



DWM e. V. Dresdner Freundeskreis  
der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik

---

## **Tagungsband**

16. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar

# **Tradition und Gegenwart bei der Analyse des thermischen Verhaltens spanender Werkzeugmaschinen**

Gewidmet dem 100. Geburtstag von  
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Horst Berthold

21. und 22. März 2013 Dresden



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

Institut für  
Werkzeugmaschinen  
und Steuerungstechnik



# **Thermik-Forschung und die Umsetzung der Erkenntnisse in Maschinenkonzepten bei DMG**

Dr.-Ing. Hans-Peter Schossig

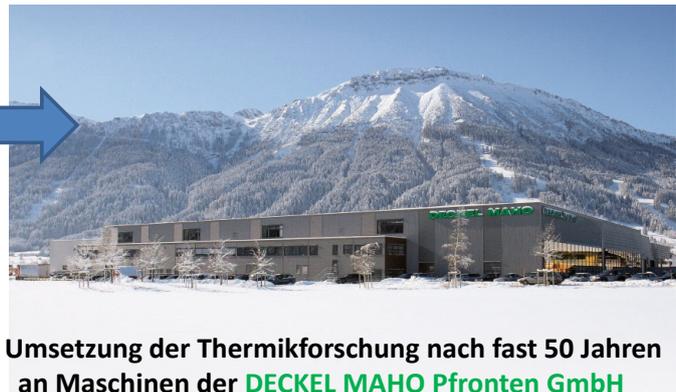
DMG, Pfronten

„Thermik- Forschung und die Umsetzung der Erkenntnisse in Maschinenkonzepten bei DMG“ oder

„Versuch einer Korrelation zwischen Thermikforschung der Vergangenheit zu deren Umsetzung in der Gegenwart“



Beginn der Thermikforschung 1964



Werdegang Hans- Peter Schossig (Jahrgang 1938),  
ermöglicht durch Ausbildung am damaligen Institut für Werkzeugmaschinen der TU Dresden  
unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Horst Berthold

- 1960- 1965 Nach Abi und Werkzeugmacher- Lehre bei Carl Zeiss Jena Studium an der TU Dresden, Fachrichtung Werkzeugmaschinen, Überlassung des Diplom- Themas „**Wärmedeformationen an Werkzeugmaschinen**“ durch Prof. Dr.- Ing. habil. Dr. h. c. Horst Berthold,
- 1965- 1970 Konstrukteur und Assistent am Institut für Werkzeugmaschinen der TU Dresden, Dissertation „**Untersuchungen über Wärmedeformation an Werkzeugmaschinen unter Nutzung der Modelltechnik**“ (Verteidigung 1971)
- 1970- 1983 Zentrum für Forschung und Technik Robotron Dresden, zuletzt Leitung des Labors Technologieentwicklung Plattenspeicher
- 1983- 2003 DECKEL MAHO Pfronten GmbH (vormals MAHO) Projektleiter in Konstruktion und Technischem Vertrieb
- Ab 2003 beratende Tätigkeit für die DECKEL MAHO Pfronten GmbH

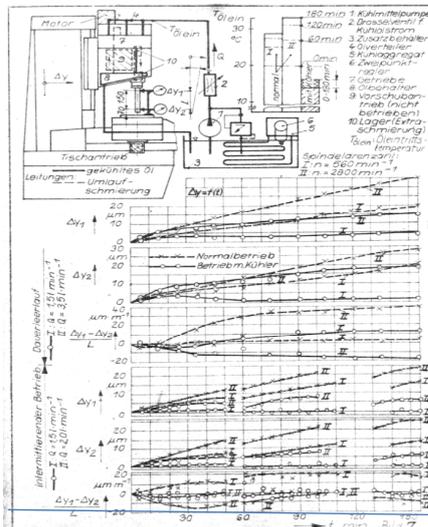
Noch heute bin ich für die sehr gute Ausbildung dankbar, die ich an der TU Dresden und speziell am damaligen **Institut für Werkzeugmaschinen** unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Horst Berthold erhalten habe !

Abschnitte der Dissertation H.-P. Schossig:

- Experimentelle Maschinenuntersuchungen (Temperatur-u. Verlagerungsmessungen, Maßnahmen zur Verhinderung oder Ausschaltung von Wärmedeformationen)
- Thermikbestimmung an Bauteilen u. Baugruppen durch Anwendung der Modelltechnik (Untersuchungen an physikalischen und elektrischen Modellen)
- Praktische Einsatzmöglichkeiten der Modellierungsmethoden

**Versuch einer Korrelation (Beispiel Kühlmaßnahmen)**

- **TU Dresden- Ergebnisse vor 43 Jahren**
- **Umsetzung an DMG-Maschinen**

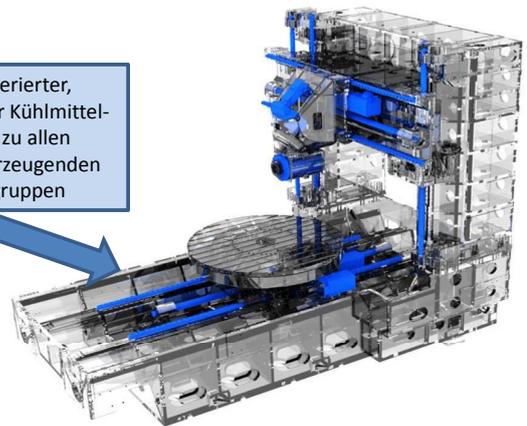


21.03.2013

Schossig:Thermikerkenntnisse bei DMG

Temperierter, geregelter Kühlmittelfluss zu allen wärmeerzeugenden Baugruppen

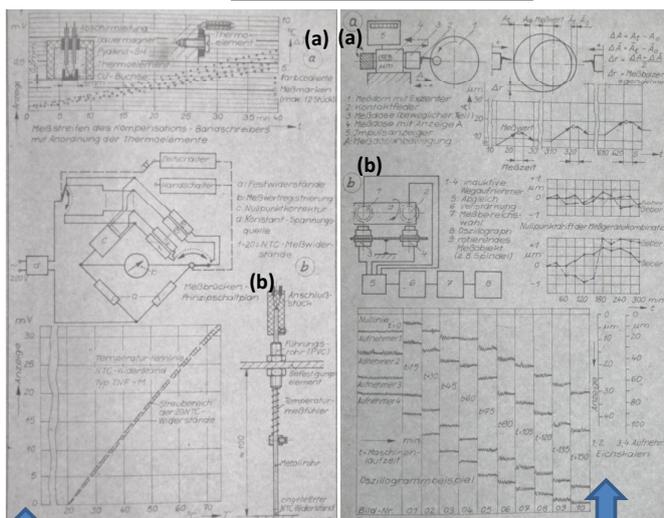
Einfluss der Ölkühlung auf Relativbewegung Spindel-Tisch



Gebaut ab 2013 bei DECKEL MAHO Pfronten in Zusammenarbeit mit ... machines im DMG MORI SEIKI Konzern : **Portalfräszentrum ... 210**

**Anordnung zur Messung von Temperaturen und Verformungen zur Ermittlung des Thermikverhaltens von Werkzeugmaschinen**

- **TU-Ergebnisse vor 43 Jahren**
- **Umsetzung an DMG-Maschinen**



Thermoelemente (a) und Thermistoren (b), Messbrücke und Eichung, Messstreifen eines Kompensationsbandschreibers

Relativverschiebungs-Messung -mit „Maschinengütemesser“(a) -mit induktiven Wegaufnehmern(b)

Thermische Verlagerungsmessung nach ISO 230-6



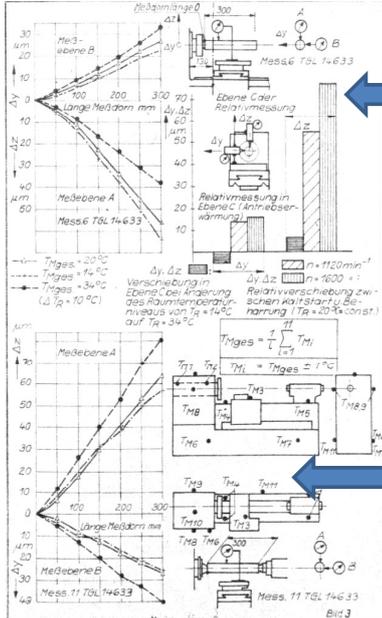
Automatische Werkzeug-Vermessung im Arbeitsraum mit Laser oder Taster



# Einfluss von Niveauschwankungen der Umgebungstemperatur auf die kinematische Genauigkeit der Werkzeugmaschinen

## ➤ TU-Ergebnisse vor 43 Jahren

Dissertations-Annahme: Getrennte Untersuchungen der inneren und äußeren Temperatureinflüsse  
Nachweis der „Superponierbarkeit“ von Temperaturverteilungen



