

o. Prof. Dr.-Ing. G. Spur
 Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik TU Berlin

Ausgleich thermischer Deformationen durch pneumatisch erzeugte Werkzeugzustellung

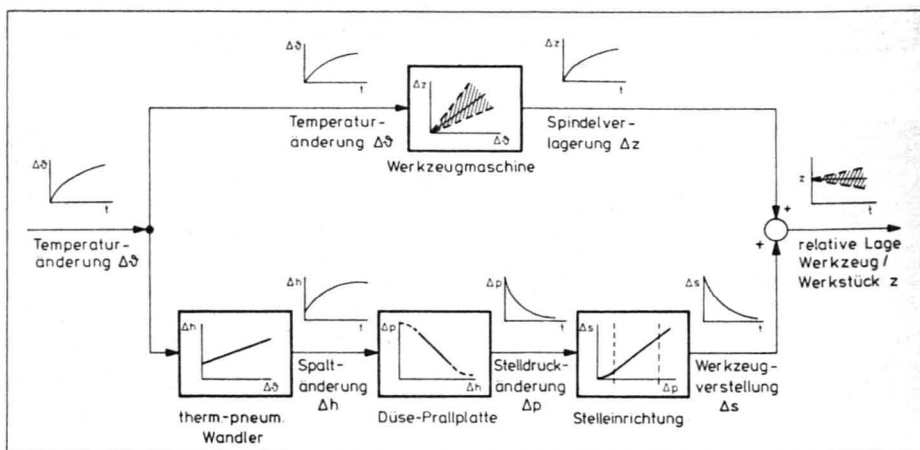
Dr.-Ing. U. Heisel

1. Einleitung

Thermisch verursachte Relativverlagerungen zwischen Werkzeug und Werkstück als Folge temperaturbedingter Deformationen haben neben dem am spanend gefertigten Werkstück durch Werkzeugverschleiß, Positionierfehler, statische Verformungen und Eigenspannungen im Werkstoff hervorgerufenen Fehlern großen Einfluß auf die Arbeitsgenauigkeit einer Werkzeugmaschine. Für den Ausgleich der Fehler, die sich am Werkstück als Maß-, Form- und Lagefehler abbilden, werden vorwiegend in der Massenfertigung Korrekturvorrichtungen angewandt, die nach dem Prinzip von Meßsteuerungen arbeiten. Hierbei wird das am gefertigten Werkstück auftretende Maß mit einer Meßvorrichtung erfaßt. Durch einen Soll-Istwert-Vergleich wird ein Korrekturwert ermittelt, der zum Ausgleich des Gesamtfehlers am nächsten zu fertigenden Werkstück dient [1]. Ist der zeitliche Verlauf des Störeinflusses derart, daß die Toleranzgrenzen während des letzten Schnittes überschritten werden können, so muß beispielsweise durch stetige Werkzeugzustellung bei der Bearbeitung für einen dauernden Fehlerausgleich gesorgt werden.

Für den Verlauf thermischer Deformationen an Werkzeugmaschinen sind Änderungen von 10 bis 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ unmittelbar nach Inbetriebnahme einer kalten Maschine nicht ungewöhnlich. Der thermische Beharrungszustand wird bei stetig bis auf Null abnehmender Verformungsgeschwindigkeit jedoch oft erst nach mehreren Stunden erreicht [2]. Bei wechselnden Betriebsbedingungen, insbesondere bei häufigen Drehzahländerungen, muß damit gerechnet werden, daß alle Fertigungsschritte im thermisch instationären Bereich der Maschine ausgeführt werden müssen. Bei großen Bearbeitungszeiten besteht damit die Möglichkeit einer durch thermische Störeinflüsse hervorgerufenen Überschreitung der zulässigen Toleranz.

