



1 Problemstellung

Zur Erfüllung des steigenden Bedarfs an Investitions- und Konsumgütern sind Werkzeugmaschinen (WZM) unterschiedlichen Automatisierungsgrades von wesentlicher Bedeutung. Die spanende Bearbeitung von Bauteilen ist nach wie vor für alle Formgebungsprozesse alternativlos, wie sich u. a. aus der Zahl produzierter spanender Werkzeugmaschinen ableiten lässt.

Abb. 1 zeigt die Umsätze verschiedener Sektoren der Jahre 2020 und 2021 im Vergleich. Es wird ersichtlich, dass die Werkzeugmaschinenproduktion, gefolgt von Antriebstechnik und Fördermitteln, der umsatzstärkste Sektor in Deutschland ist.

Abb. 2 zeigt die prozentuale Verteilung der Einsatzbereiche von Werkzeugmaschinen. Die Automobil- und Zulieferindustrie ist der Haupteinsatzbereich und bestimmt damit maßgeblich die Anforderungen an die Werkzeugmaschinenproduktion.

Der Anteil der spanenden Werkzeugmaschinen entspricht im Jahr 2021 einem Wert von 6576 Mio. EUR. Davon repräsentiert die Produktion von umformenden Werkzeugmaschinen einen Betrag von 2414 Mio. EUR.

Eine besondere Herausforderung sind die Genauigkeitsforderungen an Fertigungsprozesse der Metall- und Elektroindustrie, die deutliche Steigerungsraten

C. Brecher (✉)

Werkzeugmaschinenlabor, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen, RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: C.Brecher@wzl.rwth-aachen.de

G. Ott

Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen, TU Dresden, Dresden, Deutschland

E-Mail: gritt.ott@tu-dresden.de

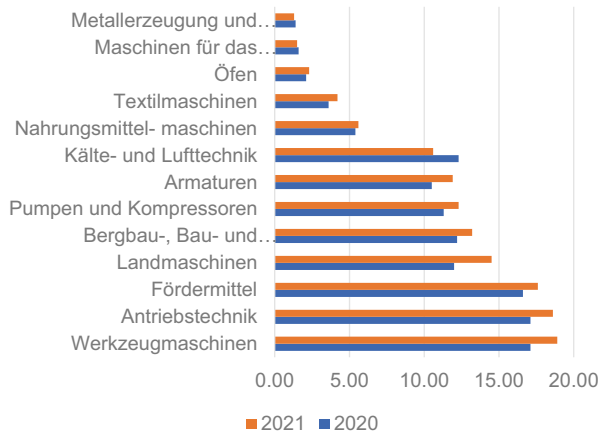


Abb. 1 Umsatz im deutschen Maschinenbau nach ausgewählten Sektoren in den Jahren 2020 und 2021 (in Milliarden Euro) (destatis 2022)

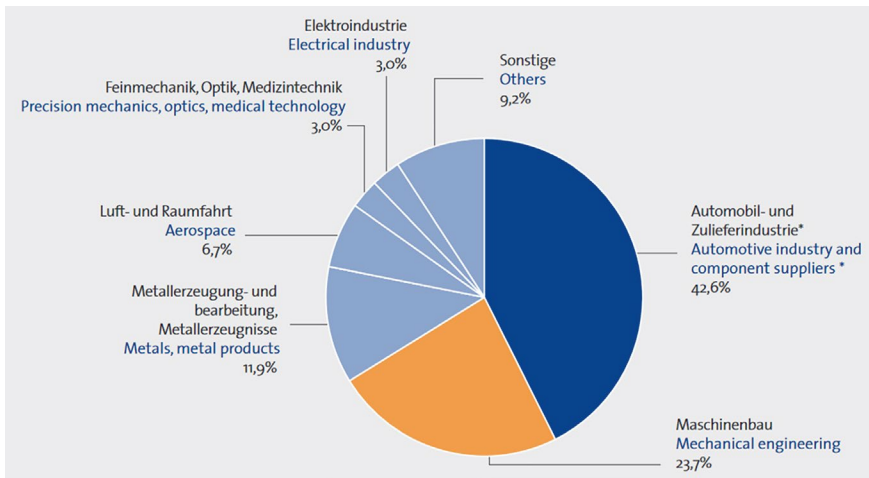


Abb. 2 Abnehmerbranchen der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie (VDW 2021)

aufweisen, verbunden mit der Zunahme von Kleinserien und Einzelfertigung. Damit einhergehende ständige Wechsel zwischen Rüsten und Bearbeiten verhindern möglicherweise das Erreichen des thermischen Beharrungszustandes der Werkzeugmaschine. Nach der Auswertung von Daten einer großen Stichprobe von 1132 Unternehmen durch das Fraunhofer-ISI wird in 26 % der Fälle von „stark gestiegenen“ Genauigkeitsforderungen berichtet, 44 % der Unternehmen sind mit „etwas gestiegenen“ Genauigkeitsforderungen konfrontiert, die restlichen 30 % der Unternehmen realisieren gleichbleibende Genauigkeiten (Kinkel 2005).

Zunehmend kleinere Losgrößen infolge von Individualisierung der Produkte erfordern die Beherrschung instationären Verhaltens der WZM.