**Temperierungsraum: Niveauschwankungen zwischen 14 °C u. 34°C (+/-1°) ergaben T<sub>ges</sub> Maschine als Beharrungs- Temperatur. Δ T<sub>ges</sub> - Auswirkungen auf Relativ- Verschiebungen Schneide Werkstück gering (Einfluss gegenüber innerer Maschinenwärme als vernachlässigbar angenommen)**

Dissertations-Ziel war: Durch die „Superponierbarkeit“ von Temperaturverteilungen wurde bei allen Deformations-Ermittlungen die Umgebungstemperatur = 20°C angesetzt

## ➤ Umsetzung an DMG-Maschinen

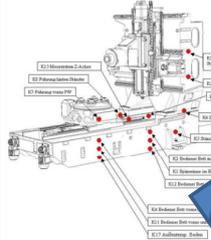
Auswirkungen Klimakammer-Umgebungstemperatur-Niveauschwankungen

Klimakammer zur Untersuchung des thermischen Verhaltens 27.1.2013 5

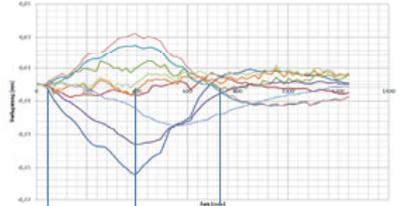
### Klimaraum Temperaturprüffeld

UNTERSUCHUNG VON TEMPERATUREINFLÜSSEN

- Wärmeanalysen im Bereich 15°C - 50°C
- Komponententests wie z.B. Kühlaggregate, Elektronik
- Funktions tests wie z.B. Tropfenbedingungen bis 50°C
- Tests von Kühl- und Kompensationskonzepten

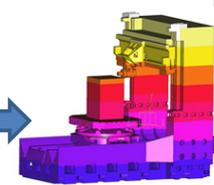


Beispiel für Messung (Verlagerung an verschiedenen Messpunkten in den verschiedenen Richtungen)



Anordnung Temperaturfühler

Modellierung des Temperaturgradienten



Berechnung der resultierenden Verlagerung

T<sub>umg</sub>: 20-40°C



Simulation durch Einflüsse der Schichten verschiedener Umgebungstemperaturen (*instationär* seit proE-Einsatz ab 2000 möglich)

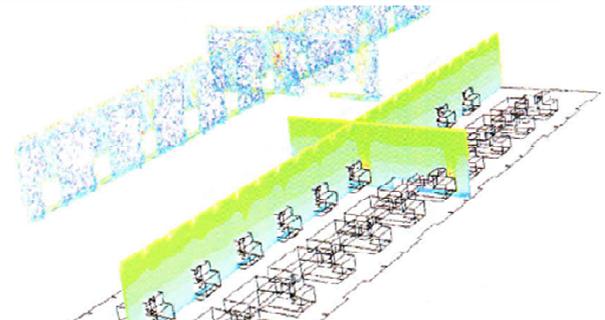
21.3.13  
Schossig:Thermikerkenntnisse bei DMG

## Klimatisierung Montagehalle bei DECKEL MAHO in Pfronten Ergebnis T<sub>umgebung</sub> = 21 °C +/- 1 °C

6



3D Simulation des Luftstroms



3D Temperaturverteilung



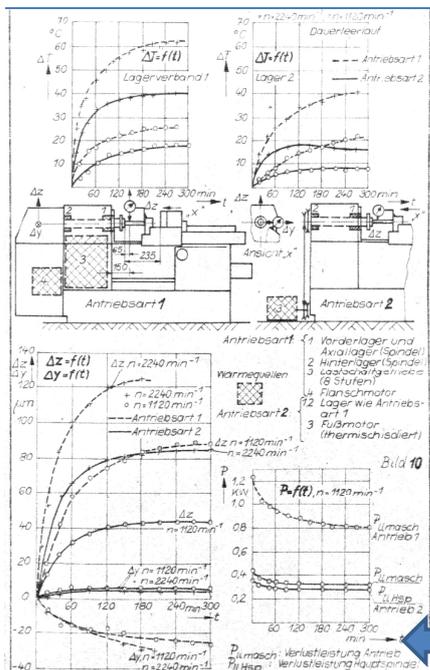
Thermisch aktivierte Bodenplatte

### Konvektionskühlung – das Raumklima-Konzept für die Halle L&M

- Temperatur 21° , +/- 1°
- Die Luft wird über seitliche Kühleinrichtungen mit Hilfe von Grundwasser heruntergekühlt
- Die Verteilung der abgekühlten Luft basiert auf dem Prinzip der Schwerkraft
- 75% reduzierte der Unterhaltskosten durch Nutzung von Schwerkraft und Grundwasser

# Langzeitversuche zur Ermittlung konstruktiver Einflüsse auf das Thermikverhalten von Maschinen

## TU-Ergebnisse vor 43 Jahren



21.03.2013

Schossig: Thermikerkenntnisse bei DMG

## Umsetzung an DMG-Maschinen

Erfassung von Verlagerungen an verschiedenen Messpunkten mit gleichzeitiger Temperaturmessung

**DECKEL MAHO**  
Präzision GmbH

**Temperaturkompensation**

Langzeitversuch zur Ermittlung des thermischen Verhaltens 27.1.2013 22

**3D-Vermessung mit 2 Kalibrierkugeln**

**Versuchsablauf:**

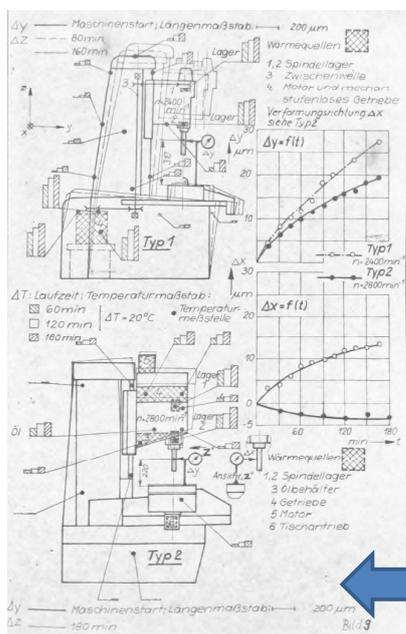
- Positionen der Kalibrierkugeln oben und unten werden mit Messtaster bestimmt
- Zwischen den Messungen wird das NC-Programm Daimler-Teil 3D-Teil abgearbeitet
- Die Messungen wurden im Abstand von ca. 23min. durchgeführt
- Z-Abstand Messkugeln Oben/Unten= 365mm
- X-Abstand Messkugeln Links/Rechts = 610mm

**Konstruktionshinweise: Antriebsanordnung bewirkt unterschiedliche Spindelverlagerungen an Drehmaschine**

7

# Einfluss der Lage innerer Wärmequellen am Beispiel von Fräs-/Bohrmaschinen

## TU-Ergebnisse vor 43 Jahren



21.03.2013

Schossig: Thermikerkenntnisse bei DMG

## Umsetzung an DMG-Maschinen

Ermittlung des thermischen Verhaltens eines 5-Achs-Fräszentrums (Typentest)

**1. Achsen:** Verfahren der Achsen mit einem Bearbeitungsprogramm und Messung der Verlagerung X,Y,Z ✓

**2. Hauptspindel** ✓

Das Diagramm zeigt die Abweichung (Verlagerung) des Messdorns von den berührungslosen Wegaufnehmern:

Messung der Verlagerung der Maschine durch ein Belastungsspektrum der Hauptspindel nach DIN 8602 mit Kompensation

**berührungslose Wegaufnehmer**

**3. Untersuchungen in der Klimakammer:** Genauigkeitsmessungen bei 30° u. 40° C Umgebungstemperatur ✓

**4. Schaltschranktemperatur:** Messung der Schaltschrankinnentemperatur gemessen: 30-35° C (max. zulässig 40° C) ✓

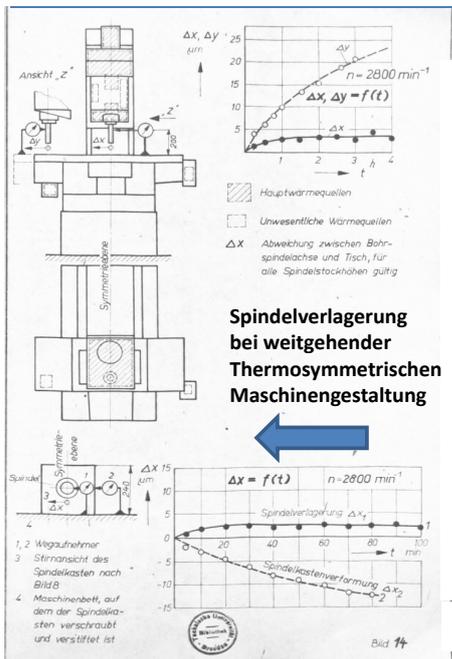
**5. Kühlmittelvolumenströme:** Hauptspindel: V= 14 l/min ( Vorgabe V=10 l/min) ✓