Thermische Deformationen der Bauteile einer Maschine werden durch Verluste in der Werkzeugmaschine sowie durch äußere Einflüsse hervorgerufen. Die Auswirkungen der Maschinendeformationen an der Wirkstelle hängen daher mit den Temperaturänderungen zusammen, so daß experimentell die Abhängigkeit der



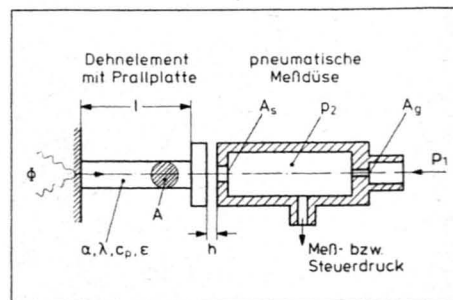
1 Blockschaltbild einer thermischen Kompensationssteuerkette für die pneumatisch erzeugte Werkzeugzustellung

Störbewegung in Zustellrichtung von einem bestimmten Temperaturgang an der Werkzeugmaschine ermittelt werden kann [3]. Die gesuchte Abhängigkeit muß reproduzierbar sein. Für eine untersuchte Drehmaschine wurde am Beispiel der axialen Spindelverlagerung relativ zum Werkzeugträger $\Delta z = 3,4 \mu\text{m}$ je Grad Temperaturänderung in unmittelbarer Nähe des Festlagers der Hauptspindel gemessen.

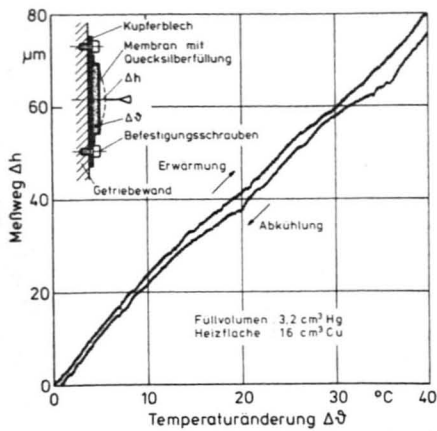
2. Steuereinrichtung für die temperaturabhängige Kompensation thermischer Deformationen

Das Steuergerät einer pneumatisch-hydraulischen Stelleinrichtung für die Maßkorrektur ist zu Versuchszwecken mit zwei parallel geschalteten Eingängen für pneumatische Meßsignale ausgerüstet worden. Ein Eingang ist für den Betrieb der Einrichtung mit geeigneten Meßfühler, die das Maß am gefertigten Werkstück erfassen können, vorgesehen. Der andere Meßeingang wird für die in Bild 1 dargestellte Steuerkette zu thermischen Kompensationszwecken verwandt. Sie besteht aus einem Wandler, der das Temperaturmeßsignal mit Hilfe eines Düse-

Prallplatten-Systems über eine Spaltänderung in einen proportionalen pneumatischen Stelldruck wandelt. Der Stelldruck wirkt auf den Meßeingang der Stelleinrichtung für die Werkzeugzustellung, so daß in Abhängigkeit vom Temperaturgang an einem bestimmten Ort der Werkzeugmaschine die Verlagerung in jeweils einer Koordinatenrichtung kompensiert werden kann. Der mit der Stelleinrichtung zu erzeugende Korrekturweg Δs muß betragsg-



2 Schema eines thermisch-pneumatischen Wandlers



3 Kennlinie eines thermisch-pneumatischen Wandlers

gleich, aber entgegengesetzt der jeweiligen Größe von Δz sein.

Am Meßeingang des pneumatischen Steuergerätes entspricht der Druckbereich von $p = 0,2$ bis $1,0$ bar einer linearen Zustellbewegung des Werkzeugs von $\Delta s = 0$ bis $200 \mu\text{m}$. Die Empfindlichkeit am Meßeingang für die temperaturabhängige Kompensation beträgt damit $E = 250 \mu\text{m}/\text{bar}$. Aus $|\Delta z|/E$ ergibt sich die Forderung, daß die Kennlinie des thermisch-pneumatischen Wandlers in dieser Kompensationssteuerkette eine Steigerung von $13,6 \text{ mbar}/^\circ\text{C}$ aufweisen muß.

