

iwb-Seminar Mechatronik
Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
Garching, 21.09.2006

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen

S. Nestmann

1. Technologische Ausgangssituation
2. Ursachen für thermische Verformungen
3. Stand der Technik und Handlungsschwerpunkte
4. FEM-Modellierung und Simulation des thermischen Verhaltens
5. Experimentelle Eigenschaftsermittlung
6. Thermisches Verhalten von Komponenten
7. Kompensation
8. Zusammenfassung

nestmann / vertragwsppt / 21.09.06

Institutsleiter: Prof. Neugebauer



Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

Bild 1: Titel und Gliederung

1 Technologische Ausgangssituation

Als wichtige Trends bei den Zerspanungstechnologien haben sich in den letzten Jahren solche wie High Speed Cutting, Hartzerspanung, Trocken- und Komplettbearbeitung, High Performance Cutting sowie hybride Prozesse entwickelt. Jede dieser Technologien kann mehr oder weniger bestimmten Werkstückklassen zugeordnet werden: Z.B. High Performance Cutting wird speziell bei Integralbauteilen für Flugzeuge und bei gehäuseförmigen Teilen genutzt. Etwas weniger bei wellenförmigen Teilen. Trockenbearbeitung ist von einiger Wichtigkeit für alle drei Teilefamilien.

Alle Arten der Zerspanungstechnologien stellen spezielle Anforderungen an die Werkzeugmaschinen. High Performance Cutting erfordert eine Werkzeugmaschine mit starker Dynamik und Steife. Die Werkzeugmaschinen sollten ebenfalls ein gutes thermisches Verhalten haben. Führt man das High Performance Cutting als Trockenbearbeitung aus, ist höchste thermische Stabilität der Werkzeugmaschine erforderlich.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen

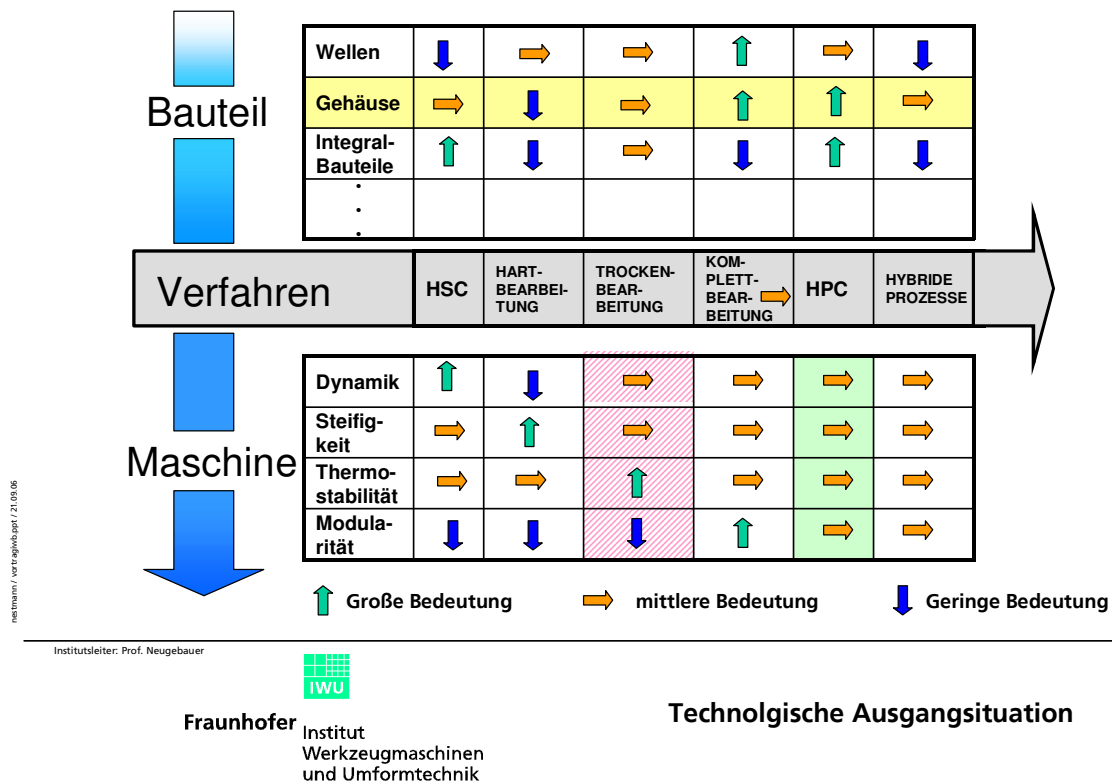


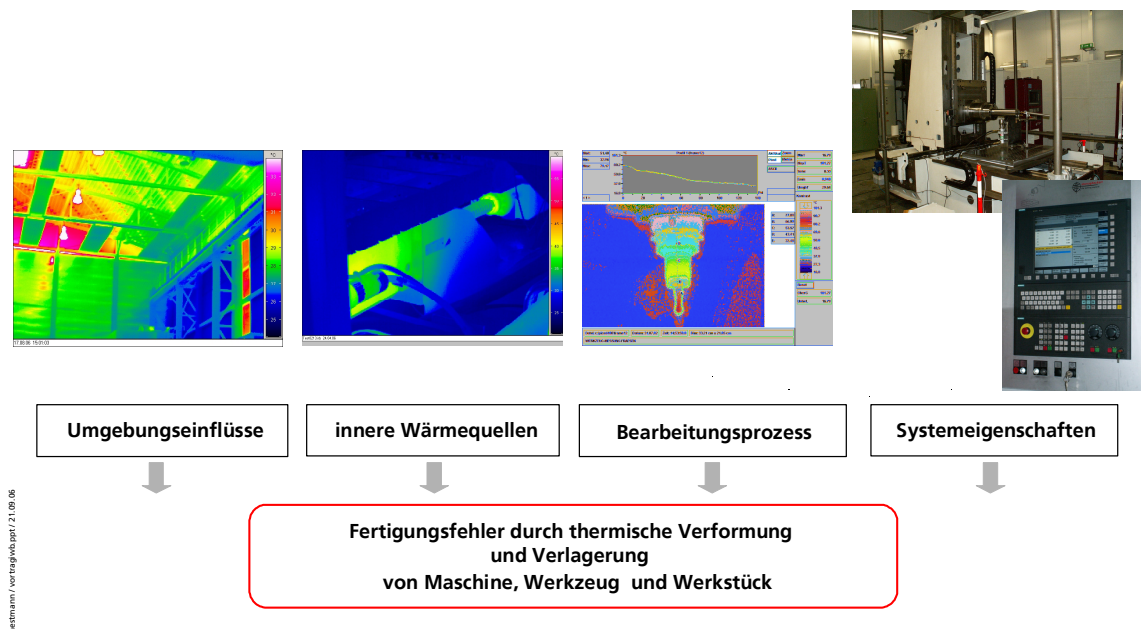
Bild 2: Technologische Ausgangssituation

2 Ursachen für thermisch bedingte Verformungen und Verlagerungen

Qualität und Fertigungsstabilität sind Maßstäbe zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Werkzeugmaschinen. Konkurrenzfähigkeit auf lange Sicht erfordert die Entwicklung von Maschinen für eine prozesssichere Teilefertigung mit immer engeren Toleranzen. Deutlicher Ausdruck dafür ist, dass sich die durchschnittlich zu realisierenden IT-Qualitäten des ISO-Toleranzsystems zu kleineren Toleranzen bewegen. Zu erwarten ist eine Erhöhung dieses Anteils, da weitere Kostensenkungen in der Einzelteilerfertigung, der Montage und dem Service zwingend erforderlich sind. Nach zahlreichen Untersuchungen fallen 25 bis 75% der Fertigungsfehlerbilanz auf thermisch bedingte Verlagerungen und Verformungen. Der thermische Zustand von Werkzeugmaschinen wird durch maschineninterne und externe Wärmequellen und Wärmesenken bestimmt. Innere Wärmequellen der Maschine sind Motoren, Getriebe, Lagerungen, Führungen und der Zerspanungsvorgang. Die Wärme entsteht hier durch elektrische Verlustleistung oder Reibung. Diese Wärmequellen wirken lokal auf die jeweiligen Elemente der Werkzeugmaschine ein. Innere Wärmequellen bedingen durch punktuelle Erwärmung eine örtlich begrenzte Verformung. Wärmesenken entstehen durch einen Wärmestrom von der Maschine zu einem Medium hin mit niedrigem Temperaturenniveau, wie z.B. dem fremdenergetisch gekühlten Kühlmittelstrom. Äußere Wärmequellen und Senken wirken durch Umgebungstemperatur- und Fundamenttemperaturänderungen, Konvektion sowie Strahlungseinflüsse. Aufgrund

der unterschiedlichen Temperaturänderungen kommt es zu unterschiedlichen Wärmedehnungen in der jeweiligen Baugruppe und von Baugruppe zu Baugruppe, was zu thermisch bedingten Verformungen und Verlagerungen der Gesamtstruktur der Maschine führt. Durch unterschiedliche Wärmekapazitäten infolge von unsymmetrischer Gestaltung der Bauteile verstärken sich diese Effekte. Die thermischen Fehler der Maschinen werden gemindert, indem man die Ursachen der thermischen Verformung verringert bzw. beseitigt oder die thermischen Verformungen in ihren Wirkrichtung beeinflusst. Es ist eine Vielzahl von Maßnahmen bekannt geworden, die das Ziel haben, das thermische Verhalten von Werkzeugmaschinen zu verbessern. Sie basieren alle auf den Erkenntnissen zum Wirkzusammenhang zwischen Erwärmung und Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschine. Sie lassen sich einteilen in konstruktive Maßnahmen und steuerungstechnische Kompensation.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



Institutsleiter: Prof. Neugebauer



Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

Ursachen für thermische Deformationen

Bild 3: Ursachen für thermisch bedingte Verformungen und Verlagerungen

3 Stand der Technik und Handlungsschwerpunkte

Modellierung und Simulation:

Häufig werden empirische Rechenmodelle zur Weiterverarbeitung der gewonnenen Messgrößen verwendet, die auf punktuellen Temperaturmessungen als Eingangsgröße aufbauen. Das Modell ist in der einfachsten Form ein lineares Polynom von einem oder mehreren Thermen. Für komplexere Ansätze werden als Modell nichtlineare Potenzfunktionen, Polynomansätze höherer Ordnung oder regelungstechnische Systeme verwendet. Mit experimentellen Untersuchungen des thermischen Verhaltens über den gesamten Bereich aller Einflussgrößen identifiziert

man die Parameter der empirischen Modelle.