**Konstruktionshinweis: Wärmequellenlage und ihre Auswirkungen auf Wärmedeformationen eines Lehrenbohrwerks**

8

# Kompensation von Wärmedeformationen innerhalb der Maschine: Thermosymmetrie

## TU-Ergebnisse vor 43 Jahren



21.03.2013

Schossig: Thermikerkenntnisse bei DMG

## Umsetzung an DMG-Maschinen

### Thermosymmetrischer Maschinenaufbau

27.1.2013 7

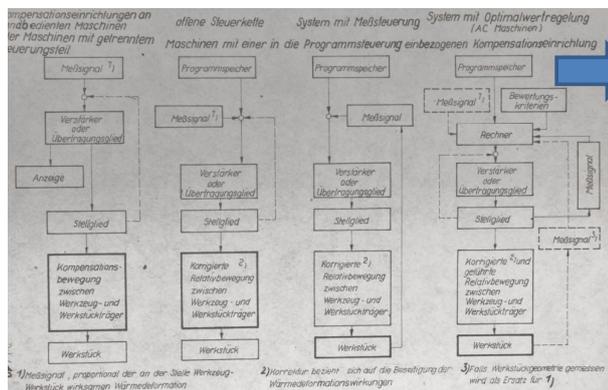
Für alle Baureihen

monoBLOCK	duoBLOCK	Portal
<b>Anordnung der Temperaturfühler für Kompensation</b> 1 Spindelkompensation - Linearkompensation (Linearisierung über Tabellen) 2 Mehrfühlerkompensation (Ständer-Umgebung) 3 Schlitzen 4	<b>Anordnung der Temperaturfühler für Kompensation</b> 1 Spindelkompensation - Linearkompensation (Linearisierung über Tabellen) 2 Setzkompensation	<b>Anordnung der Temperaturfühler für Kompensation</b> 1 Spindelkompensation - Linearkompensation (Linearisierung über Tabellen) Neu bei 240 P/U (damals kundenspezifisch): Querträger 2 und Umgebung 3 für Kompensation in Y-Richtung

9

## Ordnungsgesichtspunkte bei Kompensationseinrichtungen: Damalige Vorstellungen in der Dissertation - eingereicht am Institut für Werkzeugmaschinen der TU Dresden vor 43 Jahren

### Vorstellungen vor 43 Jahren



**Ordnungsgesichtspunkte entsprechend dem damaligen Stand der Technik!**

21.03.2013

Schossig: Thermikerkenntnisse bei DMG

### Umsetzung heute an DMG-Maschinen

#### Mehrfache Anwendungen schon in der Grundausführung aller DECKEL MAHO Maschinen

Für alle Baureihen

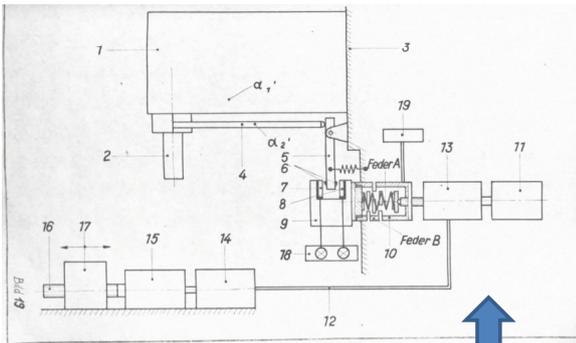
monoBLOCK	duoBLOCK	Portal
<b>Anordnung der Temperaturfühler für Kompensation</b> 1 Spindelkompensation - Linearkompensation (Linearisierung über Tabellen) 2 Mehrfühlerkompensation (Ständer-Umgebung) 3 Schlitzen 4	<b>Anordnung der Temperaturfühler für Kompensation</b> 1 Spindelkompensation - Linearkompensation (Linearisierung über Tabellen) 2 Setzkompensation	<b>Anordnung der Temperaturfühler für Kompensation</b> 1 Spindelkompensation - Linearkompensation (Linearisierung über Tabellen) Neu bei 240 P/U (damals kundenspezifisch): Querträger 2 und Umgebung 3 für Kompensation in Y-Richtung

Kompensationseinrichtungen für weitgehenden Reduktion der Wärmedeformationen sind bei DECKEL MAHO seit Jahrzehnten Ausrüstungs-Standard

10

# Ausgleich von Wärmedeformationen innerhalb der Maschine durch verschiedene Kompensationseinrichtungen

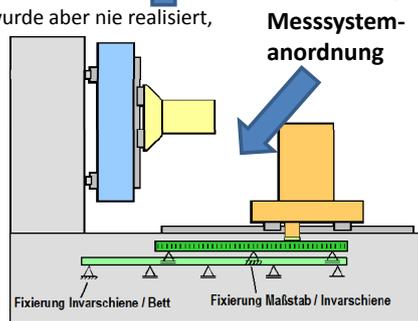
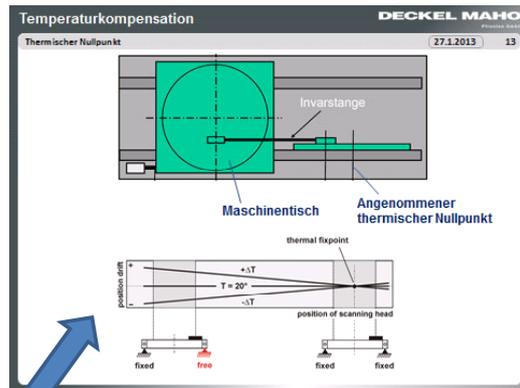
## ➤ TU-Ergebnisse vor 43 Jahren



### Ausführungsbeispiel einer Kompensationseinrichtung in der Dissertation

(zwar als DDR- Patent anerkannt, wurde aber nie realisiert, vielleicht war das auch besser so)

## ➤ Umsetzung an DMG-Maschinen



21.03.2013

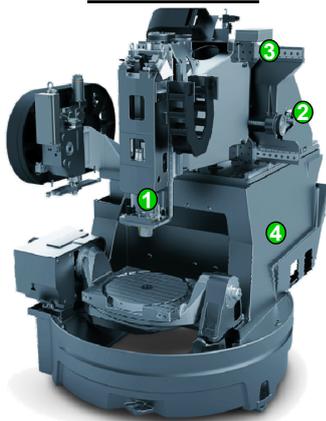
Schossig:Thermikerkenntnisse bei DMG

27.1.2013

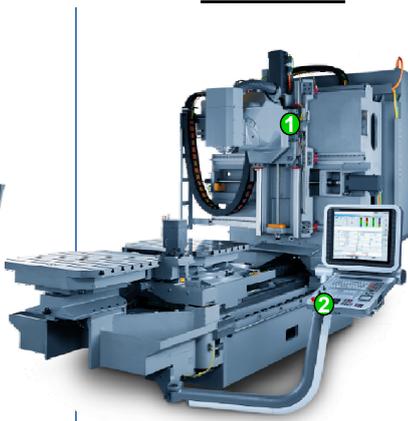
12

## Kompensationseinrichtungen für Wärmedeformationen bei DECKEL MAHO sind Standard

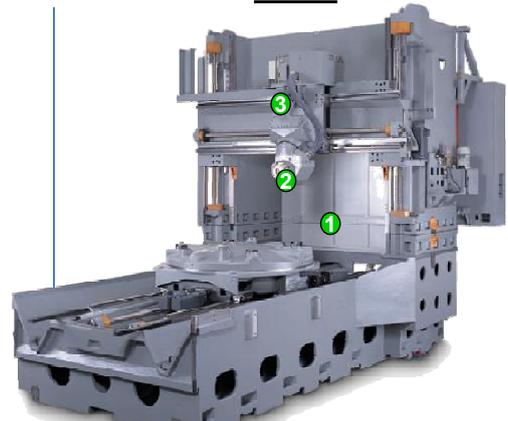
### monoBLOCK



### duoBLOCK



### Portal

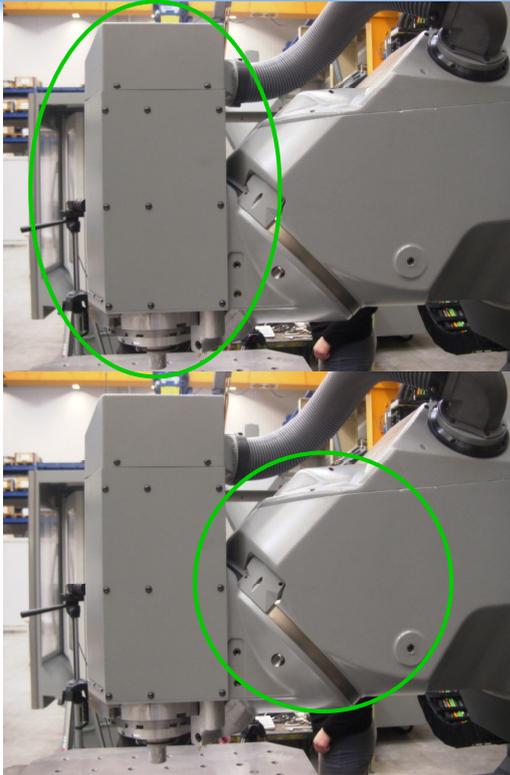


## Mehrfache Anwendungen schon in der Grundausführung aller Maschinen-Baureihen

- ① Spindelkompensation = Linearkompensation (Linearisierung über Tabellen)
- Mehrfühlerkompensation (Ständer ④ Umgebung ③ Schlitzen ) ②