Dank optimierter Gestaltung und Einsatz hochwertiger Komponenten werden die geometrisch-kinematisch und statisch bedingten Fehlereinflüsse am Werkstück bereits geringgehalten. Eine Industriebefragung bei Herstellern und Anwender (Bräunig et al. 2018) zeigt, dass der Anteil thermischer Fehler bei WZM als deutlich größer als der durch geometrische, statische und dynamische Fehler eingeschätzt wird. Große WZM-Hersteller bewerten thermische Fehler im Betrieb als dominierend, während mittelgroße Anwender sich auf die Beherrschung geometrischer, statischer und dynamischer Fehler konzentrieren. Der thermische Fehler wirkt sich nach Einschätzung von Anwendern etwa zu gleichen Teilen auf die Struktur der Werkzeugmaschine, das Werkzeug und das Werkstück aus (Abb. 3).

Thermische Fehler sind u. a. darauf zurückzuführen, dass höhere Mengenleistungen sowie innovative Schneidwerkstoffe größere Haupt- und Vorschubantriebsleistungen erfordern. Diese werden im Falle der Hauptantriebe prinzipbedingt größtenteils in Wärmeströme an der Wirkstelle (Tool Center Point, TCP) des Zerspanungsprozesses dissipiert bzw. erzeugen im Falle der Vorschubantriebe über den Umweg erhöhter Reibleistungen von mechanischen Antriebs- und Führungselementen oder über erhöhte Verlustleistungen der Antriebe selbst höhere Wärmeströme. Beides führt zu einer Zunahme thermo-elastischer Verformungen. Höhere Zeitspannvolumina tragen zwar zur Energieeffizienz bei, bewirken aber auch höhere Wärmeeinträge infolge von Verlustleistungen. „Der Produktivitätssteigerung sind daher durch thermo-elastische Abweichungen unterhalb einer bestimmten Toleranzgrenze Grenzen gesetzt (Abb. 4).“ (Brecher et al. 2016)

Hersteller setzen bereits auf intelligente Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs von WZM, z. B. Abschaltstrategien, die den Energiebedarf für die Klimatisierung senken. Die derzeit praktizierten Maßnahmen orientieren auf die Herbeiführung eines thermischen Beharrungszustandes durch möglichst gleichmäßiges Einbringen von (Verlust-) Leistungen oder durch Gewährleistung weitestgehend konstanter Randbedingungen.

Gesamtsicht			
Thermische Fehler		Geometrische, statische, dynamische Fehler	
57 %		43 %	

Herstellersicht		Anwendersicht	
Thermische Fehler	Geometrische, statische, dynamische Fehler	Thermische Fehler	Geometrische, statische, dynamische Fehler
62 %	38 %	43 %	57 %

Abb. 3 Bewertung der Größe des thermischen Fehlers im Vergleich zum Gesamtfehler. (Nach Bräunig et al. 2018)

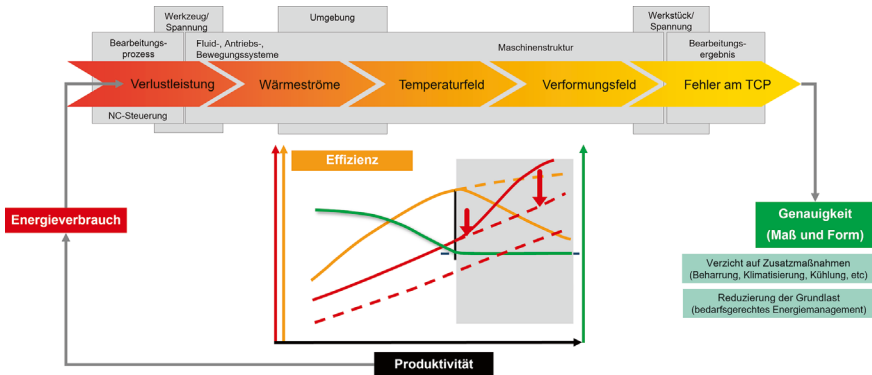


Abb. 4 Zielkonflikt zwischen Genauigkeit, Produktivität und Energieeffizienz

Diese Strategien sind: Erstens, das Warmlaufverfahren bzw. nicht Ausschalten der Maschine über das Wochenende oder zwischen Arbeitsschichten (die Maschine bleibt standardgemäß in Standby- bzw. Leerlauf-Betrieb, um den Abkühlvorgang zu vermeiden). Zweitens, entsprechender Einsatz der Hallenklimatisierung bzw. Hallenisolierung, z. B. mittels Wandstärke oder der Vermeidung von Fenstern, um Sonneneinstrahlung zu umgehen. Drittens, die Temperierung der Gestellbauteile und Antriebe und viertens, die intermittierende Qualitätsprüfung bzw. die Abnahme der Werkstückqualität an Koordinatenmessmaschinen. Diese Strategien gehen mit einem zu hohem Energieverbrauch einher. Ihre Vermeidung wäre daher vorteilhaft, da so die Produktivität und die Energieeffizienz der jeweiligen Werkzeugmaschine gesteigert werden könnten.

Abb. 4 zeigt, dass Produktivität, Energieeffizienz und thermisches Verhalten eng miteinander verknüpft sind und deshalb nur in einer Gesamtbetrachtung optimiert werden können. Eine effiziente Quantifizierung der Quellen für thermische Fehler ist erforderlich, um ein zuverlässiges System zur Korrektur und Kompensation von thermischen Fehlern zu entwickeln.

2 Ganzheitliche Problemlösestrategie

Die verfolgte Problemlösestrategie orientiert auf Maßnahmen, die unter thermisch instationären Verhältnissen die Einhaltung der Bearbeitungsgenauigkeit bei gesteigerter Produktivität sicherstellen, ohne dass es zusätzlicher Energieaufwendungen für die Temperierung bedarf. Dafür gilt es in erster Linie, mehr Wissen über thermische Wirkungen und Möglichkeiten ihrer Beeinflussung bzw. Beherrschung zu bestimmen.