Zur theoretischen Analyse des stationären Wärmeübertragungsverhaltens werden partielle Differentialgleichungen (Fourier-Gleichung) herangezogen, die nur für einfache Geometrien und Randbedingungen geschlossen lösbar sind. Ergebnisse für grundlegende Effekte können damit häufig an Ersatzmodellen gewonnen werden. Es sind Versuche der exakten Berechnung der Wärmespeicherung und -abgabe an einfachen Formelementen wie Zylindern und plattenförmigen Teilen zu verzeichnen. Zunehmend wird die Finite-Elemente-Methode mit entsprechenden Zusatz-Softwarepaketen auf der Basis wesentlich verbesserter Rechenleistungen von PCs zur Temperaturfeld- und daran anschließender Verformungsberechnung angewandt. Diese modernen Verfahren werden jedoch durch die Unsicherheit in der Erkenntnis der Randbedingungen in ihrer Genauigkeit eingeschränkt. Neben der komplexen geometrischen Gestalt der Komponenten entziehen sich insbesondere die Randbedingungen in Form des konvektiven Wärmeüberganges, der Strahlung und der Wärmeleitung in Fügestellen weitgehend einer analytischen Behandlung.

Für ein strukturbasiertes thermisches Zustandsmodell beschreibt man die Werkzeugmaschine und die Randbedingungen in Form eines diskreten Knotenpunktmodells. In elektroanaloger Betrachtungsweise wird die Wärmekapazität des Volumenelementes dem Knoten zugeordnet. Die Knotenverbindungen kennzeichnen die Wärmeübertragungsvorgänge. Unter der Annahme freier Wärmedehnung werden die Verformungen der Bauteile berechnet und daraus das Korrekturmodell abgeleitet. Die Methode ist jeweils auf eine konkrete Struktur einer Werkzeugmaschine bezogen.

Alternativ zur physikalischen Beschreibung des ganzheitlichen thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen mit komplexen nichtlinearen Modellen wird die Methode der Fuzzy-Logik für die Bestimmung der relativen thermischen Verlagerung angewendet. Nachteilig dabei ist, dass die Dynamik des thermischen Zustandes nicht berücksichtigt wird.

Ein neuerer Ansatz für die Thermokompensation ist der Einsatz Neuronaler Netze zur optimierten Bestimmung des Zusammenhanges zwischen Temperatur und Verlagerung. Durch das Anlernen eines Neuronalen Netzes wird ein geeigneter Kompensationsansatz bestimmt und die Zahl der Temperaturmessstellen auf die für eine Kompensation relevante reduziert. In der Trainingsphase wird ein Spektrum thermischer Einflüsse erzeugt. Mit den gemessenen Temperaturen und Verlagerungen wird das Netz trainiert, d.h. mit Hilfe eines Algorithmus werden die Zusammenhänge zwischen Temperaturen und Verlagerungen berechnet. Nachteilig ist, dass beim Auftreten von Einflüssen im späteren Serienbetrieb, die nicht trainiert worden sind, größere Fehler auftreten können.

Konstruktive Maßnahmen:

Konstruktive Maßnahmen beeinflussen die Gestalt der Maschine. Sie erfordern einen hohen Aufwand bei Änderungskonstruktionen. Sie mindern den thermischen Fehler der Maschine, indem sie die Ursachen der thermischen Verformungen verringern bzw. beseitigen oder die thermischen Verformungen in ihren Wirkrichtungen beeinflussen.

Die Wärmeentstehung in Lagern und Führungen lässt sich mindern, indem die Reibung in diesen Bauteilen gesenkt wird. Möglichkeiten zur Beeinflussung der Wärmeentwicklung sind die Auswahl der Bauart, die Schmierverhältnisse und die Qualität der Umbauteile. Für Hauptspindellagerungen haben sich Fett- und Öl-Minimalmengen-Schmierungen durchgesetzt, da diese eine geringe Wärmeentwicklung aufweisen und einen im Vergleich zur Öl-Kühlschmierung geringeren Dichtaufwand erfordern. Hybridlager, bei denen die Kugeln aus Keramik

bestehen, wurden zur Minderung der Reibverluste in Spindellagern entwickelt.

Der Wärmeeintrag in die Maschine kann konstruktiv durch die Auslagerung von Wärmequellen aus der Maschine und die Isolation von Wärmequellen gesenkt werden. Vorschläge zum Auslagern von Aggregaten aus der Maschine lassen sich relativ einfach realisieren. Die Kosten für die Stellflächen begrenzen jedoch die Einsatzmöglichkeiten für diesen Vorschlag. Aus diesem Grund kommt der Isolation von Wärmequellen eine hohe Bedeutung zu. Das schnelle Entfernen warmer Späne durch schräge oder senkrechte Maschinenbetten und eine Isolierung der Späne gegen die Maschinenstruktur mittels Abdeckungen haben sich in der Praxis bereits durchgesetzt.

Durch einen thermosymmetrischen Maschinenaufbau, kurze thermische Dehnlängen und die Anordnung der Wärmequellen in einer Art, dass sie keinen Einfluss auf die Verlagerung an der Wirkstelle haben, lassen sich die thermisch bedingten Relativbewegungen zwischen Werkstück und Werkzeug minimieren. Da die Gestalt der Werkzeugmaschine maßgeblich durch die Fertigungsaufgabe bestimmt wird und konstruktive Gestaltänderungen auch Einfluss auf das statische und dynamische Verhalten der Maschine haben, sind diesen Vorschlägen Grenzen gesetzt.

Eine Beeinflussung der Wärmeabfuhr kann konstruktiv durch die Variation von Wandstärken, die Nutzung von Kühlrippen, und den Einsatz von Wärmerohren erreicht werden.

Werkstoff:

Der Einsatz von Werkstoffen mit günstigeren thermischen Eigenschaften als Grauguss und Stahl wird zur Reduzierung von thermisch bedingten Verformungen an Werkzeugmaschinen genutzt. Zement- und Polymerbeton wurde als Werkstoff für Gestellbauteile untersucht, weil diese Materialien ein sehr gutes Dämpfungsverhalten und eine hohe dynamische Steife aufweisen. Die geringe Wärmeleitfähigkeit von Beton bedingt eine hohe thermische Trägheit der Gestellbauteile, was diese unempfindlicher gegen Schwankungen der Umgebungstemperatur macht. Die teilweise größeren Wärmedehnungen an Orten der Wärmeeinleitung können durch Verbundkonstruktionen gemindert werden. Keramik und faserverstärkte Kunststoffe (FVK) besitzen eine geringe Wärmedehnung und eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Sie werden in der Raumfahrttechnik und im Kraftfahrzeugbau als Konstruktionswerkstoff bereits verwendet. Untersuchungen zum Einsatz von Keramik und karbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) als Werkstoffe für Hauptspindeln von Werkzeugmaschinen wurden unter Laborbedingungen durchgeführt.

Beton, Keramik und FVK erfordern eine werkstoffgerechte Konstruktion. Beton und Keramik können nur geringe Zugspannungen aufnehmen und müssen daher gegen zu hohe Zugbelastungen gesichert werden. FVK besitzen eine relativ weiche Oberfläche und ein anisotropes Werkstoffverhalten. Es sind daher spezielle Krafteinleitungselemente an den Kontaktflächen zu anderen Bauteilen nötig. Aufgrund der werkstoffgerechten Konstruktion und der relativ hohen Materialkosten für diese Materialien entstehen in jedem Fall Mehrkosten im Vergleich zu Grauguss und Stahl. Wegen ihrer günstigen thermischen Werkstoffeigenschaften wird der Einsatz dieser Werkstoffe an Werkzeugmaschinen trotzdem zunehmen.

Temperierung:

Die Temperierung dient der thermischen Stabilisierung von Maschinen oder Maschinenelementen. Mit ihr lassen sich thermische Verformungen vermeiden oder auf einem geringen Niveau konstant halten. Bei Maschinen werden oft die vielfältigsten Baugruppen mit hohem energetischen und apparativen Aufwand

temperiert.

Kühlmaßnahmen dienen einer gezielten Wärmeabfuhr. Sie verringern den Wärmeeintrag in die Maschine (Kühlung von Wärmequellen) und senken Temperaturdifferenzen innerhalb der Maschine (Kühlung von Gestellbauteilen). Hierbei übersteigt die durch eine erzwungene Konvektion abgegebene Wärme die durch freie Konvektion abzugebende Wärme um ein vielfaches. Eine weitere Steigerung des Wärmeüberganges zwischen dem Kühlmedium und dem zu kühlenden Bauteil kann erreicht werden, wenn eine Flüssigkeitskühlung verwendet wird.

Die Rückkühlung von Betriebsmedien erhöht die Abfuhr von Reibungswärme aus Führungen, Lagerungen und hydraulischen Einrichtungen. Mit ihr lässt sich eine allgemeine Absenkung des Temperaturniveaus einer Werkzeugmaschine erreichen. Dabei kommen Öl-Luftkühler oder Kältemaschinen zum Einsatz. Öl-Luftkühler sind kostengünstiger, besitzen aber eine Anlaufzeit bis zum Erreichen eines Beharrungszustandes im Medium. Durch den Einsatz einer Kältemaschine lässt sich die Anlaufzeit vermeiden.

Kühlmaßnahmen werden hauptsächlich für die Spindellager und für den Spindelkasten beschrieben. Sie dienen der Ableitung der Reibungswärme, die in den Lagerungen erzeugt wird. Es finden sich aber auch Hinweise auf die Kühlung von Vorschubantrieben und Getrieben. Als Kühlmedien kommen Öl, Wasser und Luft zum Einsatz. Die Ölkühlungen basieren meist auf separaten Kühlkreisläufen, in denen das Öl geregelt rückgekühlt wird. Als Regelgrößen werden Umgebungstemperatur und Gestelltemperatur bevorzugt, um Temperaturgradienten zu vermeiden. Neben der Flüssigkeitskühlung wurden in einigen Fällen auch Peltierelemente zur Kühlung verwendet.

