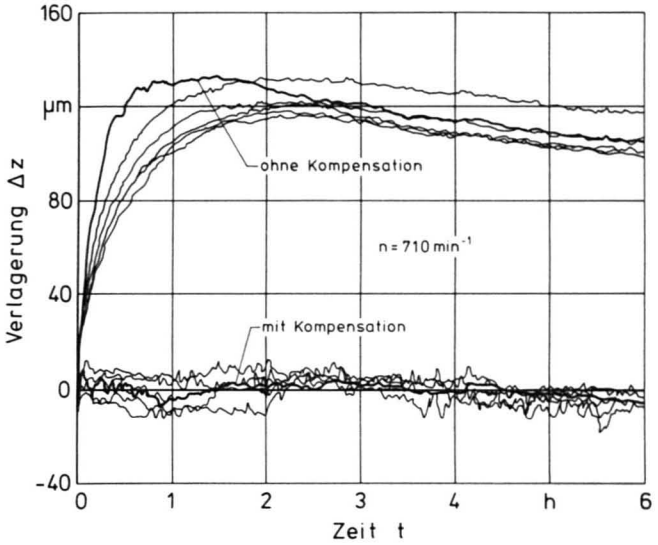


Bild 10. Axiale Spindelverlagerung einer Drehmaschine ohne und mit Kompensation

Bestimmtheitsmaß von etwa 96% eine gute Annäherung an den jeweiligen Wert der betrachteten Verlagerungsfunktion möglich ist. Die ermittelte Abhängigkeit $\Delta z = f(\Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_{10}, \Delta\vartheta_0)$ wurde als Programm geschrieben und in die Steuerung der Drehmaschine zur Werkzeugkorrektur eingegeben. Entsprechend der Änderung der gemessenen Temperaturen konnte dann das Werkzeug nachgeführt werden. Das Ergebnis ist für wiederholte Dauerversuche im Leerlaufbetrieb in Bild 10 aufgetragen worden. Die Restverlagerungen betragen über den gesamten Versuchszeitraum weniger als 10% der Verlagerung ohne Kompensation. Die im Diagramm dicker ausgeführte Kurve der Restverlagerung weist darüber hinaus gegenüber den dünneren Linien (theoretische Restverlagerungen) eine um den Betrag des Spiels von Werkzeugschlitten und Vorschubgetriebe geringere Abweichung von der Nulllage auf.

4 Zusammenfassung

Zur Vermeidung oder Verringerung von thermisch bedingten Fehlern an Werkstücken insbesondere bei automatischer Fertigung sind neben hier nicht behandelten Geometrical-Adaptive-Control-Systemen Verfahren angegeben, bei denen Tem-

peraturen als Ersatzgrößen zur Kompensation herangezogen werden:

- Für weniger aufwendige Verfahren bietet sich die Regelung von Temperaturen als Ersatzgröße an. Durch geregelte Kühlung der maßgeblich an der Verlagerung beteiligten Bauteile der Werkzeugmaschine kann der am Werkstück entstehende Fehler verringert werden. Am Beispiel eines Waagrecht-Bohr- und Fräswerks wurde die Wirkung der Ölkühlung des Spindelkastens als Stellgröße untersucht. Als Regelgröße dienten verschiedene Temperaturen. Die Regelung der Temperatur des aus dem Spindelkasten austretenden Öles bewirkte bereits eine starke Verringerung der Verlagerungen, obwohl ein proportionaler Zusammenhang zu einer der drei Verlagerungsrichtungen nicht gegeben war. Bei Regelung der Temperatur eines der Bauteile der Maschine (Temperatur am Festlagerflansch) auf eine konstante Größe konnte für verschiedene Betriebsbedingungen ebenfalls eine starke Verringerung der Spindelverlagerung in x- und y-Richtung erreicht werden.
- Die Kompensation der thermisch bedingten Relativverlagerungen zwischen Werkzeug und Werkstück kann auch durch eine in Abhängigkeit von gemessenen Temperaturänderungen

an der Werkzeugmaschine gesteuerte Werkzeugkorrekturbewegung erreicht werden. Untersuchungen an Drehmaschinen haben gezeigt, daß durch Nachführen des Werkzeugs in Abhängigkeit von nur drei Temperaturverläufen die relative Lageordnung zwischen Werkzeug und Werkstück nahezu konstant beibehalten werden konnte.

Literatur

1. *P. de Haas*: Möglichkeiten und Grenzen zur Kompensation thermischer Störeinflüsse bei automatischen Fertigungssystemen. ZWF 70 (1975) H. 7 S. 366–370
 2. *P. de Haas*: Thermisches Verhalten von Werkzeugmaschinen unter besonderer Berücksichtigung von Kompensationsmöglichkeiten. Berlin, Techn. Univ. Dr.-Ing. Diss. 1975
 3. *R. Ichimiya, K. Yokoyama, Y. Watanabe*: Experimental Study on Thermal Deformations of Machine Tool. Research Report of the Faculty of Engineering, No. 25, Niigata Univ. 1976
 4. *R. Ichimiya, U. Heisel*: Neue Möglichkeiten der Kompensation thermischer Störeinflüsse an Werkzeugmaschinen. ZWF 71 (1976) H. 10, S. 441–444
 5. *G. Spur, U. Heisel*: Automatic Compensation of Thermal Disturbances in Machine Tool. Proceedings of the 3rd I. C. P. E., Kyoto 1977, S. 119–122
 6. *K. Okushima, Y. Kakino, A. Higashimoto*: Kompensation thermischer Verschiebungen durch Korrektur des Koordinatensystems. Fertigung (1977) H. 6, S. 147–152
1299 A
-