Die folgenden Kapitel zeigen die erzielten Ergebnisse der langjährigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu dieser Problematik.

Folgende Teilaspekte werden betrachtet:

1. Schaffung von Modellgrundlagen für eine umfassende Berechnungsfähigkeit der Wärmeströme und der daraus entstehenden thermo-elastischen Verformungen,
2. Abbildung von Strukturveränderlichkeit infolge von Relativbewegungen innerhalb der Werkzeugmaschine,
3. Erlangung der Fähigkeit zum effektiven Abgleich von örtlich und zeitlich stark schwankende Parameter mittels Parameteridentifikationsverfahren als Voraussetzung für Korrektur- und Kompensationslösungen,
4. Entwicklung und Demonstration von Lösungen zur steuerungintegrierten Korrektur thermo-elastischer Fehler durch inverse Lagesollwert-Aufschaltung des Fehlers am TCP,
5. Entwicklung und Demonstration werkstoffeigenschaftsgetragener Lösungen zur Kompensation thermo-elastischer Wirkungen durch Versteifung des Temperaturfeldes sowie Minderung und Vergleichmäßigung des Wärmeenergieeintrags in tragende Strukturen,
6. Entwicklung von messtechnischen Grundlagen zur Erfassung thermo-elastischer Fehler in ausgewählten Strukturbereichen von Werkzeugmaschinen,
7. Entwicklung methodische Grundlagen für eine komplexe, entwicklungsbegleitende Bewertung der entwickelten Lösungen hinsichtlich ihrer Wirkung auf Produktqualität, Mengenleistung, Energieverbrauch und Kosten der WZM.

Alle Arbeiten werden auf die thermische Wirkungskette bezogen. Diese beschreibt Energiewandlung, Größenumformung und Transformation sowie die Schritte von der Bearbeitungsaufgabe bis zum Bearbeitungsergebnis und gibt die Randbedingungen dazu an (Großmann 2016).

Abb. 5 zeigt wie die Maschinenstruktur mit Verlustleistungen beaufschlagt wird. Es existieren maschinenseitige Verlustleistungseinträge aus Antriebs- und Übertragungselementen der in Werkzeugmaschinen prinzipiell unverzichtbaren Haupt- und Vorschubantriebe sowie prozesseitige Verlustleistungen aus der Zerspanung selbst, da ein Großteil der Hauptantriebsleistung an der Wirkstelle in Wärmeströme dissipiert wird. Die örtlichen und zeitlichen Profile dieser maschinen- und prozesseitigen Verlustleistungen werden von der technologischen Prozesscharakteristik der Zerspanungsaufgabe selbst wesentlich bestimmt. Eine instationäre Prozesscharakteristik stellt heute den Regelfall dar und muss als technologische Anforderung hingenommen werden.



Abb. 5 Thermische Wirkungskette, bezogen auf die Werkzeugmaschine

Weiterhin werden Verlustleistungen aus Antriebs- und Übertragungselementen von Nebenaggregaten für Kühlschmiersysteme und für sonstige fluidische Kreisläufe in die Struktur eingetragen. Diese Nebenaggregate bestimmen zugleich einen Teil der thermischen Randbedingungen wie die stabilisierend als Temperierung wirkenden Fluidtemperaturen und daran gebundene Wärmeübergänge. Weitere wesentliche thermische Randbedingungen sind die Umgebungsbedingungen und hier insbesondere die Umgebungstemperatur und erzwungene Luftströmungen sowie die daran gebundenen Wärmeübergänge. Werden diese Umgebungsbedingungen mittels einer Hallenklimatisierung konstant gehalten, so ist das mit i. d. R. hohen Verlustleistungen der Klimatisierungs-Aggregate verbunden, die zwar nicht in die Maschinenstruktur eingetragen werden, aber die Kostenseite der Fertigung überproportional belasten. Über das von thermischen Leitwerten und Kapazitäten bestimmte thermische Übertragungsverhalten der Maschinenstruktur entstehen transiente Temperaturfelder in der Struktur. Diese Temperaturfelder führen zu Wärmedehnungen in der Struktur und damit zu einer thermo-elastischen Strukturverformung, die sich in einen Fehler an der Wirkstelle (TCP) transformiert.

Die resultierenden Entwicklungsarbeiten sind in drei Bereiche kategorisierbar:

- Weiterentwicklung von Modellgrundlagen
- Kompensationsmaßnahmen
- Korrekturverfahren

2.1 Weiterentwicklung von Modellgrundlagen

Voraussetzung dafür sind prozessaktuelle Informationen über die mit Vorschubantrieben bzw. zusätzlichen Stellachsen zu korrigierenden Größen. Diese Informationen können einerseits aus Modellen oder andererseits aus der direkten messtechnischen Erfassung der Verformung gewonnen werden (Abb. 6).

Der Anspruch der zeitlichen Prozessaktualität des Gesamtmodells bezieht sich dabei sowohl auf die thermischen Lasten als auch auf die durch die Relativbewegungen der Baugruppen bewirkten Strukturveränderungen.