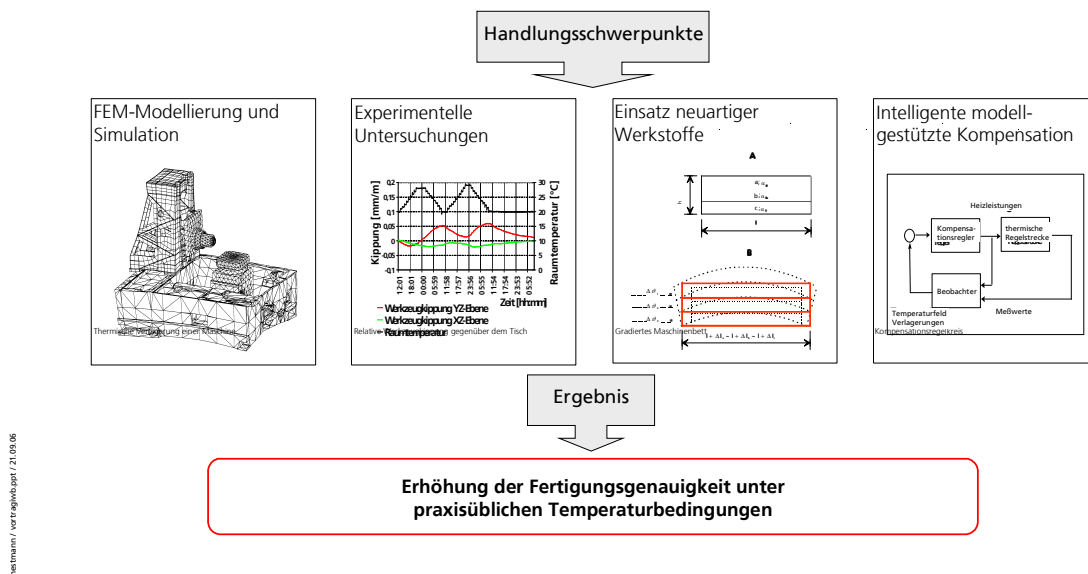
Kompensation:

Auf der Basis direkt gemessener Längen oder mit Ersatz-Messgrößen (z.B. Temperaturen) und entsprechenden implementierten Modellen können mit Hilfe der Wegmeßsysteme nur achsparallele Maßfehler im kartesischen Koordinatensystem als Weg-Offset kompensiert werden. Zur Kompensation der Kippungen von Baugruppen müssen aufwendige NC-Rundachsen oder Kippelemente mit geregelter Aktorik (z.B. Schrittmotore, piezoelektrische Aktoren) eingesetzt werden.

Handlungsschwerpunkte:

- Verbesserung der Genauigkeit der präventiven Ermittlung des thermischen Verhaltens mittels FEM,
- Ganzheitliche experimentelle Untersuchung des thermischen Verhaltens mit modernen Messmethoden unter variablen, praxisnahen und reproduzierbaren thermischen Lasten,
- Einsatz von neuen Materialstrukturen und intelligenten Materialien als Maschinengestellwerkstoff,
- Anwendung von intelligenten modellgestützten Algorithmen zur Kompensation von thermischen Verformungen und Verlagerungen,
- Implementierung von Kompensationsalgorithmen für die thermische Verlagerung in den NC-Steuerungskern unter Einbeziehung von Verfahrenswegen und Werkzeuglängen.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



nestmann / vertragwapp / 21.08.06

Institutsleiter: Prof. Neugebauer



Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

Stand der Technik und Handlungsschwerpunkte

Bild 4: Stand der Technik und Handlungsschwerpunkte

4 FEM-Modellierung und Simulation des thermischen Verhaltens

Es ist bereits in der Entwicklungsphase von Interesse, den Einfluss verschiedener thermische Randbedingungen auf die Arbeitsgenauigkeit zu kennen. Die Wärmeeinbringung in die Maschinenstruktur kann in Umgebungseinflüsse und maschineninterne Einflüsse untergliedert werden.

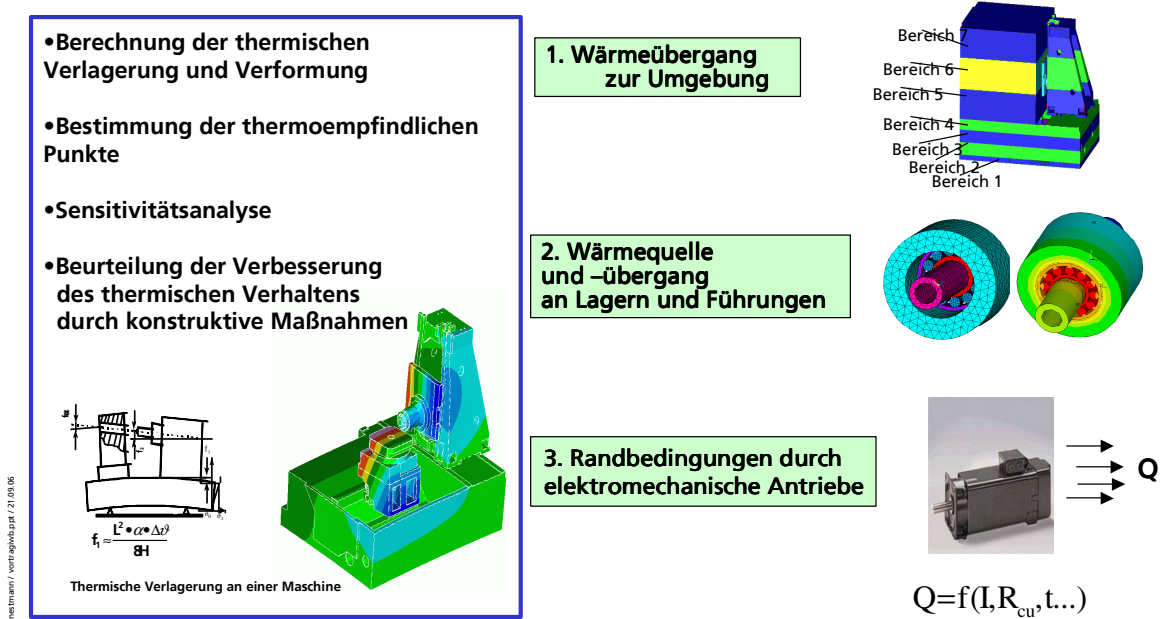
Der Einsatz leistungsfähiger Entwicklungswerkzeuge gestattet heute eine Untersuchung der Maschineneigenschaften an Datenmodellen in Form von Simulationen. Nachdem vorwiegend statische und dynamische Simulationen immer weiter verfeinert wurden und gezielte Maßnahmen in der Konstruktion Berücksichtigungen finden konnten, rückt eine exakte thermische Simulation in das Blickfeld. Vorwiegend wird hier die Finite-Elemente-Methode angewandt. Maschinenstrukturen sind in der Regel kompliziert und bestehen aus mehreren Baugruppen. Für eine zuverlässige Simulation des Wärmegangs einer Werkzeugmaschine ist es eine wichtige Voraussetzung, Rand- und Übergangsbedingungen zu definieren. Im Gegensatz zur statischen oder dynamischen Simulation, die derzeit wesentlich besser beherrscht werden, existieren für viele der erforderlichen physikalischen Eingangsgrößen und Parameter einer thermischen Simulation nur unzureichende Daten. Es ist deshalb erforderlich:

- Ermittlung einflussreicher Parameter auf die Simulationsergebnisse (speziell für das Wärmeübertragungsverhalten zwischen durch Fugen getrennten Bauteilen und die Temperaturschichtung im Raum) durch Empfindlichkeitsanalysen am FEM-Modell.

- Parameteridentifikation für das Übertragungsverhalten zwischen den durch Fugen getrennten Baugruppen unter Verwendung von Optimierungsalgorithmen.
- Ermittlung des nichtlinearen Übertragungsverhaltens zwischen den verschiedenen Temperaturschichten im Raum und den Grenzflächen der Werkzeugmaschine.
- Erweiterung bisheriger Modellierungskonzepte um weitere Simulationsbausteine, die eine Berücksichtigung der wesentlichen Wärmequellen (beispielsweise Kugelgewindetriebe, Antriebe)

Aufgrund der inzwischen leistungsfähigen Rechentechnik und numerischen Stabilität der Solver ist es nicht mehr zwingend erforderlich, zwischen quasistationären und instationären Zuständen zu unterscheiden.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



Institutsleiter: Prof. Neugebauer



Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

FEM-Modellierung und Simulation
des thermischen Verhaltens

Bild 5: FEM-Modellierung und Simulation des thermischen Verhaltens

5 Thermozelle

Für die Untersuchungen wird die Thermozelle des IWU benutzt. Die Thermozelle mit den Abmessungen $11 \times 8 \times 5 \text{ m}^3$ besteht aus doppelschaligen Strahlblechwänden mit innenliegender Isolationsschicht. Die Luft strömt mit einer Geschwindigkeit $< 0,4 \text{ m/s}$ durch jeweils an den Längsseiten angebrachten großflächigen Quellluftauslässen in die Zelle und wird über im Deckenbereich platzierte Abluftgitter abgesaugt. Der Durchsatz beträgt ca. $20.000 \text{ m}^3/\text{h}$, d.h. die Luft wird ca. 45 mal pro Stunde mit einem Mindestfrischluftzusatz von 10 % komplett ausgetauscht. Innerhalb der Zelle befindet sich zum Aufstellen der Maschine ein Fundamentblock aus armiertem Stahlbeton von $8 \times 5 \times 1 \text{ m}^3$, der in seiner Struktur annähernd den Empfehlungen von Maschinenherstellern zur Maschinenfundamentierung entspricht. Dieser ist durch zwei Wasserkreisläufe in zwei Ebenen temperierbar und kann

mittels Luftfedern zur Schwingungsisololation angehoben werden. Für beide Systeme besteht die Möglichkeit, die Temperatur in einem Bereich von 10 °C bis 40 °C, auch als Funktion der Zeit, zu regeln. Die Ist-Temperatur wird im Raum an 30 Messpunkten und im Fundament an 25 Messpunkten gemessen. Die zulässige Abweichung von der programmierten Solltemperatur beträgt über alle Messpunkte maximal ± 1 K. Die thermozellenspezifische Steuer- und Regelungstechnik besteht aus einer vollgrafischen Leitstation, einem zentralen Netzwerkprozessor und digitalen Anlagereglern. Mittels der Leitstation erfolgt die Programmierung, Meldung und Anzeige der Datenpunkte sowie die Datensicherung.

Als thermozellenzugehörige Temperaturfühler sind PT1000-Messwiderstände in der Raumzelle und im Fundament installiert. 30 Raumtemperaturmesspunkte sind zu je 10 Stück an verrückbaren Ständern befestigt. Als Führungsgröße für die Regelung der Raumtemperatur kann der Mittelwert der Temperaturfühler je Ständer in verschiedenen Höhen ausgewählt werden. Am Fundament sind nur die Oberflächentemperaturfühler als Einzelmessfühler und in einem punktuellen Raster angeordnet. In den unteren Fundamentebenen liegen mittelwertbildende Messketten mit 9 Temperaturfühlern an jedem Messpunkt quer durch den Fundamentblock.