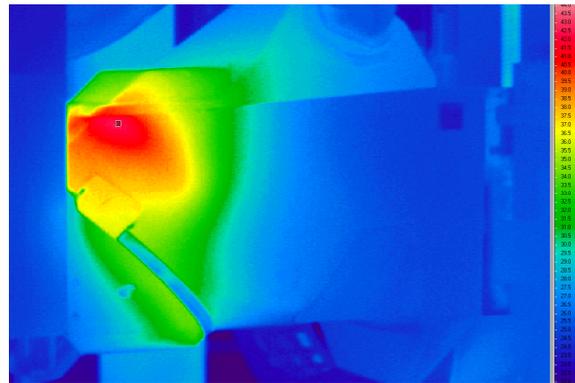
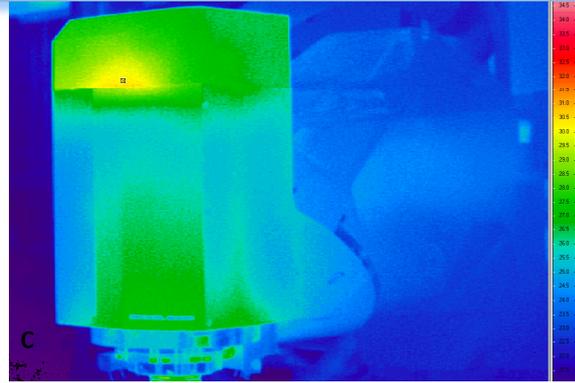
- ① Spindelkompensation = Linearkompensation (Linearisierung über Tabellen)
- ② Bettkompensation

- ① Spindelkompensation = Linearkompensation (Linearisierung über Tabellen)
- Neu bei 340 P/U (derzeit kundenspezifisch): Querträger (② und Umgebung ( ) ③ für Kompensation in Y-Richtung



21.03.2013

Schossig:Thermikerkenntnisse bei DMG



➤ Umsetzung an DMG- Maschinen: Wärmegangkompensation unter Einsatz der CNC

**1. Spindelkompensation mit Linearisierung über Tabelle (Standard bei allen Maschinen)**

- Funktion:
- Vier Temperaturpunkte, Achsenkompensation abhängig von Kopfstellung und Maschinentyp
  - Werte sind in einer Tabelle hinterlegt und werden pro Maschinen- und Spindeltyp ermittelt
  - Glättung der Temperatur und des Kompensationswertes statt
  - Sensorverwendung an der Spindel (in der Regel auf dem hinteren Lagergehäuse)
  - Hauptkompensation in Richtung Werkzeugachse, abhängig von Maschine auch in X- oder Y- Achse

**2. Bettkompensation mit Linearisierung über Tabelle (Standard bei duoBLOCK)**

- Funktion:
- Zusätzlicher Temperatursensor am Maschinenbett, zwei Temp.-Sensoren werden miteinander verrechnet
  - Kompensation für Bett wird analog Punkt 1 durchgeführt (eigene Tabelle mit Stützpunkten)
  - Spindelkompensation (Punkt 1) ist ebenfalls wirksam

**3. Mehrfühlerkompensation mit dynamischer Verrechnung (Standard bei monoBLOCK):**

- Funktion:
- Verrechnung in den einzelnen Achsen:
    - a) X-Achse: Entstehenden Verlagerungen bleiben innerhalb von 0,02 mm und werden nicht korrigiert.
    - b) Y-Achse: Die Verlagerung in Y-Richtung wird mit einem Umgebungstemperaturfühler in der Kabine innen hinten ( vor Luftzug geschützt) korrigiert. Formel:  $Y = -165 + 6,5 * T4$
    - c) Z-Achse: Zur Kompensation der Z-Richtung sind 2 Fühler im Einsatz. Der erste Fühler (Y-Schlitten oben vorne) ist für die „schnellen“ Temperaturänderungen (Verlagerungen) zuständig, der zweite Fühler (Ständer oben Mitte) für die „langsamen“ Temperaturänderungen (Verlagerungen). Die Kombination ermöglicht die Korrektur der gegenläufigen Bewegungen in der Z-Verlagerung: Formel:  $Z = +166 + 17 * T2 - 25 * T3$
  - Glättung der Eingangstemperaturwerte und der Ausgangskompensationswerte
  - Es findet keine Linearisierung über Tabelle sondern eine dynamische Berechnung anhand der Temperatur und Gewichtung der Sensoren statt, es werden 4 Sensoren verwendet

**4. Kompensation von Y-Achse (Querträger Portalmaschine) mit Linearisierung über Tabellen**

(bei Portalmaschine DMU 340 P/U, kundenspezifisch, bisher in Einzelfällen)

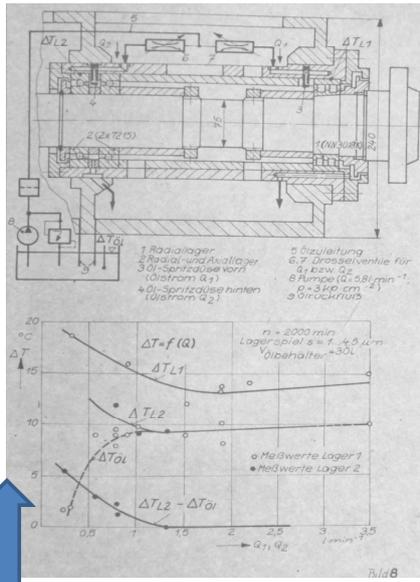
- Funktion:
- Zwei zusätzliche Sensoren (Umgebungstemperatur und an Sensor an Querträger)
  - Werte für beide Sensoren in eigenen Tabellen hinterlegt
  - Glättung der Temperatur- und Kompensationswerte,drei Temp.sensoren miteinander verrechnet
  - Zusätzlich Spindel- Kompensation entsprechend Punkt 1

21.03.2013

Schossig: Thermikerkenntnisse bei DMG

# Kompensation von Wärmedeformationen innerhalb der Maschine: Statt Kühlöl im Lagerbereich jetzt Sensorregelung zur Verlagerungsreduzierung

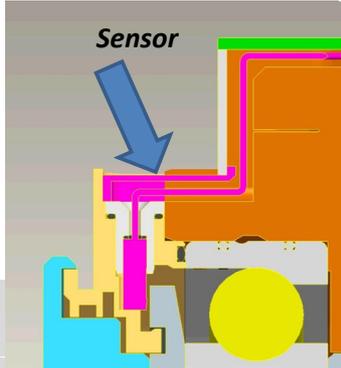
## ➤ TU-Ergebnisse vor 43 Jahren



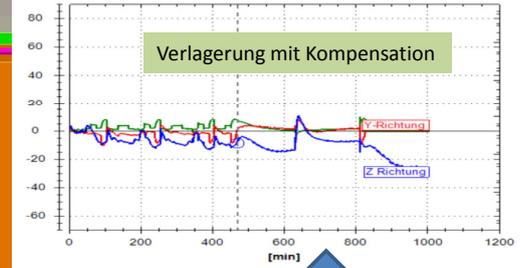
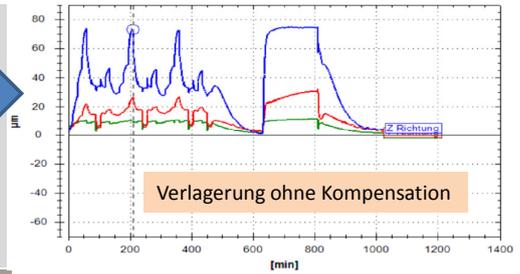
Lagertemperatur vorn und hinten in Abhängigkeit vom Kühlölstrom in einem Drehmaschinen- Spindelkasten (n= 2000 U/min)