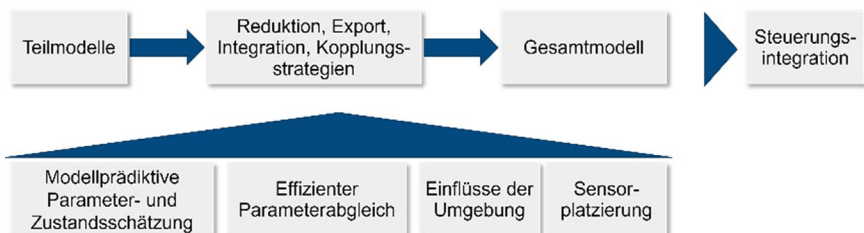


Abb. 6 Zusammenhang zwischen Einzelarbeiten zu den Modellgrundlagen

Für das Gesamtmodell werden Teilmodelle von Baugruppen und Komponenten zusammengeführt. Dabei handelt es sich um die betriebsabhängigen Verluste und Wärmestromverteilungen in den elektrischen Antrieben (Kap. „[Der Elektroantrieb als thermo-energetische Blackbox](#)“) und den fluidtechnischen Systemen (Kap. „[Fluidische Kühlung](#)“), die geschwindigkeits- und belastungsabhängigen Reibungsverluste der Lager- und Führungskomponenten (Kap. „[Untersuchung von Maschinenkomponenten](#)“) sowie um den von den technologischen Parametern abhängigen Wärmeeintrag in die WZM (Kap. „[Prozessmodellierung des Fräs- und Schleifprozesses](#)“) und dessen Aufteilung auf Werkzeug, Werkstück und Span des Zerspanungsprozesses.

Prozessmodellierung

Mit empirisch-analytischen Modellen zur Beschreibung der zeitveränderlichen Werkzeugtemperatur- und Wärmestromverteilung beim Fräsen und beim Schleifen können die thermische Belastung des Werkzeugs vorhergesagt sowie thermische Eingangswerte für das Gesamtmaschinenmodell bereitgestellt werden (Kap. „[Prozessmodellierung des Fräs- und Schleifprozesses](#)“).

Für die **Werkzeug- und Werkstückspannvorrichtungen** werden der radiale und axiale thermische Werkzeugfehler sowie der Positionsfehler der Spanneinrichtung modelliert. Dabei wird der Einfluss verschiedener Kühlstrategien und Werkzeuggeometrien einbezogen.

Die Aussagekraft der FE-Modelle wird auf Grundlage genauer bestimmter Kontaktwärmeübergangskoeffizienten erhöht. Es entsteht die Option zur individuellen Bestimmung von Kontaktwärmeübergängen mit experimentellen Methoden und zur Betrachtung der Einflüsse von dynamischen Lasten und von verschiedenen Materialpaarungen auf die Wärmeflüsse.

Zur Anwendung kommen die Erkenntnisse u. a. bei der Modellierung des lastabhängigen **Reibverhaltens** von Kugelgewindetrieben und Profilschienenführung. Betrachtet werden können damit verschiedene Einflüsse auf das Reibverhalten, z. B. der Einfluss des Schmiermittels, der Wälzkörper, der Abstreifer oder des Herstellers sowie der Betriebsparameter Kraft, Drehzahl und Temperatur.

Mittels Verfahren der CFD-Modellierung werden sowohl das thermo-fluidische Verhalten der Kühlsysteme der WZM (Kap. „[Fluidische Kühlung](#)“) als auch spezielle Einflussfaktoren durch die Umgebung nachvollziehbar gemacht (Kap. „[Modellierung von Umgebungseinflüssen](#)“).

Für die Strukturmodellierung stehen zwei alternative, praxisrelevante Implementierungsstrategien zur Erstellung eines Gesamtmodells zur Verfügung (Kap. „[Strukturmodelle von Werkzeugmaschinen](#)“).

Problemspezifische Modellimplementierung Diese Modellierungsvariante verfolgt als Ziel die Integration eines Zustandsraummodells in eine CNC-Steuerung in Form eines prozessparallelen Programm-Codes. Dieser Code berechnet aus dem zeitaktuellen thermischen Zustand und der daraus resultierenden thermisch bedingten Verformung der Maschine Korrekturwerte zur Aufschaltung auf die Achs-Soll-Werte der Maschinensteuerung.

Schnittstellenbasierte Modellierung Der Vorteil der schnittstellenbasierten Modellierung besteht in der direkten Übertragbarkeit von Teilmodellen zwischen verschiedenen Softwareumgebungen bei der Bildung eines Gesamtmodells.

Der Modellaufbau und das Zusammenführen der Teilmodelle zum Gesamtmodell der WZM ist relativ aufwendig und knowhow-intensiv. Deshalb wurden spezielle Methoden und Werkzeuge zur effizienten Unterstützung der Modellierung während des Maschinenentwurfs, der Inbetriebnahme und im Betrieb entwickelt.

Die entstehenden komplexen, rechenintensiven FE-Modelle müssen mit innovativen Modellordnungsreduktions-(MOR)Algorithmen (Kap. „**Rechenzeitsparende Modellierung**“) praktikabel zu rechenzeitsparenden Berechnungsmodellen reduziert werden, um die Echtzeitverarbeitung für die steuerungintegrierte Korrektur der WZM zu erlauben. Unterschiedliche Verfahren zur Reduktion der Modellgröße kommen hierzu zum Einsatz. Zur Automatisierung der MOR wird eine anwenderfreundliche MOR-Blackbox implementiert, welche die Erzeugung niedrigdimensionaler Ersatzmodelle ermöglicht.

Verhaltensanalyse von Strukturbauteilen Durch die Kombination von experimentellen und simulativen Arbeiten wird die Identifikation von Modellparametern für exemplarisch streuende sowie zeitlich veränderliche thermische Maschineneigenschaften zum effizienten Parameterabgleich effektiviert. (Kap. „**Effiziente Verhaltensanalyse von Strukturbauteilen**“).

Schließlich werden Methoden erläutert, mit denen die Sensorplatzierung für die optimale Bestimmung der erforderlichen Parameter ermittelt werden kann. Das ist eine wichtige Voraussetzung für die Beherrschung von Modellunsicherheiten (Kap. „**Datenassimilation und optimale Sensorplatzierung**“).