Zur Steuerung sowie Messwerterfassung und Archivierung der Temperaturmesswerte dienen die vollgrafische Leitstation der Thermozelle in Verbindung mit deren zentralen Netzwerkprozessor für die Raum- und Fundamenttemperaturen.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



Technische Daten

-Außenmaße der Thermozelle

Länge	11,00 m
Breite	7,45 m
Höhe	5,00 m

-Fundamentblock

Länge	8,15 m
Breite	5,10 m
Höhe	1,00 m

Parameter für Innenraum

-Lufttemperatur (Zulässige Abweichung ± 1 K zwischen allen Meßpunkten, als Funktion der Zeit regelbar)	10°C bis 40°C
-relative Luftfeuchtigkeit	35% bis 65%
-maximaler Zuluftstrom (bis zu 90% Umluft, Wärmerückgewinnung)	20.000 m³/h
-Quelluftgeschwindigkeit über großflächige Ausströmöffnungen	max. 0,4 m/s
-Messung der Lufttemperatur in 10 Ebenen zu je 3 Meßfühlern	

nestmann / vortragwettbewerb / 21.09.06

Institutsleiter: Prof. Neugebauer



Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

Experimentelle Eigenschaftsermittlung
Thermozelle

Bild 6: Thermozelle

6 Verformungs- und Verlagerungsmessung

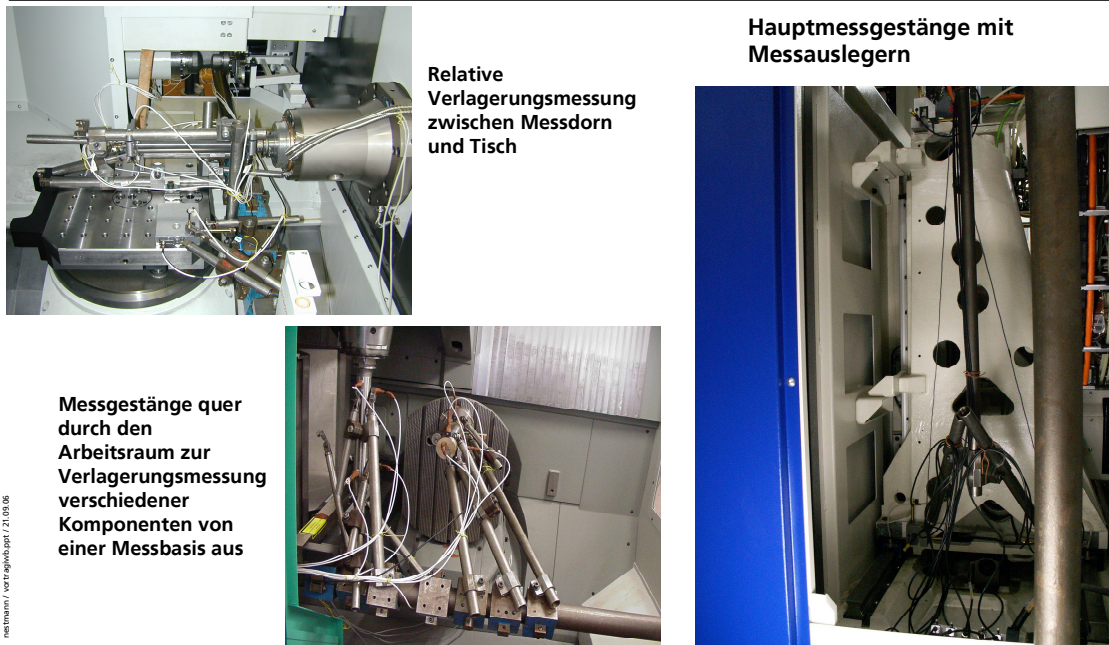
Die Messung der Verformungen und Verlagerungen des Maschinengestells erfolgt relativ gegen ein „thermisch verformungsarmes“ Messgestänge mit berührenden, induktiven Wegaufnehmer in allen drei Achsrichtungen. Als Anlagepunkte für die Wegaufnehmer an den Baugruppen dienen geschliffene Flächen an aufgeklebten Klötzchen, die rechtwinklig zur Achs- und damit gleichzeitig zur Messrichtung liegen. Zur Messung der Verlagerung von rotierenden Messdornen in X-, Y- und Z-Richtung, die in der Hauptspindel eingespannt sind, relativ gegen das Messgestänge und gegen den Tisch kommen induktive berührungslose Wirbelstromaufnehmer zum Einsatz. Als Messflächen für die berührungslosen Aufnehmer dienen die Außendurchmesser bzw. die Stirnfläche des Messdorns. Bei den Zerspanungsversuchen wird der Außendurchmesser der Werkzeugaufnahme und die Stirnfläche der Spindelnase genutzt.

Das Haupt-Messgestänge als Träger der Wegaufnehmer „umhüllt“ die Maschine für die Messungen. Die Messung der Verlagerungen des Gestells erfolgt über die an das Basisgestänge angeordneten Messausleger auf der Seite der Maschine. Eventuell mögliche Neigungsänderung vom Messgestänge werden mit elektronischen Neigungsmessgeräten zur Kontrolle mit gemessen.

Weitere Hauptstangen, von der aus die Verlagerung von Maschinenkomponenten gemessen werden kann, können quer durch den Arbeitsraum gezogen werden und tragen Wegaufnehmer mit einer gemeinsamen Messbasis, die direkt im Arbeitsraum angeordnet sind.

Zur Messwerterfassung und Archivierung der Temperatur-, Weg- und Neigungsmesswerte dienen ein rechnergesteuertes Vielstellenmesssystem UPM 100 mit entsprechender Software.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



Institutsleiter: Prof. Neugebauer



Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

Experimentelle Eigenschaftsermittlung
Verformungs- und Verlagerungsmessung

Bild 7: Verformungs- und Verlagerungsmessung

7 Thermographie

Zur punktuellen Temperaturmessung am Gestell der Maschine steht im IWU neben Pt100-Messwiderstände eine moderne Thermokamera zur Verfügung. Die Thermokamera, die generell zur Erfassung von Temperaturen von Gegenständen eingesetzt wird, bietet neben der Möglichkeit der berührungslosen Messung bei hoher Genauigkeit weiterhin den Vorteil, dass auch noch im Nachgang der Messung jeder beliebige Punkt am gemessenen Objekt untersucht werden kann. Weiterhin ist es möglich, eine hohe Anzahl von Messpunkten zu bestimmen, was bei anderen Messverfahren oft stark eingeschränkt ist.

Einsatzgebiete

Thermische Untersuchungen im Temperaturbereich 0 °C bis 300 °C:

- Maschinen, Baugruppen, Bauteilen,
- Prozessen (Spanende Bearbeitung, Biegen, Tiefziehen),
- Impulsthermografie zur Erkennung von verdeckten Werkstofffehlern.

Thermische Untersuchungen im Temperaturbereich 300 °C bis 900 °C:

- Messungen bei Halbwarmumformung,
- Wärmeeintrag/Verläufe bei Schweißuntersuchungen,
- Messung dynamischer Vorgänge bei Zerspanungsprozessen Schleifen, Drehen, Fräsen,
- Abkühlprozesse für Blechumformungen.

Thermische Untersuchungen im Temperaturbereich 600 °C bis 1500 °C:

- Messungen im Ofeninneren bei Warmumformung,
- Messungen bei induktiver Erwärmung.

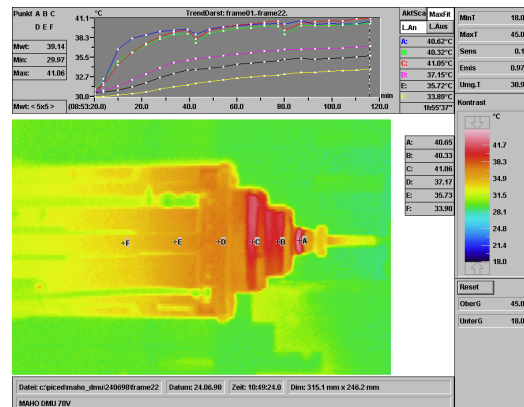
Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen

Echtzeit-Thermografiesystem CEDIP JADE MWIR



Spektralbereich	3,7 bis 5,1 μm
Messbarer Temperaturbereich	0 °C bis 1.500 °C
Temperaturauflösung physikalisch NETD	< 20 mK bei 25 °C
Temperaturauflösung digital	Mind. 14 bit
Bildpunkte horizontal x vertikal	320 x 240
Integrationszeit	0,010 bis 10 msec
Vollbildfrequenz	170 Hz
Teilbildmodus	Ja
SnapShot-Modus	Ja
Kühlung	Stirling-Kühler
Online-Bildspeicherung	Ja

nestmann / vertragsgewapp / 21.01.06



Temperaturen an Hauptspindel und
Umbauteil

Institutsleiter: Prof. Neugebauer



Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

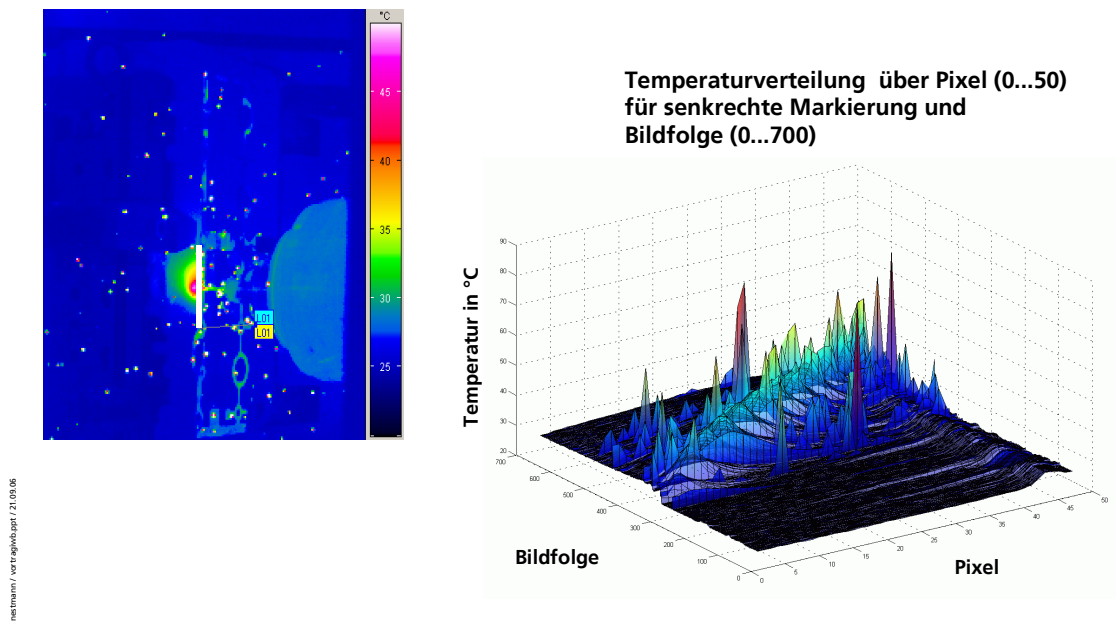
Experimentelle Eigenschaftsermittlung
Thermographie