## ➤ Umsetzung an DMG-Maschinen

- Ermittlung der Verlagerung des Rotors zum Stator
- Kompensation von thermisch bedingter Längenänderung und von drehzahlbedingter Verlagerung



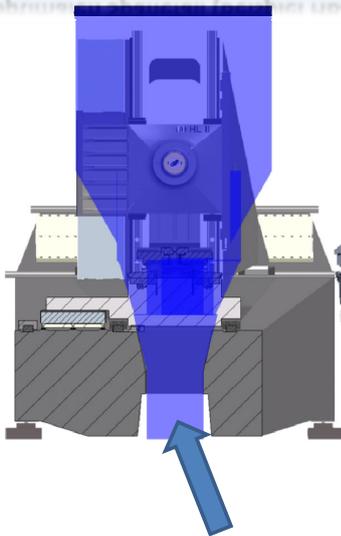
Spindelverlagerungskompensation mittels Sensorregelung



DRESKEL MAHO

# Konstruktive Maßnahmen gegen Wärmeeinbringung durch Späne

Arbeitsraum- Gestaltung für optimalen Spänefall (Beispiel HBZ)



- Optimaler zentraler Spänefall „V-Anordnung“ für Späneabführung
- Mittige Späneförderer/Spänerutsche
- 60° steile Kabinenwände für Trockenbearbeitung

Ergänzende Maßnahmen:

- Steile Y-Abdeckung (35°), steile Innenwände (Bild 1)
- Spänespiralen isolieren gegen Bett (Bild 2)
- Flüssigkeitsgekühlte X-Vorschubspindel (Bild 3)
- ➔ Keine Spänenester
- ➔ Keine Wärmeeinfuhr über Späne in das Bett
- ➔ Keine Wärmeeinführung in den X- Weg- Block
- >> Hohe Maschinengenauigkeit
- Geeignet für MMS und Trockenbearbeitung

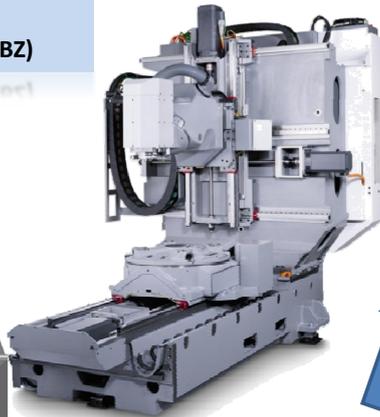


Bild 1

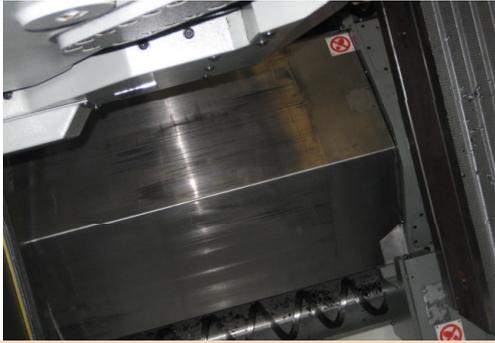


Bild 2

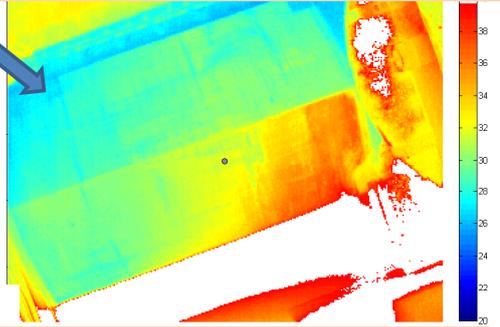


Bild 3

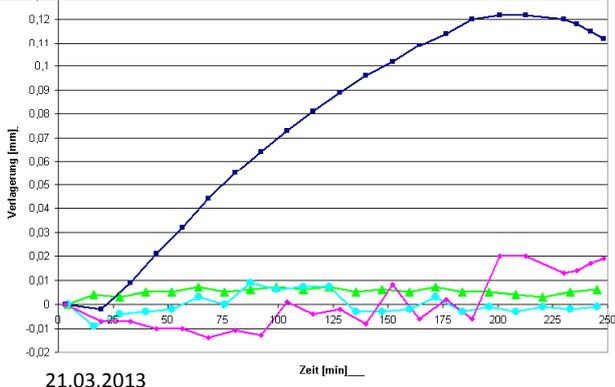
Ergänzung zur Abführung der Spänwärme an DECKEL MAHO- Maschinen: Beeinflussung durch massiven Wärmeeintrag über Späne (extreme Zerspantung, ohne KSS) – in der Arbeit bis 1970 an der TU Dresden keine entsprechenden Untersuchungen im Institut für Werkzeugmaschinen



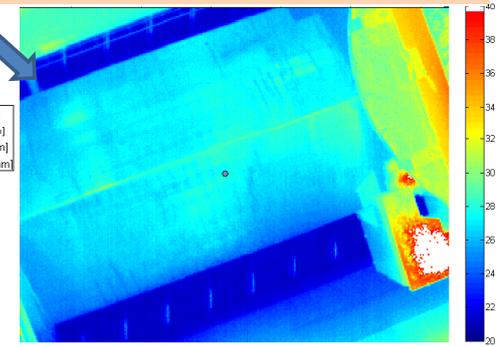
Starke einseitige Erwärmung durch Eilgang, B-Achse und Spindel (Beobachtungsdauer 3h)



Vergleich Verlagerung X- und Y- Achse mit und ohne Spänespülung



Abhilfe durch Bettspülung trotz Trockenbearbeitung (Beobachtungsdauer 3h)

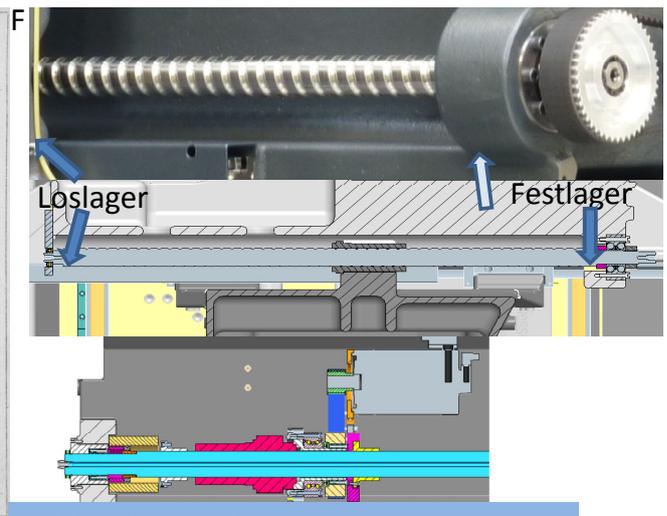
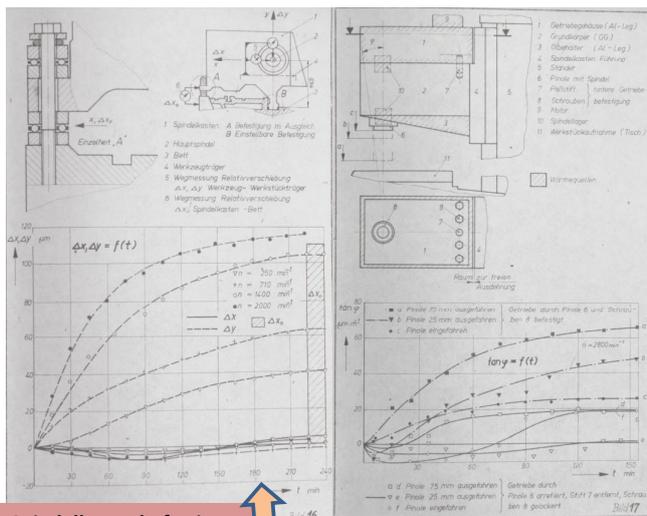


21.03.2013 Schossig:Thermikerkenntnisse bei DMG

Kompensation von Wärmedeformationen innerhalb der Maschine: Auswirkung von Bauteilbefestigungen bzw. Fest- und Loslager-Anordnung