Die Lösungsmöglichkeiten (Abb. 7) lassen sich zusammenfassend kategorisieren in:

Kompensation thermischer Wirkungen beeinflusst den Eintrag der in Wärme umgewandelten Verlustleistungen und die Ausbildung des Temperaturfeldes. Ziel

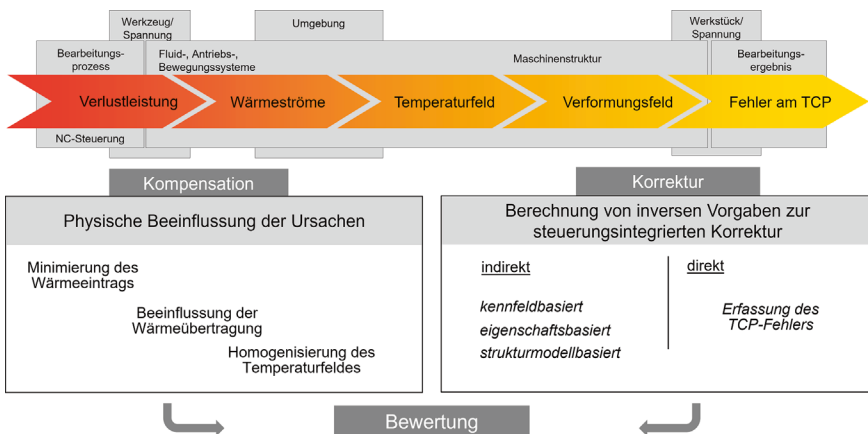


Abb. 7 Lösungsspektrum zur Reduktion thermisch bedingter Fehler

ist es, bei instationärer Belastungssituationen den Wärmeintrag zu verstetigen und das entstehende Temperaturfeld örtlich zu homogenisieren.

Korrektur thermo-elastischer Verformungen, d. h. die Fehlerwirkung im Betrieb der Werkzeugmaschine wird durch Berechnung (modellbasiert) oder Messung (messtechnisch basiert) bestimmt und durch inverse Aufschaltung stets aktualisierter Offsets auf die Lagesollwerte vorhandener Vorschubachsen korrigiert.

2.2 *Gestaltungsintegrierte Kompensation*

Bei der Auslegung von Kompensationsmaßnahmen besteht eine Herausforderung darin, dass verschiedene Baugruppen aufgrund materialspezifischer thermischer Trägheiten unterschiedlich schnell den Beharrungszustand erreichen und dass schwankende Wärmeströme vor Erreichen des Beharrungszustandes, z. B. durch Laständerung (typisch für Einzel- und Kleinserien), bewirken, dass der Beharrungszustand nur selten erreicht wird (Brand 2017).

Relevant für die Homogenisierung der Wärmeströme sind passiv wirkende Komponenten, sogenannte thermische Tilger, die keinen zusätzlichen Energieaufwand verursachen. Als thermische Tilger werden Latentwärmespeicher aus Phasenwechselmaterial-Metallschaum-Verbundstrukturen z. B. zwischen Motor und Gestellstruktur implementiert. Diese werden mit Aktoren aus Formgedächtnislegierungen zur zeitlichen Steuerung von Wärmeströmen kombiniert. Diese Lösungen können durch Heatpipes örtlichen Wärmeumverteilung ergänzt werden (Kap. „[Energieeffiziente Systeme zur aktiven Steuerung von Wärmeflüssen](#)“).

Eingangsinformationen für die Homogenisierung des Temperaturfeldes liefert u. a. die sogenannte [thermische Vorsteuerung](#). Unter Nutzung von Bearbeitungsinformationen aus dem NC-Programm werden die daraus resultierenden thermischen Lasten bestimmt und für Ansteuerung von Kompensationsmaßnahmen, z. B. der Kühlsysteme mit lastabhängigem Volumenstrom genutzt.

Die örtliche Wärmeverteilung kann auch unmittelbar an Baugruppen beeinflusst werden, wie mit der fluidischen Kühlung der Motorspindel gezeigt wird (Kap. „[Kompensationslösung fluidische Kühlung](#)“). Die Gestaltung der Kühlhülse geometrie verändert die Strömungseigenschaften des Fluids so, dass ein möglichst hoher Wärmeübergangskoeffizient bei gleichzeitig geringen dissipativen Verlusten erzielt wird.

2.3 *Steuerungsintegrierte Korrektur*

Kompensationslösungen greifen bei starken Lastwechseln nicht schnell genug (Brand 2017), was die Bedeutung von Korrekturmaßnahmen, die schneller reagieren, wachsen lässt. Stand der Technik sind Korrekturverfahren auf Basis von Korrelationsmodellen, die vor allem für die Spindelbaugruppe, aber auch ganze WZM

angewandt werden. Für die korrelative Korrektur thermischer Positionierungsfehler von Maschinenachsen werden in gängigen Steuerungen (z. B. Siemens (SIEMENS 2012), Beckhoff TwinCAT (Beckhoff 2018)) lineare Ansätze verwendet.

In den folgenden Kapiteln werden drei alternative Verfahren zur in Echtzeit ausführbaren steuerungsintegrierten Korrektur der thermisch bedingten Bewegungsfehler beschrieben.

Die Eigenschaftsmodellbasierte Korrektur (Kap. „[Eigenschaftsmodellbasierte Korrektur](#)“) benutzt als Modellgrundlage das Übertragungsverhalten zwischen prozesstypischen Belastungsgrößen, wie dem mechanischen Lastprofil und den entstehenden thermo-elastisch bedingten Verlagerungen am TCP.