Bild 8: Thermokamera

8 Wärmeeintrag durch den Fertigungsprozess

Um die aus dem Zerspanungsvorgang heraus entstehende Erwärmung eines Werkstückes aus dem Werkstoff AlSi9Cu3 zu untersuchen, wurden nacheinander zwölf Löcher (25 mm tief) mit einem Spiralbohrer (Durchmesser 3,5 mm mit einer Drehzahl von $n = 14500$ 1/min und einer Vorschubgeschwindigkeit von $s = 2300$ mm/min auf eine Länge von 80 mm in gleichmäßigen Abständen von 6 mm gebohrt. Die thermographische Aufnahme mit dem Echtzeit-Thermographiesystem des IWU zeigt das Werkstück, den Bohrer mit Futter und die Hauptspindel bei einem der Bohrvorgänge. Die weiße Linie repräsentiert die Wegstrecke von 80 mm und kann im 3-D-Diagramm den 50 Pixeln zugeordnet werden. Die Bildfolge mit 700 Bilder repräsentiert den Prozessverlauf mit einer gewissen Vor- und Nachlaufzeit. Das Diagramm weist aus, dass eine Erwärmung des Werkstückes erfolgt, die an der Oberfläche mit bis zu 40 °C zu detektieren ist. Diese Maximaltemperatur baut sich wie eine „Bugwelle“ mit fortschreitendem Prozess auf. Höhere Spitzenwerte bis 70 °C resultieren aus der aufgenommenen Temperatur fliegender Späne.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



Institutsleiter: Prof. Neugebauer

Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

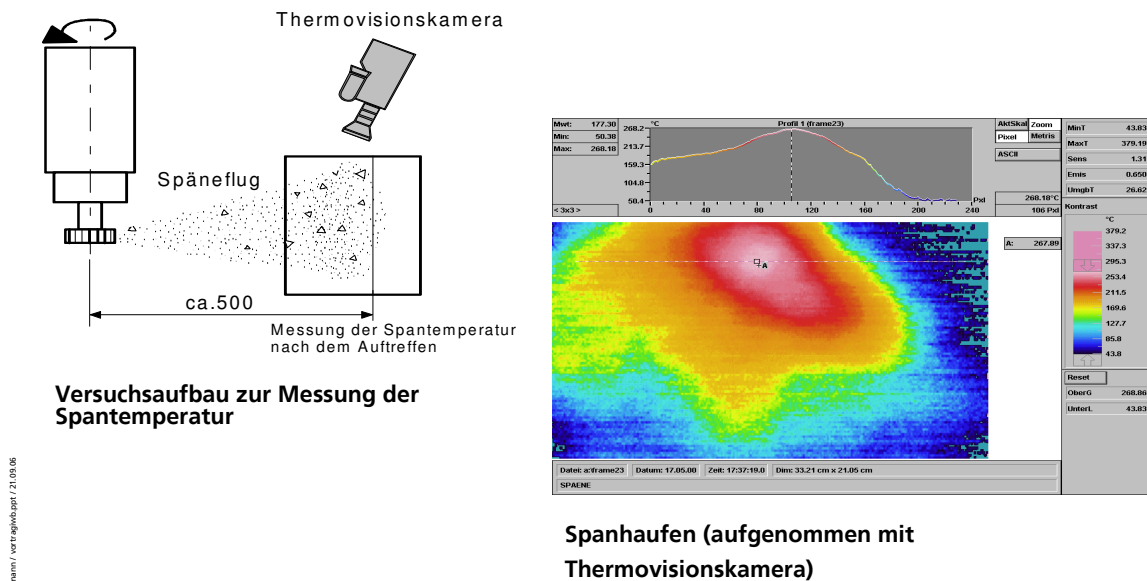
**Thermisches Verhalten von Komponenten
Fertigungsprozess**

Bild 9: Fertigungsprozess

9 Wärme der Späne

Zur Ermittlung der Temperatur sich ablagernder Späne in Abhängigkeit der Entfernung von der Zerspanungsstelle sind am IWU Versuche durchgeführt worden. In einer Entfernung von ca. 500 mm zur Zerspanungsstelle wurden die Späne aufgefangen und deren Temperatur zu diesem Zeitpunkt mit einer Thermovisionskamera gemessen. Für die Schnittgeschwindigkeit und die Vorschubgeschwindigkeit wurden für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung typische Werte eingestellt ($v_c = 500 - 550$ m/min; $v_f = 1,4 - 3,1$ m/min). Die Schnittbreite betrug 2 mm und der Arbeitseingriff 10 mm. Mit diesem Versuch wurden ca. 350 °C für sich ablagernde Späne ermittelt.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



Institutsleiter: Prof. Neugebauer

Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

Thermisches Verhalten von Komponenten
Späne

Bild 10: Wärme der Späne

10 Späneabfuhr durch Luftströmungen

Die Entwicklungen der letzten Jahre zeigen, dass die Trockenbearbeitung und die Quasitrockenbearbeitung sich mehr und mehr durchsetzen. Experten haben eingeschätzt, dass 2004 25 % der spanenden Bearbeitungsprozesse durch die Trocken- bzw. Quasitrockenbearbeitung erfolgen.

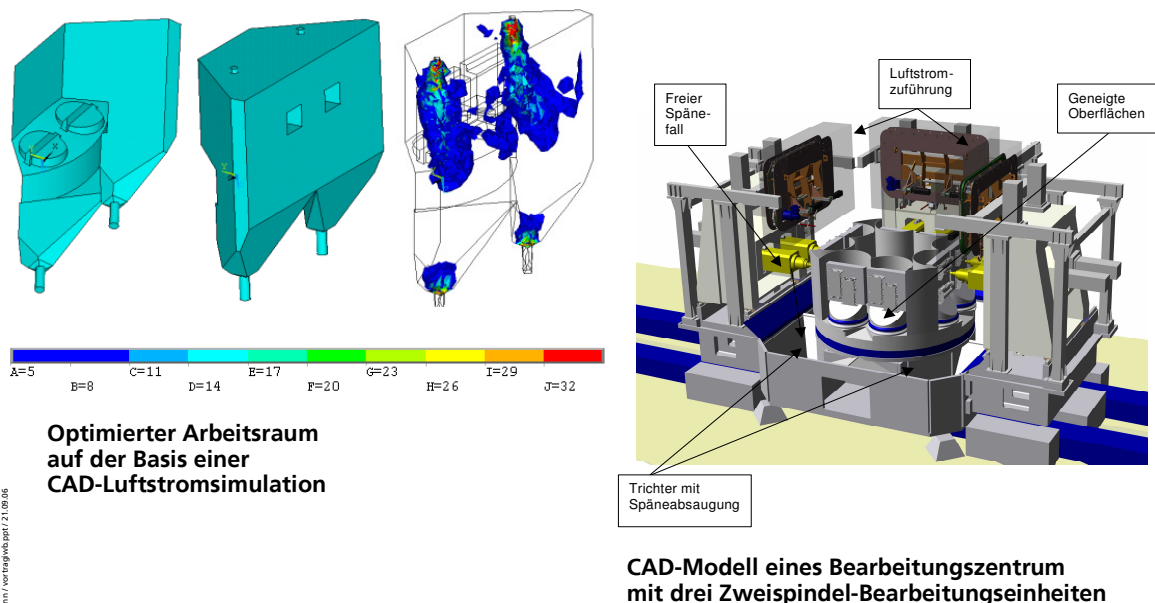
Neben der Beherrschung der Technologie tritt als ein Problemfeld der Späneabtransport auf, damit die Späne nicht ihre Wärme an das Maschinengestell abgeben können. Ein erfolgversprechender Weg für den Späneabtransport ist die gezielte Weiterleitung der Späne mittels Luftströmungen. Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes mit einem Industriepartner sollte die strömungstechnische Auslegung des Arbeitsraumes eines neu entwickelten für die Trockenbearbeitung geeigneten Bearbeitungszentrums erfolgen. Um aufwendige experimentelle Untersuchungen zu umgehen wurde dieser Entwurf mit Hilfe der Simulation durchgeführt, welche mit Messwerten abgeglichen wurde. Ergebnis der Simulation war es, dass mit vertretbarem technischen und finanziellen Aufwand nicht im gesamten Arbeitsraum solche Strömungsgeschwindigkeiten erzielt werden können, dass die Späne sicher mitgeführt werden. Daher wurden Varianten untersucht, die nur lokal und sporadisch wirksame Strömungen erzeugen. In der abgebildeten Maschine kann zum Beispiel durch systematisches Schwenken der Düsen der gesamte Arbeitsraum von Spänen befreit werden.

Im Fokus der weiteren Untersuchungen stand die Optimierung der Gestaltung des Arbeitsraumes und der Luftdüsen. In der Strömungssimulation sind alle Regionen des Arbeitsraumes gezeigt, wo die Strömungsgeschwindigkeit größer als 5 m/s ist.

Die folgenden Hinweise für die Gestaltung des Arbeitsraumes von Trockenbearbeitungsmaschinen können abgeleitet werden:

- Alle Oberflächen des Arbeitsraumes müssen in einem Winkel von 30° und mehr in Richtung der Späneausbringung geneigt sein,
- Die Späneabfuhr durch die Schwerkraft sollte durch eine Absaugung an einem Trichter im unteren Maschinenbett und eine zugeführte Luftströmung oben in den Arbeitsraum unterstützt werden,
- Alle Hindernisse für den Luftstrom im Arbeitsraum dürfen höchstens 30° in Richtung des Luftstromes geneigt sein,
- Die Zuführung kann optimiert werden mit Hilfe von einfachen Düsen über rotierende Düsen bis hin zu Leitblechen,
- Alle Hindernisse für den Luftstrom im Arbeitsraum dürfen höchstens 30° in Richtung des Luftstromes geneigt sein,
- In Abhängigkeit von der Späneart sind 5 ... 13 m/s Strömungsgeschwindigkeit des Luftstromes an der Oberfläche erforderlich,
- Das Volumen des zugeführten Luftstromes betrug ca. 66% des abgesaugten Luftstromes.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



Institutsleiter: Prof. Neugebauer

Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

Thermisches Verhalten von Komponenten
Luftströmungen

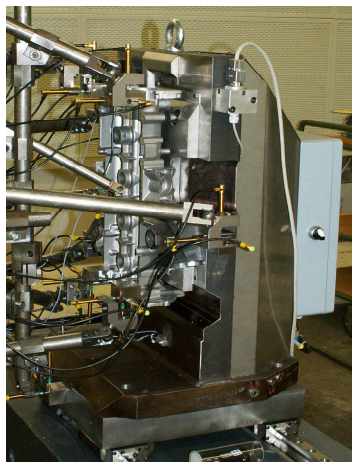
Bild 11: Späneabfuhr durch Luftströmungen