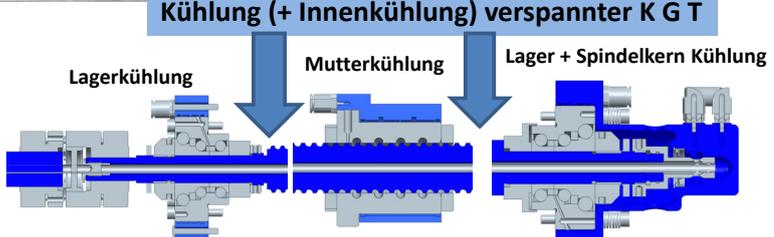
TU-Ergebnisse vor 43 Jahren

Umsetzung an DMG-Maschinen



Spindelkastenbefestigung in Auswirkung auf Spindelverlagerung an Drehmaschine

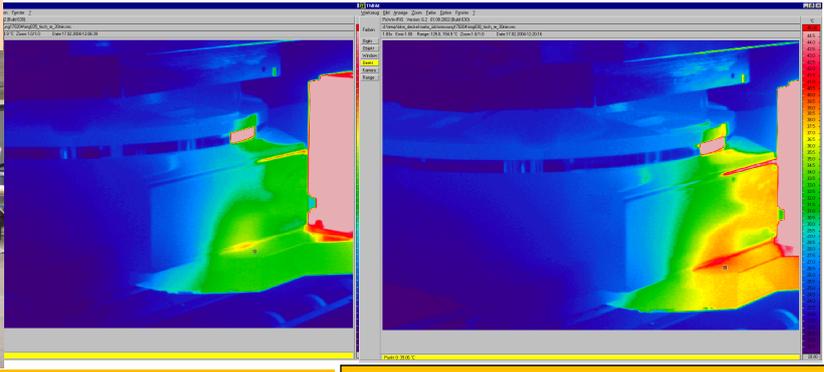
Getriebebefestigung in Auswirkung auf Spindelverlagerung am Lehrenbohrwerk



21.03.2013 Schossig:Thermikerkenntnisse bei DMG

## Kühlmaßnahmen am Maschinentisch mit Vorschubmotor an duoBLOCK-Baureihe von DECKEL MAHO Pfronten (wichtig bei Fräs- Drehtischen mit Torquemotor)

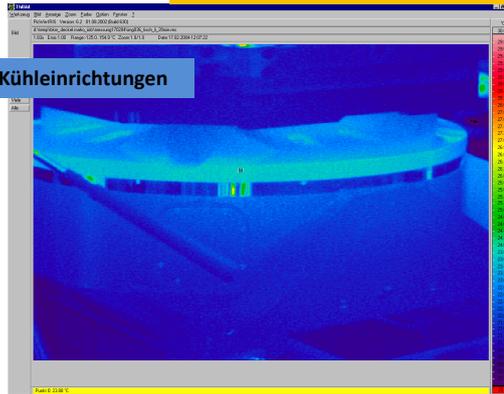
Einsatz Wärmebildkamera schon vor etwa 15 Jahren



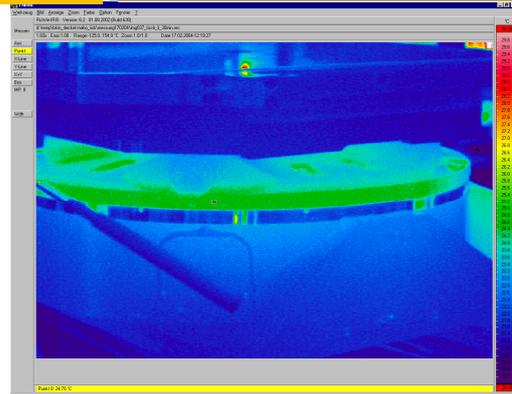
Erwärmung nach 20 min (Vergleichspunkt 34,8 °C)

Erwärmung nach 30 min (Vergleichspunkt 39,1 °C)

Erwärmung mit Kühleinrichtungen

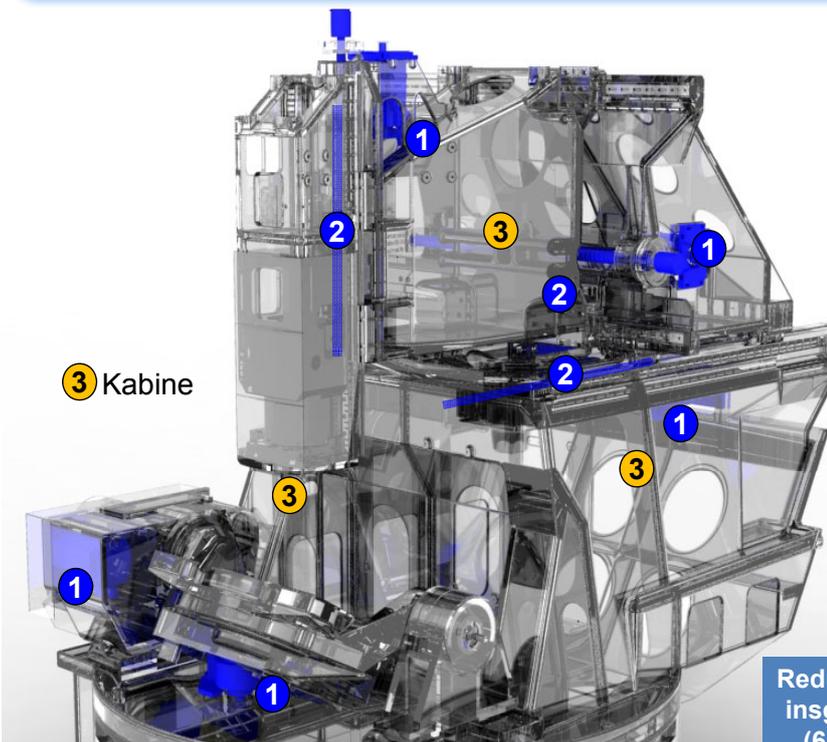


Erwärmung nach 20 min (Vergleichspunkt 23,8 °C)



Erwärmung nach 30 min (Vergleichspunkt 24,7 °C)

## Maximale Temperatur-Einflusminderungen schon bei den „Einstiegsmaschinen“ der monoBLOCK-Baureihe NEXT GENERATION von DECKEL MAHO Pfronten



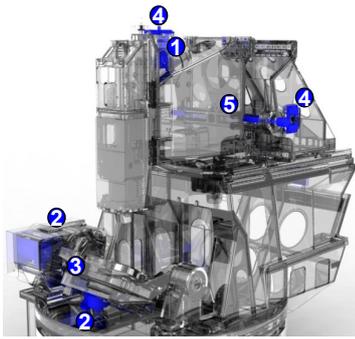
3 Kabine

- 1 Gekühlte X-/Y-/A-/C-Achs Motoren
- 2 Innengekühlter X-/Y-/Z-KGT  
Stärkeres Kühlaggregat  
Mehr Kompensationspunkte in A-/C-Achse
- Ausgewählte Komponenten  
Nur in Verbindung mit Messtaster
- 3 Mehrfühlerkompensation 4 Sensoren - Ständer, X-Schlitten, Spindel, Kabine

Reduzierung der Wärmedeformationen führt insgesamt bis zu 25% höherer Genauigkeit (6 µm statt 8 µm Positioniergenauigkeit)

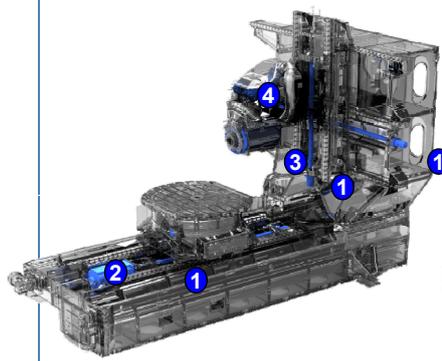
# Zusammenfassung der Kühlmaßnahmen aller Baureihen von DECKEL MAHO Pfronten

monoBLOCK



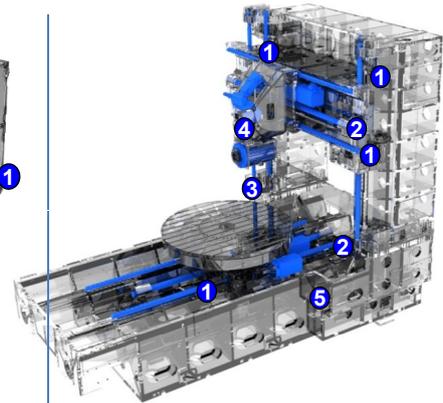
- 1 Gekühlter Z-Achs-Motor
- 2 Gekühlte A- und C-Achs-Motoren
- 3 Gekühltes C-Achs-Getriebe
- 4 Kühlung Motorplatte an X- und Z-Achs-Motoren
- 5 Gekühlter X-KGT

duoBLOCK



- 1 Gekühlte KGTs in X,Y,Z
- 2 Gekühlter Y-Achs-Motor
- 3 Mantelkühlung Motorspindel
- 4 Gekühlter B-Achs-Antrieb (Motor und Spindelstockgehäuse)