Die Strukturmodellbasierte Korrektur (Kap. „[Strukturmodellbasierte Korrektur](#)“) setzt auf die hinreichend sichere und echtzeitfähige Berechnung der Temperaturverteilung und der daraus resultierenden TCP-Verlagerung in Abhängigkeit von der aktuellen Prozessführung über ein Strukturmodell. Zusätzliche Eingangsdaten können die Umgebungslufttemperatur, die Vorlauftemperatur und Volumenstrom von Kühlung und KSS-Systemen sein. Die Berechnung der Fehler am TCP erfolgt über ein Stützpunktgitter im Arbeitsraum mithilfe des thermo-elastischen FE-Modells.

Die Kennfeldbasierte Korrektur (Kap. „[Kennfeldbasierte Korrektur](#)“) bildet mit hochdimensionalen Kennfeldern den Zusammenhang zwischen Messwerten von Temperatursensoren und der TCP-Verlagerung ab.

2.4 Messtechnisch basierte Korrektur

Eine messtechnisch basierte Korrektur kann entweder mittels integrierter Deformationssensoren (IDS) (Kap. „[Online-Korrektur thermisch bedingter Verformungen mithilfe von integralen Verformungssensoren](#)“) oder berührungslos mittels markenbasierter Nahbereichs-Photogrammetrie (Kap. „[Photogrammetrisches Messmodell zur Erfassung thermisch bedingter Fehler an WZM](#)“) realisiert werden.

IDS basieren auf thermisch stabilen CFK-Stäben. Sie messen direkt die Verformung der Maschinenstruktur und übertragen prozessparallel Korrekturwerte an die Maschinensteuerung.

Mit dem photogrammetrischen Messmodell können die Relativbewegung einzelner Maschinenbaugruppen berücksichtigt werden. Die Messungen liefern den aktuellen Verlagerungszustand der Maschine und können letztlich dazu verwendet werden, die beschriebenen Korrekturansätze in ihrer Wirksamkeit und Korrekturgüte messtechnisch zu quantifizieren und zu bewerten.

2.5 Bewertung

Für die Bewertung aller Lösungsverfahren zur Korrektur bzw. Kompensation thermisch bedingter Bearbeitungsfehler hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die erreichbare Genauigkeit und Mengenleistung und den erforderlichen Aufwand für ihre Erstellung und Anwendung wird ein adäquates Bewertungsinstrumentarium entwickelt (Kap. „[Bewertungsmethodik](#)“). Dies unterstützt die unternehmens-/maschinenspezifische Auswahl bzw. Entscheidung für Einzellösungen oder Lösungskombinationen.

Die realisierten prototypischen Erprobungen der Lösungen ergaben u. a. folgende Effekte hinsichtlich der Beeinflussung des thermischen Fehlers.

Maßnahme	Umfang potenzieller Verbesserung	Erläuterung
Optimierte Kühlstrategien	10–15 %	Die Gesamtenergieaufnahme der Werkzeugmaschine kann um 10–15 % gesenkt werden
Eigenschaftsmodellbasierte Korrektur	50–70 %	
Strukturmodell-basierte Korrektur	50–80 %	Die thermisch bedingten Fehler konnten für einen Hexapoden um ca. 80 % reduziert werden
Kennfeldbasierte Korrektur	50–80 %	„Im Ergebnis erhält man mit moderatem Aufwand je nach Anwendungsfall typischerweise Verbesserungen des thermischen Fehlers um 50–80 %.“
Thermische Vorsteuerung, Kombination: Korrektur und Kompensation	>1/2	Energieeinsparpotenzial bei Kühlsystemen durch bedarfsgerechte Kühlung. (Noch in der Untersuchung)
Gesteuerter Wärmefluss (Tilger & Heatpipes)	20 %	Mittels der passiven Komponenten kann eine Verringerung des thermischen Fehlers um ca. 20 % erzielt werden

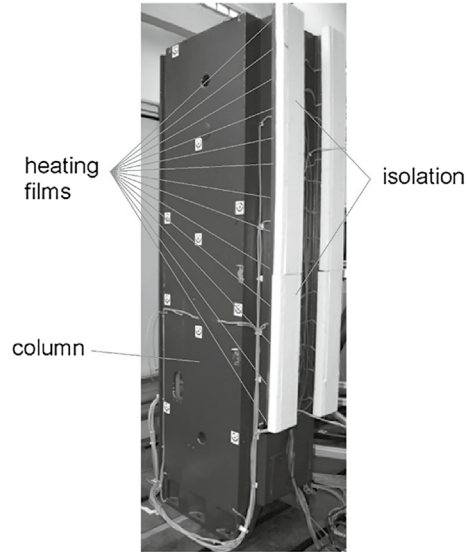
3 Charakteristik der Versuchsanlagen

Sowohl die Entwicklung als auch die Erprobung von Lösungen erfolgt an einer Reihe von Versuchsständen und Demonstratormaschinen. Diese werden an dieser Stelle beschrieben und in den folgenden Kapiteln hierauf Bezug genommen.

Auerbach-Ständer ACW630

Der Ständer der Auerbach ACW630 stammt aus einem prototypischen Bearbeitungszentrum der Firma Auerbach Maschinenfabrik GmbH. Die Ständer-Baugruppe ist im Bereich der z-Führungen mit einzeln schaltbaren, zur Umgebung hin isolierten Heizfolien versehen. Somit ist im Experiment eine Emulation einer Spindelstockfahrt, die in der Realität mit einem „wandernden“ Verlustleistungseintrag im Bereich der Führungen infolge Reibung verbunden ist, möglich (Abb. 8).