11 Thermisches Verhalten des Werkstückes

Untersuchungen zu thermischen Verlagerungen von Werkstücken unter definierten Umgebungsbedingungen erfolgten simulativ mit FEM und experimentell in der Thermozelle. Bei der Simulation wurde ein Temperatursprung um 12 K als

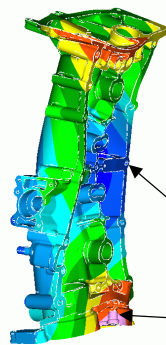
thermische Last auferlegt. Die experimentelle Untersuchung erfolgte in Verbindung mit einer intelligenten Vorrichtung, die mit interner Sensorik ausgerüstet war. An der Vorrichtung und am Bauteil wurden Verlagerungen in drei Achsrichtungen an ausgewählten Punkten mittels berührenden induktiven Wegaufnehmer erfasst. Zur thermischen Belastung variierte die Raumtemperatur zwischen 15 °C und 28 °C.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



Zylinderkopfhaube in intelligenter Spannvorrichtung

nestmann / vortrag06.pdf / 2.08.06



Temperaturrandbedingung:

Temperatursprung (um 12° C)
von 16° C auf 28° C

Festhaltung:

Einspannstellen der Vorrichtung
(Unterbindung der drei Translationen)

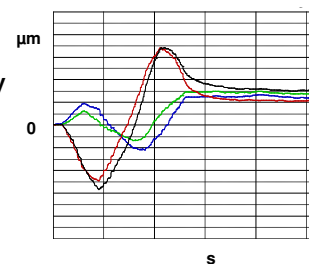
Gesamtverformung

in y: 100 %

Verschiebungen in y-Richtung

+ 54,9 %
- 45,1 %

Verlagerung Vorderseite y
des Werkstücks
(Vorrichtungsverlagerung
eliminiert) bei
Raumtemperaturgang
20°/15°/28°/20°



Institutsleiter: Prof. Neugebauer



Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

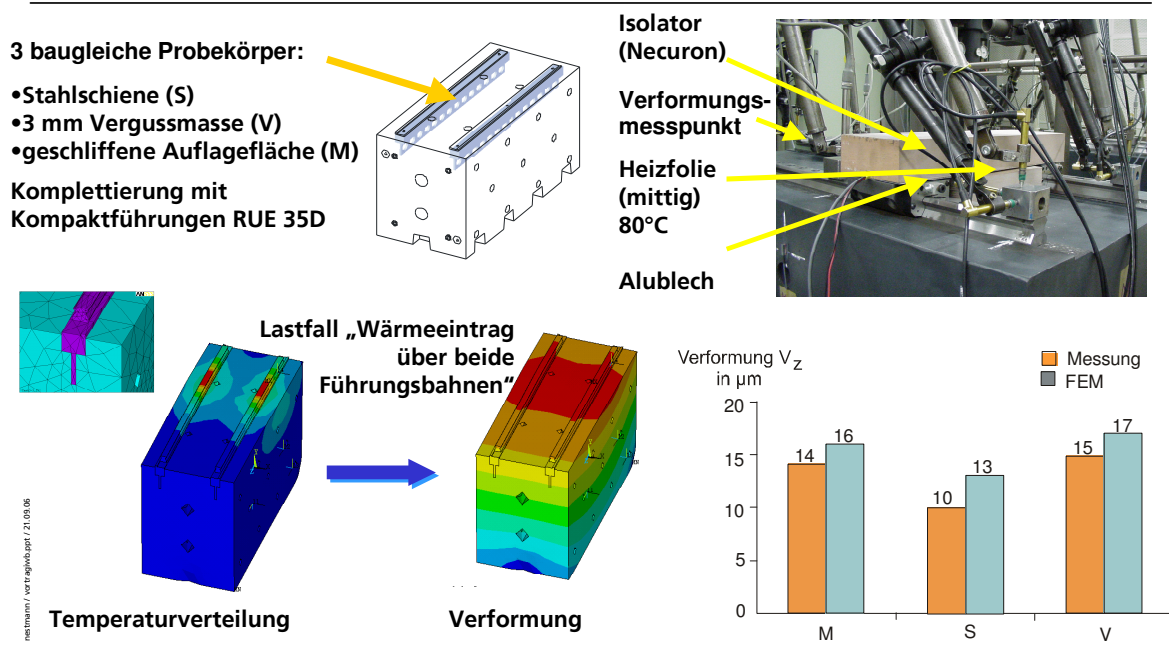
Thermisches Verhalten von Komponenten Werkstück

Bild 12: Thermisches Verhalten des Werkstückes

12 Einfluss der Montageart von Kompaktführungen

Für die Untersuchungen im IWU wurden drei baugleiche Mineralguss-Probekörper aus EPUMENT 140/8B mit unterschiedlichen Herstellungsvarianten für die Montageflächen der Führungsschienen genutzt. Dies waren eine eingegossene Stahlschiene mit angeschliffener Montagefläche (S), der direkte Anschliff der Montagefläche an den Mineralgusskörper (M) und eine mittels einer Lehre und der Vergussmasse ES 40-7127 mit Härter S 83 abgeformte Montagefläche. Als Führungen kamen baugleichen Kompaktführungssysteme RUE 35D zum Einsatz. In der Thermozone wurde unter konstanten Umgebungsbedingungen die Verformung des Probekörpers am ausgewiesenen Messpunkt bei Wärmeeintrag über eine Heizplatte mit konstant geregelten 80 °C gemessen. Es trat die zu erwartende Wölbung des Probekörpers auf. Parallel dazu wurde ein FEM-Modell des Probekörpers erstellt. Die gemessenen und gerechneten Werte stimmten gut überein. Die geringste thermisch bedingte Verformung trat auf Grund der guten Wärmeableitung durch die eingegossenen Stahleinlagen bei der Montagefläche auf der Stahlschiene auf.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



Institutsleiter: Prof. Neugebauer



Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

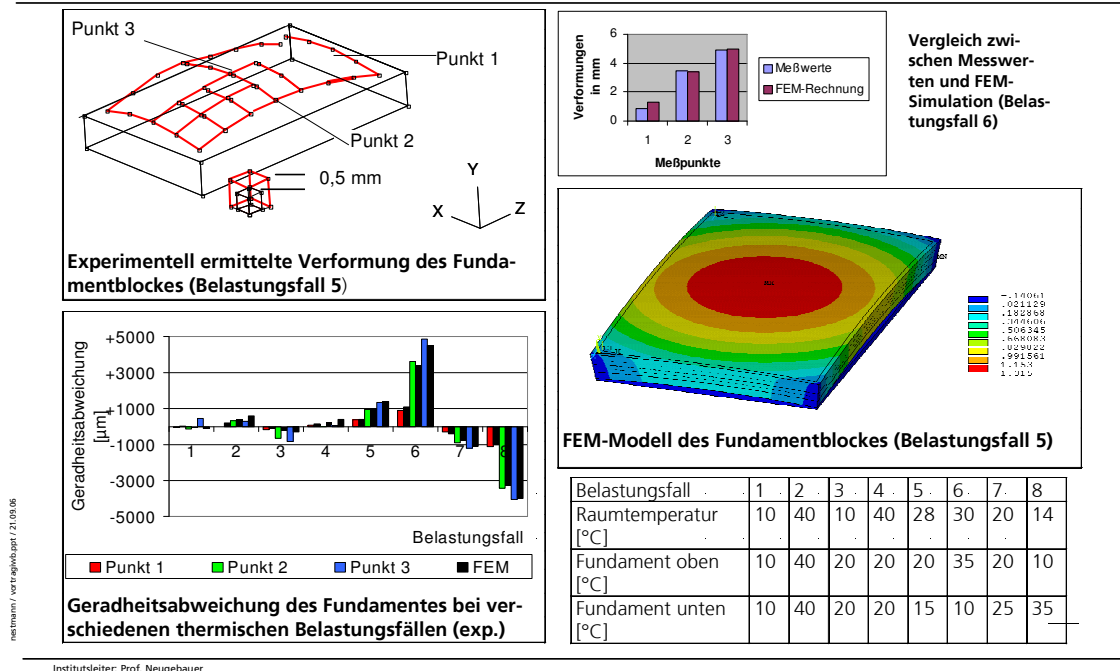
Thermisches Verhalten von Komponenten
Montageart von Kompaktführungen

Bild 13: Einfluss der Montageart von Kompaktführungen auf thermisch bedingte Verformungen

13 Thermische bedingte Verformung des Fundamentes

In einer Werkhalle erfolgte die Messung der Hallentemperatur in zwei Meter Höhe und des Hallenbodens bis in eine Tiefe von einem Meter in mehreren Schichten. Dabei zeigte sich, dass die Temperatur der oberen Schicht des Hallenbodens der Werkhallentemperatur mit guter Korrelation folgte. Dies hatte zur Folge, dass im Winter die oberen Bodenschichten um maximal ca. 1 K kälter waren als die tieferen und im Sommer maximal ca. 2,5 K wärmer, d.h. der Temperaturgradient schwankte zwischen -1 K und 2,5 K. Da Genauigkeitsmaschinen häufig mit vom restlichen Hallenboden abgekoppelten Stahlbetonfundamenten fundamentiert werden, galt es zu untersuchen, welche Verformungen diese Temperaturgradienten hervorrufen und damit auf die Gestellbaugruppen übertragen. Genutzt wurde dafür der Stahlbeton-Fundamentblock der Thermozelle des IWU mit einer Länge von 7 m, einer Breite von 5 m und einer Höhe von 1 m. Bei einem natürlichen Raumtemperaturgang zwischen 18 °C und 26 °C bei offener Thermozelle und untemperiertem Fundamentblock betrug die maximale Verformung des Messpunktes 3 in der Mitte des Fundamentblockes 150 μm . An der Längsseite im Punkt 2 betrug die Verformung 70 ...80 % dieses Maximalwertes. Zur Vertiefung dieser Ergebnisse wurden mit Hilfe der Thermozelle unter reproduzierbaren Bedingungen mit verschiedenen theoretischen Lastfällen experimentell Verformungen ermittelt und durch FEM-Simulationen berechnet. Die experimentellen und simulativen Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



Institutsleiter: Prof. Neugebauer



Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

Thermisches Verhalten von Komponenten
Fundament

Bild 14: Thermisch bedingte Verformungen des Fundamentes

14 Neuartige Strukturen

Werkhallentypische Temperaturbedingungen sind in Abhängigkeit von der Tageszeit, Jahreszeit usw. gekennzeichnet durch die Ausbildung von Luftschichtungen mit in der Höhe in der Regel zunehmender Temperatur. Diese Temperaturschichtungen führen insbesondere zu ebenfalls veränderlichen vertikalen Temperaturgradienten im Maschinenbett. Der sich in der Maschine ausbildende Temperaturgradient hat thermoelastische Verformungen zur Folge. Wie in der prinzipiellen Darstellung gezeigt und experimentell nachgewiesen, wölbt sich das Maschinenbett relativ gleichmäßig um den Betrag f_1 durch die gezeigte Temperaturveränderung von ϑ_0 zu ϑ_1 über die Höhe h .