Portal



- 1 Gekühlte KGTs in X,Y,Z
- 2 Gekühlte X- und Y-Achs-Motoren
- 3 Mantelkühlung Motorspindel
- 4 Gekühlter B-Achs-Antrieb (Motor und Spindelstockgehäuse)
- 5 Gekühlter C-Achs-Motor

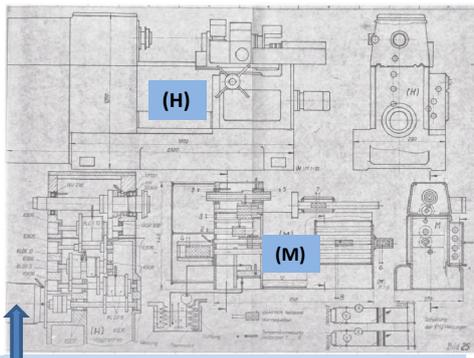
21.03.2013

Schossig: Thermikerkenntnisse bei DMG

## Untersuchung an physikalischen Modellen: Damalige Vorstellungen in der Dissertation - eingereicht am Institut für Werkzeugmaschinen der TU Dresden vor 43 Jahren

22

### ➤ TU-Ergebnisse vor 43 Jahren



(H) Revolverdrehmaschine mit Hauptantrieb  
(M) Maschinenmodell mit „Ersatz“-Wärmequellen, Verlustleistung teilweise berechnet

### ➤ Umsetzung an DMG-Maschinen: Fehlanzeige

#### Modellversuche über Wärmedeformationen an Werkzeugmaschinen-Bauteilen

Dipl.-Ing. H.-P. SCHOSSIG, Sektion für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Technischen Universität Dresden, Bereich Werkzeugmaschinen

#### Bezeichnungen

- $a$  Temperaturleitfähigkeit in  $m^2 \cdot h^{-1}$
- $c$  Spezifische Wärme in  $kcal \cdot kg^{-1} \cdot grad^{-1}$
- $C$  Strahlungszahl in  $kcal \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot (°K)^{-4}$
- $H$  Höhe in m
- $l$  Länge in m
- $N_p$  Verlustleistung in W
- $q$  Modellmaßstab
- $Q$  Wärmemenge in kcal
- $t$  Zeit in min
- $T_{amb}$  Umgebungsw. absolute Temperatur in  $°C$  bzw.  $°K$
- $T_L, T_K$  Lager bzw. Kastenwandtemperatur in  $°C$
- $x, y, z$  Wegkoordinaten in m
- $\Delta z$  Spindelverlagerung in  $\mu m$
- $u, v, w$  Verschiebungen in  $x, y, z$ -Richtung in m
- $W$  Wärmemenge je Volumen und Zeit in  $kcal \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$
- $\alpha_K, \alpha_S$  Wärmeübergangszahl infolge Konvektion bzw. Strahlung in  $kcal \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot grad^{-1}$
- $\alpha'$  Wärmeabschleppzahl in  $grad^{-1}$
- $\beta$  Wärmeleitfähigkeit in  $kcal \cdot m^{-1} \cdot h^{-1} \cdot grad^{-1}$
- $\gamma$  Kontraktionszahl
- $\rho$  Dichte in  $kg \cdot m^{-3}$
- $\varphi$  Modellgröße

die aber für Wärmedeformationsvorgänge an Maschinenbauteilen gerechtfertigt sind:

- Der Bauteilwerkstoff gehöre dem Hookeschen Gesetz und sei als homogen und isotrop zu betrachten.
- Die Temperaturleitfähigkeit  $a = \lambda / c \cdot \rho$  und die elastischen Größen des Bauteilwerkstoffs ( $E, \nu, \alpha$ ) seien temperaturunabhängig.
- Das Temperaturfeld bilde sich quasistatisch aus und sei unabhängig von den mit ihm verknüpften Formänderungen.
- Zum Einschaltzeitpunkt  $t = 0$  (Anlaufbeginn der Maschine) sei das Maschinentemperaturniveau gleichmäßig und stimme mit der Umgebungstemperatur überein (Beschränkung auf maschineninterne Wärmequellen).

Nunmehr können die den Vorgang beschreibenden Gleichungen zusammengestellt werden [2] [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{c \cdot \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{c \cdot \rho} W(x, y, z) \quad (1)$$

und  $Q = W \cdot dV \cdot dt$  als Wärmequelle des Systems ist für einen Körper die räumliche Temperaturverteilung  $T(x, y, z)$  zum Zeitpunkt  $t$  gegeben, wenn die zeitlichen und räumlichen Grenzbedingungen berücksichtigt werden.

Die zeitliche Grenzbedingung ist als Anfangstemperaturverteilung voraussetzungsgemäß mit

$$\frac{T_{mach}}{T_{amb}} = \frac{T(x, y, z)}{T_0} = 1 \quad (2)$$

anzunehmen.

Die räumliche Grenzbedingung ist vorteilhaft als Randbedingung dritter Art zu schreiben:

$$\frac{\partial Q}{\partial F} = (\alpha_K + \alpha_S) (T - T_0) = \alpha_{sum} (T - T_0) \quad (3)$$

Dabei repräsentiert  $\alpha_K$  die Wärmeübertragung infolge Konvektion und

$$\alpha_S = C \cdot \frac{(T_{amb}/100)^4 - (T_0/100)^4}{T - T_0} \quad (4)$$

den Wärmeübergang infolge Strahlung zwischen Maschine und Umgebung. Das auf diese Weise beschriebene instationäre Temperaturfeld  $T(x, y, z)$  erzeugt in der Werkzeugmaschine ein örtlich und zeitlich veränderliches Spannungsfeld, das die Maschinendeformationen zur Folge hat:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{1 - 2\nu} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} - \frac{2(1 + \nu)}{1 - 2\nu} \alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

mit  $\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$  für Y- und Z-Richtung analoge Schreibweise. Zum Anlaufzeitpunkt  $t = 0$  existieren keine

Annahme und Versuch für Nachweis: Einfluss von Trennfugen zwischen ebenen, feinbearbeiteten Flächen auf die Wärmeleitung erscheint vernachlässigbar

Relativabweichung von Temperaturen und Verlagerungen zwischen (H) u. (M) je nach Modellierbarkeit meist von 3% bis max. % 35%

Vergleich der Verformungen und analogen Messstellen (H) + (M), (M)-Erwärmung entsprechend der (H)-Wärmequellen

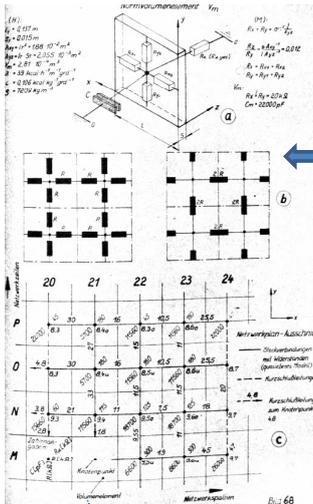
Modellgesetze zum Vergleich der Temperaturfelder an (H) und (M) auf Basis der Thermodynamik mit vereinfachten Randbedingungen bzgl. Wärmeleitung, -strahlung und Konvektion. Der Vergleich von Deformationen basieren auf den Poisson'schen und Hooke'schen Gesetzen (Temperaturunabhängig angesetzt, quasistatische Temperaturausbreitung)

21.03.2013

Schossig: Thermikerkenntnisse bei DMG

# Temperaturfeld- Untersuchung an elektrischen Modellen: 1966 gab es an der TU Dresden keine Digitalrechner, damalige Analogrechner waren für die Systemgleichungen ebenfalls nicht geeignet

## ➤ TU-Ergebnisse vor 43 Jahren



Versuch zur Vorausberechnung von Wärmediffusionen an Werkzeugmaschinen- Bauteilen, Ansatz: Systemgleichungen für instationäre Wärmeleitung und elektrische Stromflusssysteme sind analog

### Stromflusssystem (M)

- Elektr. Spannung  $U$
- Elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$
- Spezifische Kapazität (je Volumeneinheit)
- Ladungsleistungsdichte  $\nu$
- Ortsvektor  $\vec{x}$

### Wärmediffusionssystem (H)

- Temperatur  $T$
- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$
- Spezifische Wärme (je Volumeneinheit)
- Wärmeleistungsdichte  $\nu$
- Ortsvektor  $\vec{x}$

Modellgesetze zum Vergleich der Temperaturfelder an (H) und (M) auf Basis der Thermodynamik mit vereinfachten Randbedingungen bzgl. Wärmeleitung,-strahlung und -konvektion .