3. Thermisch-pneumatischer Wandler

Das Prinzip des thermisch-pneumatischen Wandlers beruht auf einem Düse-Prallplatten-System, bei dem der Meßdruck in Abhängigkeit von der Spaltänderung proportional zur Temperatur ist [3]. Bild 2 zeigt in einer schematischen Darstellung die prinzipielle Funktionsweise. Ein in einen Luftstrom gebrachtes Hindernis verursacht einen Staudruck. Ändert sich die Spaltbreite h zwischen der pneumatischen Meßdüse und der Prallplatte, so hat dies eine Änderung des Staudruckes p_2 zur Folge. Der Stau- oder Meßkammerdruck ist sowohl von den für die Spaltänderung Δh maßgebenden physikalischen Größen des Dehnelements als auch von den für die pneumatische Meßdüse bestimmenden Kenngrößen abhängig.

Der Einfluß des Dehnelements ist durch die wärmetechnischen Stoffeigenschaften und geometrischen Bedingungen festgelegt. Insbesondere der lineare Ausdehnungskoeffizient α (bei Flüssigkeiten der kubische Ausdehnungskoeffizient β), die Wärmeleitfähigkeit λ , die spezifische Wärme c_p und das Emissionsvermögen ϵ des Dehnelements bestimmen die Spaltänderung Δh . Je größer α bzw. β und λ sind, desto größer wird Δh je Grad Temperaturänderung. Andererseits muß c_p bzw. die durch die geometrischen Größen wie A und l festgelegte Kapazität sowie ϵ möglichst klein sein, damit das Übergangsverhalten des Dehnelements keine großen Totzeiten aufweist.

Der Einfluß der Meßdüse ist durch den Druck p_1 der zuströmenden Luft, durch die Düsenquerschnitte A_1 und A_2 sowie durch die Strömungsverhältnisse in den Düsen und in dem Meßspalt bestimmt. Bei gleichbleibendem Druck p_1 ändert sich der Meßdruck p_2 mit den Querschnitten A_1 und A_2 der Düsen und den Ausfließzahlen α_1 und α_2 nach der Gleichung [4]:

$$p_2 \approx \frac{p_1}{1 + c^2}$$

Darin bedeutet c das Düsenverhältnis:

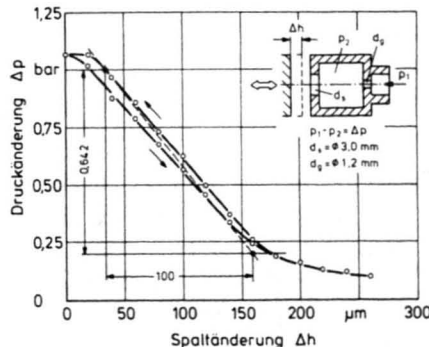
$$c = \frac{\alpha_1 \cdot A_2}{\alpha_2 \cdot A_1}$$

Die Düsenausfließzahlen α_1 und α_2 sind stets kleiner als eins. Das Verhältnis α_1/α_2 ist abhängig von der Gestalt der Düsenbohrungen und -ränder, der Rauigkeit der Düsenoberfläche und der Prallplatte, dem Verhältnis der Drücke vor und hinter den Düsen und von der Zähigkeit der durchströmenden Luft.

Die Kennlinie des temperaturabhängig betätigten Düse-Prallplatten-Systems ist der Kennlinie der Stelleinrichtung anzupassen. Im vorliegenden Fall wurden verschiedene Wandler eingesetzt. Sie bestehen aus Membrandosen, die mit Quecksilber bzw. mit Glycerin gefüllt sind. Die in Bild 3 gezeigte Kennlinie weist eine mittlere Steigung für die Erwärmung und die Abkühlung von $2,12 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ auf. Mit der angepaßten Kennlinie des Düse-Prallplatten-Systems (Bild 4) berechnet sich die geforderte Steigung für die Kennlinie des Wandlersystems zu $13,61 \text{ mbar}/^\circ\text{C}$.

4. Versuchsergebnisse

Um die Kompensationswirkung der beschriebenen Steuereinrichtung beurteilen zu können, wurde anstelle des Werkzeugs ein Meßtaster in der Stelleinrichtung befestigt. Das Meßsignal entspricht der Differenz zwischen der relativen Spindelverlagerung und der Stellbewegung als Restverlagerung. Gemessen wurde in Richtung der axialen Verlagerungskomponente der untersuchten Drehmaschine. Mit einem zweiten Meßtaster wurde die axiale Spindelverlagerung relativ zum Querschlitten der Maschine gemessen, so daß ein Vergleich der beiden Meßsignale die Beurteilung des erreichbaren Erfolgs der Kompensation zuläßt. Meßergebnisse sind für die Drehzahlen $n = 1000/\text{min}$ und $n = 2000/\text{min}$ in Bild 5 dargestellt. Die Versuche wurden im Leerlaufdauerbetrieb durchgeführt.