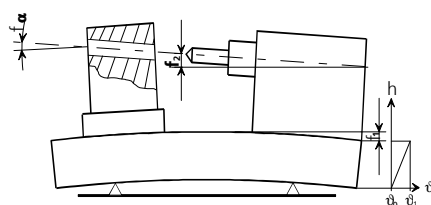
Die Idee besteht darin, Maschinenbaugruppen, insbesondere Betten aus Mineralguss zu fertigen, der in seiner Beschaffenheit, seinem Herstellverfahren und den Dimensionierungsregeln so weiterentwickelt werden muss, dass folgende Gestaltungsmöglichkeiten realisierbar sind:

- gradierte Mineralgussstrukturen, d.h. definiert in Schichten oder Abschnitten mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten. In unten liegenden Schichten, die sich in der Regel wenig erwärmen und eine geringere Temperaturgradientänderung erfahren, wird Mineralguss mit einem relativ großen Wärmeausdehnungskoeffizienten eingebracht. Höher liegende Schichten, die eine größere Erwärmung erfahren und eine größere Temperaturgradientänderung durchlaufen, werden aus Mineralguss mit einem relativ kleinen Wärmeausdehnungskoeffizienten gefertigt. Desgleichen können sich örtlich

begrenzt erwärmende Gebiete behandelt werden. Dadurch wird erreicht, dass sich die unteren und oberen Fundamentschichten trotz unterschiedlicher Temperaturänderung nur um den selben Betrag dehnen und sich das Maschinenbett nicht wölbt.

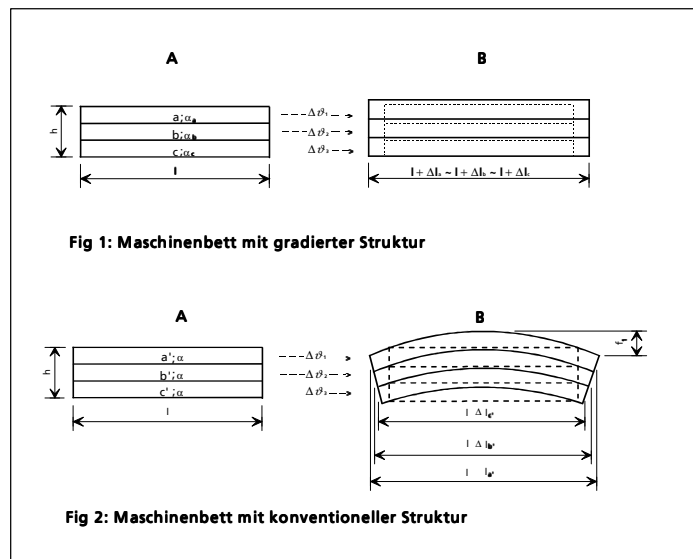
- Integrative Mineralgussstrukturen, d.h. Komponenten in Abschnitte oder Schichten einzubringen, mit denen aktiv geregelt die geometrischen Abmessungen verändert werden können. In die unten liegenden Schichten eines Maschinenbettes, die in der Regel sich wenig erwärmen und eine geringere Temperaturänderung erfahren, wird z.B. ein Aktor eingebracht, mit dem die entsprechende Dehnung der Schichten geregelt erzeugt wird, um diese Partie des Maschinenbettes der Wärmedehnung der wärmeren oberen Schicht anzupassen und insgesamt eine Wölbung des Maschinenbettes zu vermeiden.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



In Folge eines Temperaturgradienten thermisch verformtes Maschinenbett

nestmann / vortragwbs.ppt / 21.09.06



Institutsleiter: Prof. Neugebauer

Bild 15: Neuartige Strukturen für Maschinengestelle

15 Kompensation mit linearer Regression

Eine Methode zur Kompensation von thermischen Verlagerungen ist die Nullpunktverschiebung der Achsen über die Steller unter Hilfe von linearen Polynomen als Kompensationsalgorithmen mit ausgewählten Temperaturmesspunkten als Führungsgröße. Entscheidend für die Güte der Kompensation ist dabei eine ganzheitliche experimentelle Analyse des thermischen Verhaltens der Maschine. Durch diese Methoden sind komplexe Temperatur- und Verlagerungsdaten zu ermitteln. Dabei sind möglichst vielfältige, praxisrelevante thermische Lasten einzubeziehen. Im gezeigten Beispiel waren die thermischen

Lasten ein Drehzahlspektrum der Hauptspindel, verschiedenste Achsbewegungszyklen und ein Raumtemperaturgang von 20 ... 28 °C. Diese Versuche werden nacheinander durchgeführt. Im Bild ist das Drehzahlspektrum dargestellt und die daraus resultierende Verlagerung des TCP in Z-Achsenrichtung. Nach Vorgabe der gewünschten Zahl der Führungstemperaturmesspunkte werden rechtechnisch die geeigneten Temperaturmesspunkte und die Polynom-Koeffizienten ermittelt. Zur Optimierung wird jeder Temperatur- mit jedem Verlagerungsgang gegengerechnet. Zur Verifizierung erfolgte unter gleichzeitiger Aufbringung alle genannten thermischen Lasten ein Vergleich der unkompensierten und der kompensierten thermischen Verlagerung.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen

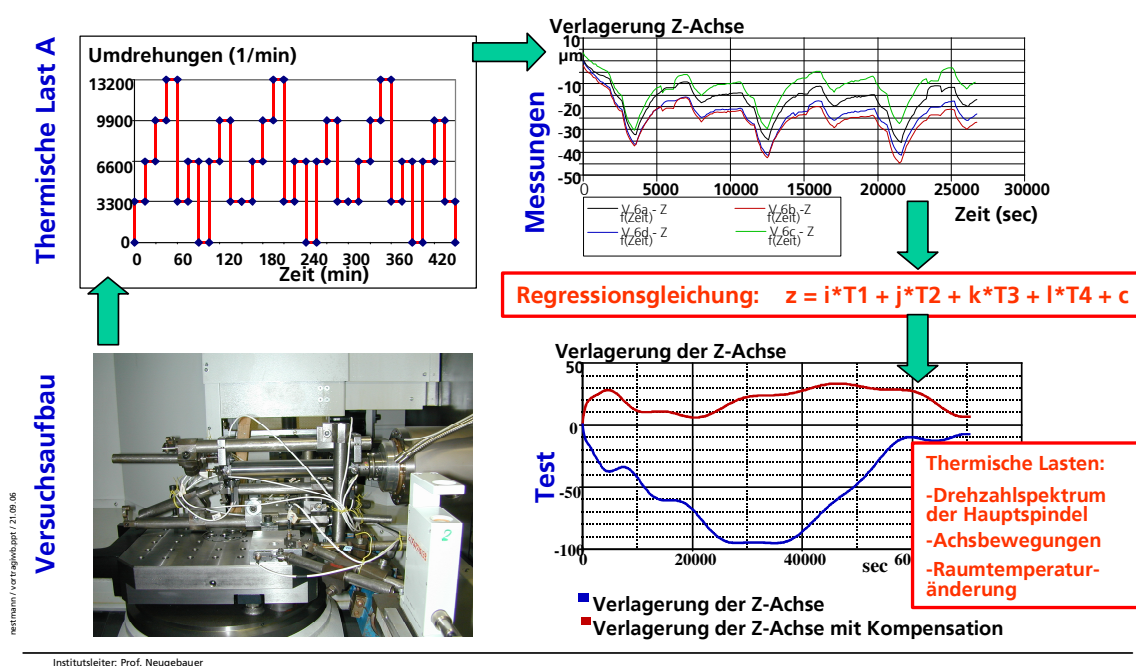


Bild 16: Kompensation mit einer linearen Regression

16 Kompensation mit einer nichtlinearen Regression

Als Versuchsmaschine zur Untersuchung der Verlagerung des TCP in Abhängigkeit von der Werkzeug- und Spannfuttererwärmung diente ein Bearbeitungszentrum im Versuchsfeld des Fraunhofer IWU. In der HSK Aufnahme der Hauptspindel wurde das Werkzeugsystem (zweischneidiger Schaftfräser, Durchmesser $d = 10$ mm mit Titanbeschichtung in Kraftschrumpffutter) gespannt.

Zur Temperaturmessung an den bewegten Teilen dienten drei Pyrometer und am stillstehenden Teil der Spindel PT100 Temperatursensoren.

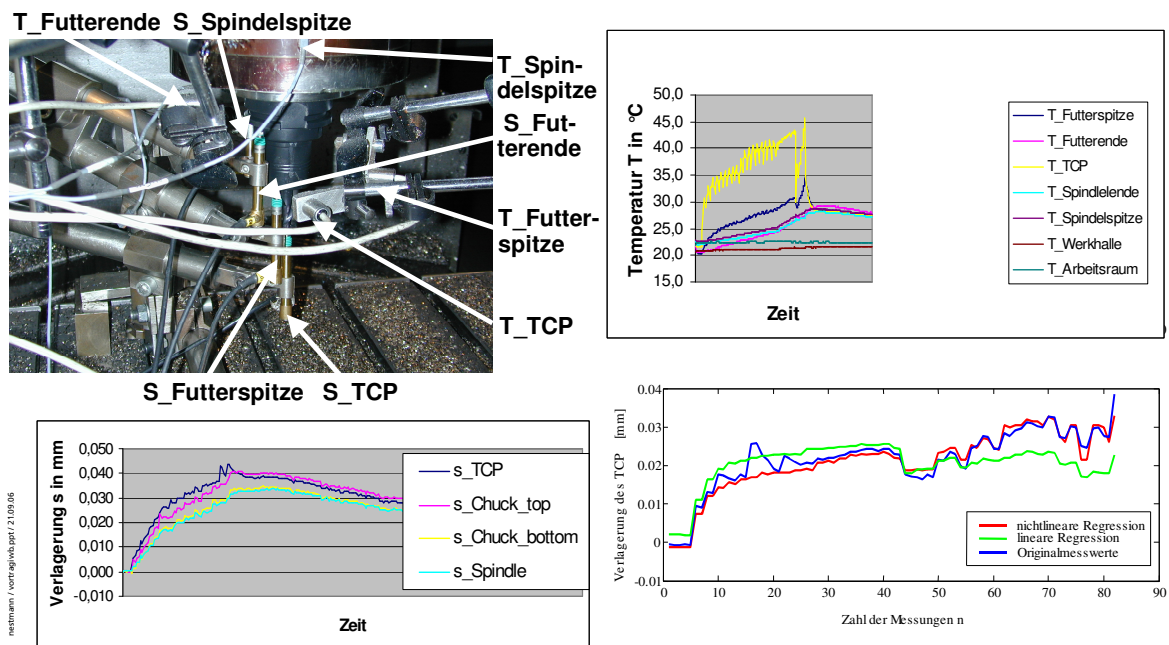
Die Messung der Verlagerungen erfolgte an einem Messplatz, der 400 mm neben der Bearbeitungszone lag. Die Spindel fuhr dabei in einer definierten Position auf die induktiven Wegaufnehmer. Zerspannt wurde ein Stahlblock St-52 mit einer Fläche