Abb. 8 Demonstrator
Fräsmaschinenständer



mobiler Demonstrator MINIHEx

Der mobile Demonstrator basiert auf einer Hexapod-Parallelkinematik einfacher Bauart mit 6 längenveränderlichen Stabachsen mit Kugelgewindtrieb (Verfahrweg 530 mm) und elektrisch angetriebenen Servomotoren. Bewegte Plattform und Gestell bestehen aus einfachen Kastenprofilen, die Anbindung der Stabachsen erfolgt über Kardangelenke. Das Bewegungsvermögen umfasst alle 6 Freiheitsgrade. Gleiches gilt für thermisch bedingte Bewegungsfehler aber auch für deren Korrigierbarkeit. Das Gestell gestattet eine flexible und sichere Dreipunktaufstellung. Eine Umhausung dient als Befestigungsbasis für Touch-Monitore sowie zur Aufnahme von Mess- und Simulationsrechnern. Der Schaltschrank enthält eine PC-basierte Steuerung (TWinCAT 3.1) sowie Antriebs- und Feldbuskomponenten (SERCOS, ProfiBus, EtherCAT). Die thermische Belastung erfolgt durch zyklisches Verfahren von Lastregimes, die gezielte Erwärmungs- und Abkühlvorgänge in der Struktur stimulieren. Zur Messung werden definierte Messposen periodisch angefahren. Zusätzliche Sensoren für Temperaturen, Verlagerungen und Verformungen liefern Messwerte, die als Vergleichs- und Referenzgrößen dienen. Die kommerzielle Steuerung bietet große Offenheit und damit bestmögliche Flexibilität für funktionelle Erweiterungen und Ergänzungen sowie den Zugriff auf steuerunginterne Daten.

Versuchsträger MAX

Der Versuchsträger MAX ist durch Leichtbauweise und Aluminiumstrukturen mit geringen thermischen Kapazitäten sowie großen Wärmeausdehnungskoeffizienten gekennzeichnet. Durch die strukturintegrierten ungekühlten Lineardirektantriebe sind hohe lokal veränderliche Wärmeeinträge realisierbar. Er realisiert eine dreiachsige kartesische Kinematik mit allen Bewegungen auf der Werkstückseite.

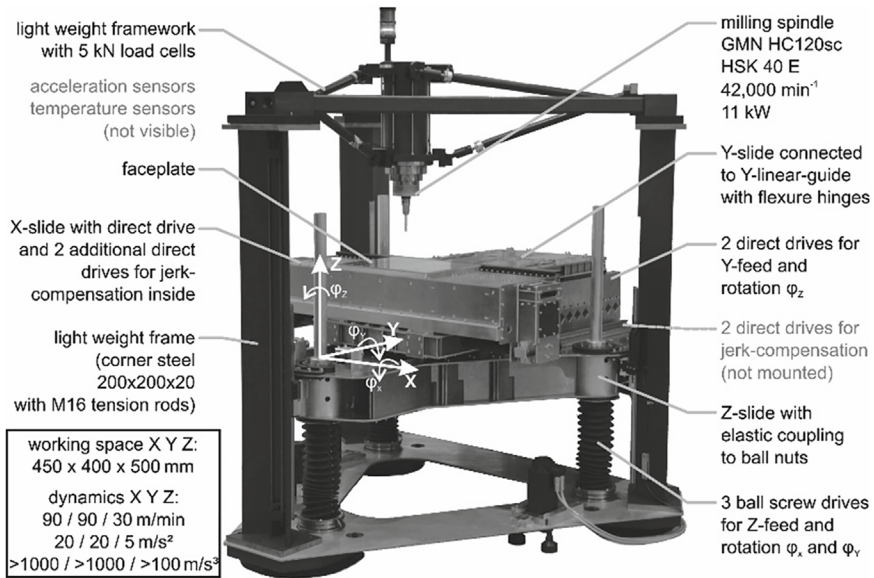


Abb. 9 Versuchsträger MAX

Für die Bewegung in X- und Y-Richtung kommen im Kreuzschlitten eisenlose Lineardirektantriebe zum Einsatz. Die redundanten Antriebe in Y- und Z-Richtung ermöglichen in Verbindung mit der elastischen Kopplung der beweglichen Baugruppen über Festkörpergelenke die Ausführung von Korrekturbewegungen in allen drei rotatorischen Freiheitsgraden φ_x , φ_y , φ_z . Das Maschinengestell des Versuchsträgers ist in Leichtbauweise aus 3 Stahl-Winkelprofilen aufgebaut. Ein Leichtbau-Stabwerk trägt die Frässpindel und ermöglicht mit in den Stäben eingebauten Kraftmessdosen die Kraft- und Momentenmessung am TCP in allen Richtungen (Abb. 9).

Die Steuerung des Versuchsträgers wird mit dem PC-basierten System TwinCAT 3.1 von Beckhoff realisiert. Als Feldbus kommt EtherCAT zum Einsatz. Die Bahngenerierung und das Loggen von Daten übernimmt eine übergeordnete Bedienoberfläche (BOF), die am IWM entwickelt wurde. Über die ADS-Schnittstelle (Automation Device Specification) erfolgt die Kommunikation zwischen Bedienoberfläche und TwinCAT. Dabei stellt ADS Ports für verschiedene Bereiche im TwinCAT-System zur Verfügung. So erfolgt die Sollbahnvorgabe und umgekehrt das Loggen von Daten über einen ADS-Port zur TwinCAT PLC. Zur Bestimmung des Temperaturfelds wurden allein in X-, Y- und Z-Schlitten 36 Pt100 Temperaturfühler appliziert. Sämtliche Messdaten werden mit EtherCAT-Modulen erfasst und können zentral auf der Maschinensteuerung (BOF) geloggt werden.