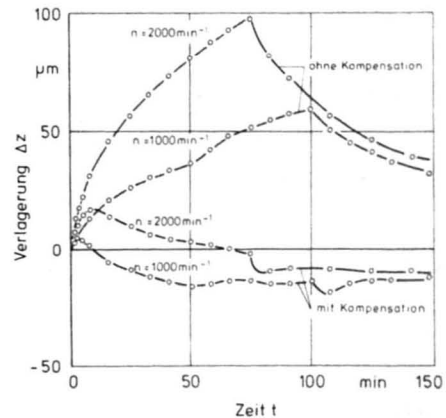
4 Kennlinie eines Düse-Prallplatten-Systems

In den dargestellten Kurven folgt die Restverlagerung zunächst der relativen Spindelverlagerung. In diesem Bereich findet noch keine Verlagerungskompensation statt. Der Grund dafür ist darin zu sehen, daß die Entfernung des Einbaortes von der Wärmequelle (Spindellager) und der Einfluß der Wärmekapazität des Wandlers als Totzeit wirken. Das nicht-

lineare Verhalten des Stellsystems im Bereich kleiner Stelldrücke führt ebenfalls zu einem verzögerten Ansprechen der Kompensationssteuerung. Diese Beobachtung kann analog für jede Änderung der Betriebsparameter, also auch beim Stillsetzen der Maschine nach einer bestimmten Betriebsdauer, gemacht werden. Um mit der beschriebenen Einrichtung dennoch gute Ergebnisse erzielen zu können, muß der thermisch-pneumatische Wandler möglichst unmittelbar an der Wärmequelle, für die die Steuerstrecke ausgelegt wurde, angebracht werden. Ist dies aus konstruktiven Gründen nicht möglich, können handelsübliche Wärmerohre mit hoher Wärmeleitfähigkeit als Verbindung zwischen der Wärmequelle und dem Wandler eingesetzt werden.

5. Zusammenfassung

Für den Ausgleich thermischer Relativverlagerungen wurde an einer Drehmaschine eine pneumatisch-hydraulische Stelleinrichtung eingesetzt. Die ausgeführte Steuerkette besteht aus einem thermisch-pneumatischen Wandler, mit dessen Hilfe eine Temperaturänderung an der Maschine in einen proportionalen pneumatischen Stelldruck für ein Korrektursystem umgewandelt wird. Der Druck wirkt auf den Meßeingang einer pneumatischen Stelleinrichtung für die Werkzeugzustellung, so daß temperaturabhängig Relativverlagerungen an der Wirkstelle kompensiert werden können. Vorausset-



5 Axiale Relativverlagerungen der Hauptspindel einer Drehmaschine

zung für die Funktionsfähigkeit der Einrichtung ist die Reproduzierbarkeit des ermittelten Zusammenhangs zwischen Verlagerung und Temperatur sowie ein verzögerungsfreies Verhalten des thermisch-pneumatischen Wandlers und der pneumatisch-hydraulischen Stelleinrichtung.

Schrifttum

1. Dannemann, W.; Eysel, D.: Pneumatische Sonderwerkzeuge für die spanende Fertigung. Maschinenmarkt 79 (1973) H. 16, S. 317-319.
2. Dencker, B.: Untersuchung des thermischen Verhaltens von Drehmaschinen unter besonderer Berücksichtigung ihrer konstruktiven Gestaltung. Berlin: Techn. Univ., Dissertation, 1968.
3. Heisel, U.: Ausgleich thermischer Deformationen an Werkzeugmaschinen. Produktionstechnik Berlin, Band 10. München, Wien: Hanser Verlag 1980.
4. Leineweber, P.: Taschenbuch der Längenmeßtechnik. Berlin: Springer-Verlag 1954.