von 200 mm x 120 mm. Die Fläche des Werkstückes wurde mit dem beschriebenen Werkzeug zeilenweise abgespannt, wobei die Maschine nach jeder zweiten Zeile zum Messplatz fuhr, dort drei Sekunden verharrte, in denen der Messvorgang stattfand, und anschließend mit der Zerspanung fortfuhr. Der Arbeitseingriff betrug $a_e = 8$ mm und die Schnittbreite $a_p = 0,5$ mm. Die Schnittgeschwindigkeit wurde variiert, um einen unterschiedlichen Wärmeeintrag in das Werkzeug zu erhalten. Sie lag bei $v_c = 80$ m/min, 120 m/min, 200 m/min und 370 m/min. Der Werkzeugverschleiß wurde gemessen und verrechnet.

Die Wiederholgenauigkeit der Maschine war für den angegebenen Versuchsaufbau ausreichend, da immer zwischen zwei gleichen Positionen in der Maschine hin und her gefahren wurde.

Die hier ermittelten Temperaturen und Verlagerungen bildeten die Grundlage für die Erstellung des neuen mathematischen Modells des Werkzeuges und der Werkzeugaufnahme, welches dann für die Demonstration des Kompensationsalgorithmus diente. Der Temperatur-Verformungs-Zusammenhang konnte mit Hilfe der nichtlinearen Regressionsrechnung sehr gut nachgebildet werden. Die Ergebnisse waren deutlich besser als bei der linearen Regression. Als wichtig hat sich herausgestellt, dass das Spektrum der Trainingsmessungen, d.h. der durchlaufene Temperaturbereich, im Versuch mindestens so groß sein muss wie der später zu verrechnende. Die Genauigkeit der Berechnung nimmt außerhalb des in den Trainingsmessungen ermittelten Wertebereichs ab.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



Institutsleiter: Prof. Neugebauer



Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

Kompensation
Nichtlineare Regression

Bild 17: Kompensation mit nichtlinearer Regression

17 Kompensation mit einem intelligenten dynamischen Prozessmodell

Ziel eines Förderprojektes war Entwicklung eines Verfahrens zur intelligenten, modellgestützten Kompensation der die Fertigungsgenauigkeit beeinflussenden thermischen Verlagerungen an Werkzeugmaschinen, welches als Regelsystem über die CNC-Steuerung wirkt. Die Kompensationsalgorithmen basieren auf einem dynamischen Prozessmodell (Minimalmodell) für das thermische Verhalten einer Werkzeugmaschine. Aufgrund der Kenntnis dieses dynamischen Modells werden langsam wirkende, preiswerte Stellelemente (Heizungen) benutzt und auf diese Weise Verlagerungen, die nicht in Richtung der Vorschubachsen liegen wie Wölbungen und Kippungen, kompensiert. Die Erprobung erfolgte mit Hilfe eines Demonstrators.

Der Demonstrator besteht aus einem Aluminium-Rahmen und ist aus U-Profilen zusammengeschweißt. Der Rahmen ist zur Simulation einer Maschinenaufstellung mit der Grundplatte an zwei Stellen verschraubt. Weiterhin besitzt der Rahmen 2 Heizelemente mit je 12 W maximaler Heizleistung als Stellgrößen, die so angeordnet sind, dass sie gegenläufig auf die Kippung wirken. Zur stufenlosen Ansteuerung der Heizelemente gibt der Steuerrechner je ein pulslängenmoduliertes Signal aus.

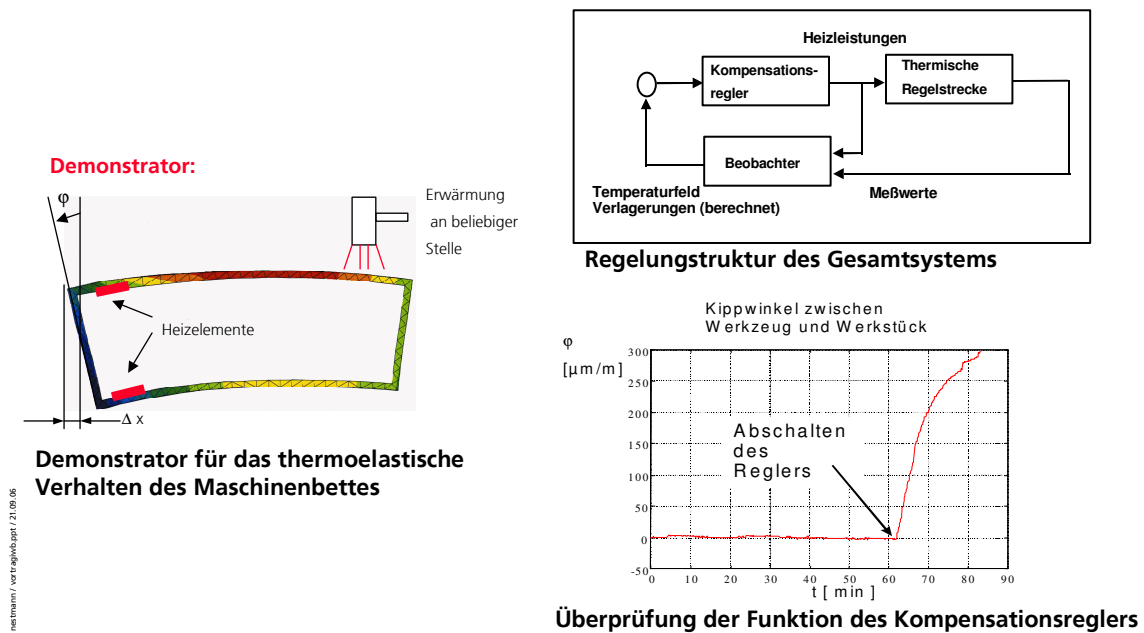
Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung der Kompensationsstrategie ist die Kenntnis eines geeigneten Modells zur Beschreibung des thermoelastischen Verhaltens. In der Modellbildungsphase wurde die Kippung der linken Seitenfläche, die die Verkipfung des Maschinenständers symbolisieren soll, mit zwei induktiven Wegaufnehmern gemessen und zur Erfassung des thermischen Zustandes der Struktur waren in regelmäßigen Abständen 8 Temperaturmeßstellen am Umfang angeordnet.

Aufgabe eines zu entwerfenden Kompensationsreglers ist es, den Kippwinkel auch unter Einwirkung von Störgrößen auf Null zu regeln. Das abgeleitete Modell berechnet die prinzipbedingte Längenänderung des Rahmens in Folge Einbringung von Wärmeenergie und stellt sie für eine Offset-Korrektur einer translatorischen Achse zur Verfügung. Ein paralleles, ständig im Kompensationsrechner aktualisiertes, linearisiertes und dynamisches Zustandsmodell des thermomechanischen Prozesses gestattet eine Reduzierung der Anzahl der erforderlichen Temperaturmessstellen. Diese Anordnung wird in der allgemeinen Regelungstheorie mit Zustandsbeobachter bzw. -schätzer bezeichnet. Es ergibt sich die dargestellte Regelungsstruktur des Gesamtsystems.

Zur Überprüfung der Ordnung und Funktionsfähigkeit des Zustandsbeobachters wurde die Anzahl der zu schätzenden Temperaturen schrittweise von 1 bis 5 erhöht. Die Genauigkeit der Temperaturschätzung beträgt ca. 0,2 K und zeigte gute Übereinstimmung mit den wahren Werten. Es konnte eine gleichzeitige Schätzung von 4 - 5 Temperaturen ohne wesentlichen Genauigkeitsverlust durchgeführt werden, d.h. es können also mindestens 4 – 5 Temperaturen indirekt über den Beobachter berechnet werden, was zu einer Einsparung der Anzahl der Messstellen von über 50 % führte.

Die Funktion des Kompensationsreglers ist als Diagramm dargestellt. Der Regler regelt eine vorhandene Störgröße von ca. 6 W aus, die nach dem Abschalten zu einer deutlichen Erhöhung der Kippung führt.

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen



Institutsleiter: Prof. Neugebauer



Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

Kompensation
Intelligentes dynamisches Prozessmodell

Bild 18: Kompensation mit einem intelligenten dynamischen Prozessmodell

18 Zusammenfassung

Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen

1. Neben solider Dynamik und Steife sollten die Werkzeugmaschinen ebenfalls ein gutes thermisches Verhalten haben. 25% bis 75% der Fertigungsfehlerbilanz fallen auf thermisch bedingte Verlagerungen und Verformungen.
2. Die Simulation des thermischen Verhaltens wird derzeit durch die Unsicherheit in der Erkenntnis der Randbedingungen in ihrer Genauigkeit eingeschränkt. Die Erweiterung bisheriger Modellierungskonzepte um weitere Simulationsbausteine wie z.B. Ersatzmodelle kann die Genauigkeit verbessert werden.
3. Zur Verifizierung der FEM-Simulationen und Modellgewinnung für Kompensation sind ganzheitliche experimentelle Untersuchung des thermischen Verhaltens mit modernen Messmethoden unter variablen, praxisnahen und reproduzierbaren thermischen Lasten erforderlich.
4. Zur Verbesserung des thermischen Verhaltens der Maschine müssen auch die Einflüsse von Spänen, der Werkstück- und Werkzeugerwärmung sowie die thermische Steife der Vorrichtung zu berücksichtigen.
5. Durch konstruktive und kompensatorische Maßnahmen kann das thermische Verhalten wesentlich verbessert werden.

nestmann / vortr.agw06.pdf / 21.09.06

Institutsleiter: Prof. Neugebauer



Fraunhofer
Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik

Zusammenfassung

Bild 19: Zusammenfassung