DMU 80 eVo

Die DMU 80 eVo ist ein 5-Achs-Vertikal-Bearbeitungszentrum von Deckel Maho. Ihr Arbeitsraum beträgt ca. $850 \times 650 \times 550$ mm. Die Maschine ist werkseitig mit acht Temperatursensoren ausgerüstet, s. Abb. 10.

Die Pilotmaschine DMU 80 eVo ist mit einem Heidenhain TS 460 Messtaster ausgerüstet, der als Werkzeug eingewechselt werden kann, s. Abb. 11. Mit dem Messtaster können kalibrierte Messobjekte auf dem Werkzeuggestisch vermessen werden. Durch wiederholte Vermessung solcher Objekte bei unterschiedlichen Temperaturzuständen kann der Messtaster zur Untersuchung der thermischen Genauigkeit der Maschine verwendet werden.

Die untersuchte DMU 80 eVo besitzt eine Siemens 840D sl Steuerung und wird über die DMG Celos Benutzeroberfläche bedient.

DBF 630/800

Die DBF 630/800 von Dörries Scharmann ist ein vertikales Bearbeitungszentrum mit den Anwendungsbereichen Drehen, Bohren und Fräsen. Die technischen Daten der Maschine sind in Tabelle dargestellt (Tab. 1).

Eine Beschreibung der fluidischen Systeme ist im Kap. „[Kompensationslösung fluidische Kühlung](#)“ gegeben (Abb. 12).

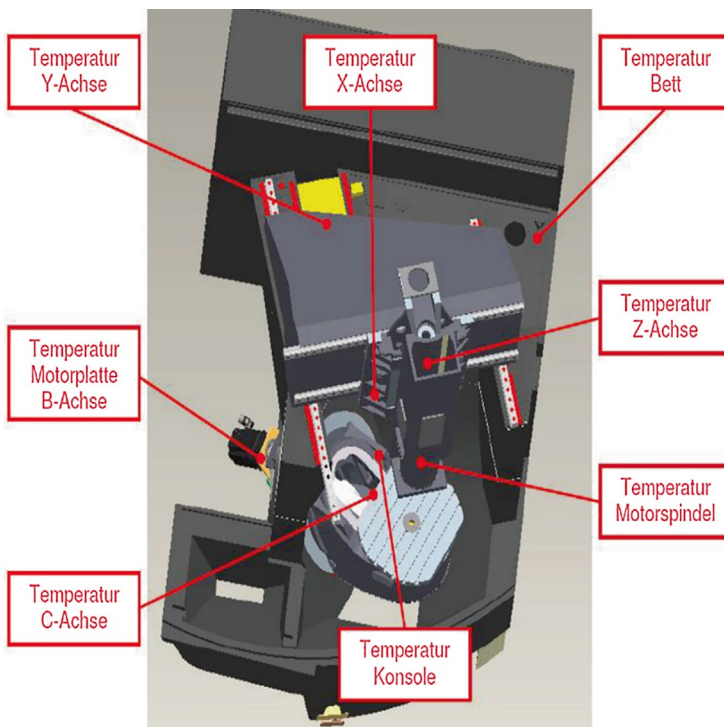


Abb. 10 Temperatursensoren der DMU 80 eVo



Abb. 11 Objekt-Vermessung mit Heidenhain Messtaster

Tab. 1 Kenndaten der DBF 630

X-Achse	850 mm
Y-Achse	700 mm
Z-Achse	800 mm
Tisch/Palettengröße	630 × 630 mm
Max. Drehmoment	1700 Nm
Drehzahl Bohren/Fräsen	3500 min ⁻¹
Drehzahl Drehen	500–1200 min ⁻¹
Antriebsleistung	35 kW



Abb. 12 Scharmann DBF 630

Literatur

- Beckhoff Information System – TwinCAT CNC Überblick. <https://infosys.beckhoff.com/index.php?content=../content/1031/axiscompensation/html/allgemein.htm&id=875048855246504301>. Zugegriffen: 29. Okt. 2018
- Bräunig M, Regel J, Richter C, Putz M (2018) Industrial relevance and causes of thermal issues in machine tools. In: conference proceedings, 1st Conference on Thermal Issues in Machine Tools. Wissenschaftliche Scripten, Auerbach/Vogtl, S 127139
- Brand M (2017) Thermisches Verhalten von Werkzeugmaschinen. In: Teilnehmerunterlagen zum Workshop „Klimazelle(4) – klimatische Effekte beherrschen“. Chemnitz
- Brecher C, Jasper D, Wennemer M (2016) Thermo Energetic Design of Machine Tools and Requirements for Smart Fluid Power Systems. 10. Internationales Fluidtechnik-Konferenz. Dresden
- destatis 2022 Statistisches Bundesamt, März 2022, destatis.de, 173637
- Großmann K (2016) Die Entwicklung spanender Werkzeugmaschinen. <https://voge-online.de/wp-content/uploads/2016/12/Entwicklung-WZM-Teil-1.pdf>
- Kinkel S (2005) Anforderungen an die Fertigungstechnik von morgen. Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung. PI-Mitteilungen 37(2005), Fraunhofer Publica
- SIEMENS (2012) SINUMERIK 840D sl / 828D – Erweiterungsfunktionen. 1034
- VDW 2022: Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V. (VDW) (2022) Marktbericht 2021, Die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie und ihre Stellung im Weltmarkt. Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt a. M.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