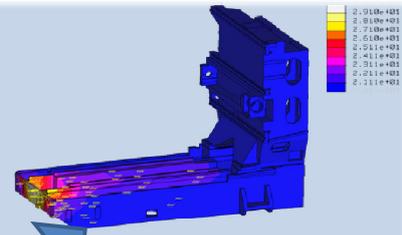
Übergang vom Normvolumenelement der (H) zum Netzwerkplan (M) des Maschinenmodelles zur Einspeisung elektrischer „Ersatz“-Wärmequellen durch Stromgeneratoren, Verlustleistung teilweise berechnet oder aus empirisch gewonnenen Werten angenommen

Schossig:Thermikerkenntnisse bei DMG

21.03.2013

## ➤ Umsetzung an DMG-Maschinen:

**Elektroanalogie Fehlzanzeige**, dafür frühzeitig ab Ende der 1980' er Jahre FEM-Berechnungen



Temperaturverlauf

Finite Elemente Methoden ermöglichen seit Einführung des 3D- CAD- Pro E bei DECKEL MAHO im Jahr 2000 die instationären Temperaturfeld-Berechnungen in eigener FEM- Gruppe (4 Mitarbeiter in Pfronten):  
-Annahmen der Gradienten für innerer und äußerer Wärmequellen vereinfacht als stationären Zustand  
-Bis zum Jahr 2000 meist nur stationäre Fallberechnungen durch externe Partner

23

# Temperaturfeld- Untersuchungen an elektrischen Modellen: Experimentelle Prüfung der Übertragbarkeit von Temperaturfeldern zwischen den Hauptausführungen (H) am IfW der TU Dresden und an elektrischen Modellen (R-C-R- Netzwerke) an der Bergakademie Freiberg

## ➤ TU-Ergebnisse vor 43 Jahren

### Versuchsreihe I: Spindelkästen

Nutzens- Nachweis zur Voraus-Ermittlung von instationären Temperaturfeldern an einem vereinfachten Spindelkasten als erste (H), Ansatz: Neben GGI25 ein Kasten aus GALSi6 für Linearität der Wärmespannung mit vereinfachten thermischen Randbedingungen (keine Fugen, homogener Werkstoff), elektrische Stromflusssysteme sind analog

Ergebnis: Relative Abweichung der umgerechneten (M) und (H)-Werte lag bei bis 10 %

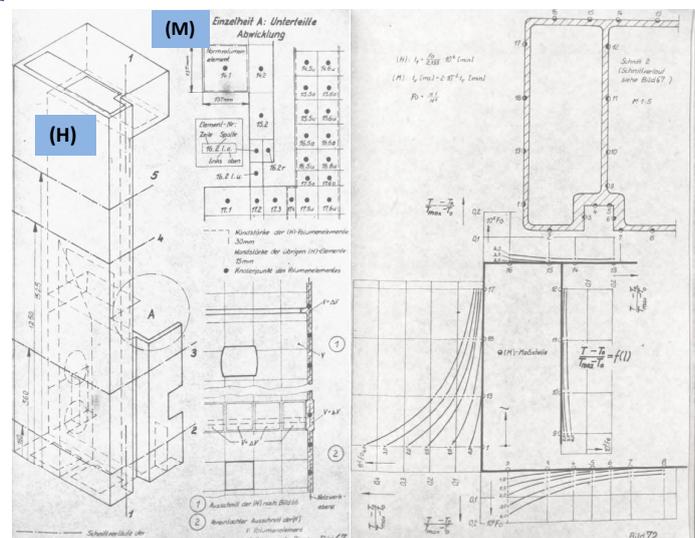
### Ermittelte Erkenntnisse aus Elektro- Analogieanwendung:

- Durch Netzwerk- Aufwand der elektrischen (M) nur für Variation von Bauteile (dafür auch an unzugängigen Stellen) geeignet
- Inverse Modellierung ermöglicht Aussagen über Randwerte, Verlustleistungen oder Werkstoffe der (H)
- Instationäre Temperaturdifferenzen zwischen (H) und umgerechnet aus (M)-Werten sind auf Fehler bei angenommenen oder empirisch gewonnenen Wärmeübertragungswerten zurückzuführen

## ➤ Umsetzung an DMG-Maschinen:

### Elektroanalogie Fehlzanzeige

Versuchsreihe II: Rahmenständer aus GGL 25 einer Schleifmaschine ( in 330 Volumenelemente aufgeteilt )



Geometrische Vereinfachungen am Rahmenständer mit Ausschnitt der Unterteilungen

Temperaturverteilung in den Quer- Schnitten des Rahmenständers

Schossig: Thermikerkenntnisse bei DMG

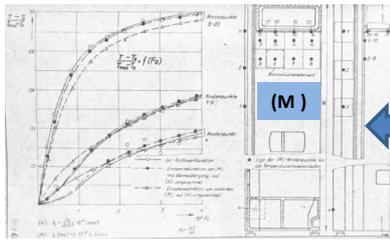
21.03.2013

24

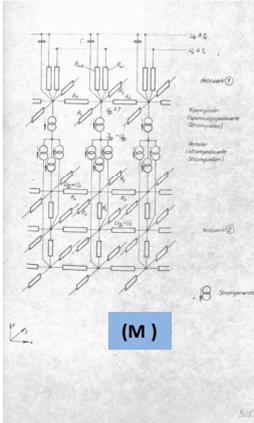
## Temperaturfeld- Untersuchungen an elektrischen Modellen: Experimentelle Prüfung der Übertragbarkeit von durch Temperaturfeldern erzeugten Wärmedeformationen zwischen der Hauptausführungen (H) und elektrischem Modell durch gekoppelte (R-C-G) - Netzwerke

### ➤ TU-Ergebnisse vor 43 Jahren

Gekoppelte Netzwerke (R-C-G) zur Ermittlung von Wärmedeformationen



Vorraussetzung zur Ermittlung von Wärmedeformationen am Elektromodell:  
Einspeisetemperaturen und Lage der Einspeisestellen  
(analog zu Wärmequellen)

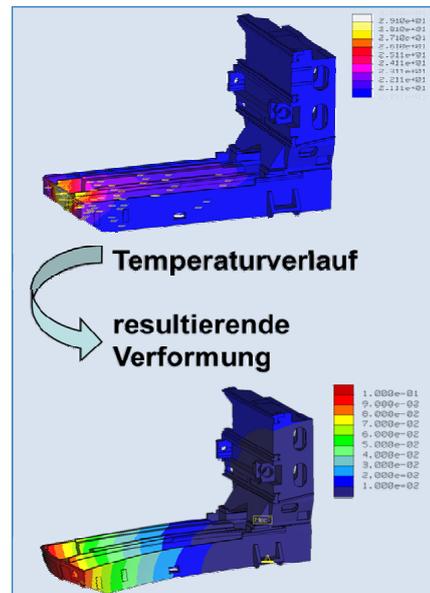


### Aussagen in der Dissertation (Stand 1970) zur praktische Anwendungen der Elektro-Analogie bei Wärmedeformationen:

- Die Kompliziertheit der Kopplung zwischen Netzwerk 1 u.2 ist selbst für ein Bauteil zu aufwendig, der Aufwand zu hoch
- Thermoelastische Randbedingungen für Temperatur und Verformung lassen sich nicht exakt genug vorgeben
- Die Kopplung mit Digitalrechnern als „hybride Rechentechnik“ erscheint für eine künftige rechnergestützte Konstruktion als der sinnvollere Einsatz
- Die in der Arbeit nachgewiesene gute „angenäherte“ Proportionalität zwischen Temperatur und Verformung verleiht ermittelten instationären Temperaturfeldern eine hohe Aussagekraft über das thermische Maschinenverhalten

### ➤ Umsetzung an DMG-Maschinen:

Elektroanalogie Fehlanzeige



FEM- Analysen am 3 D- Pro E- CAD- System von DECKEL MAHO Pfronten:  
Simulation von Verlagerungen aufgrund von Wärmeeinbringungen durch innere Wärmequellen

DECKEL MAHO Pfronten grüßt Sie durch mich herzlich und ganz besonders das Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik der TU Dresden. Wir wünschen weitere Erfolge in Lehre und Forschung, speziell auf dem Gebiet der Analyse des thermischen Verhaltens spannender Werkzeugmaschinen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit und ein „Herzlich Willkommen“ in Pfronten und im Allgäu!



# **Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann

Sprecher des DFG-SFB Transregio 96  
TU Dresden, IWM

# Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Historie – Zielstellung – Ansatz – Vorgehen

*Knut Großmann*

---

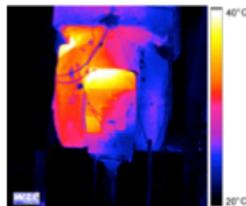
Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

SFB/Transregio 96



Dresden – Aachen – Chemnitz

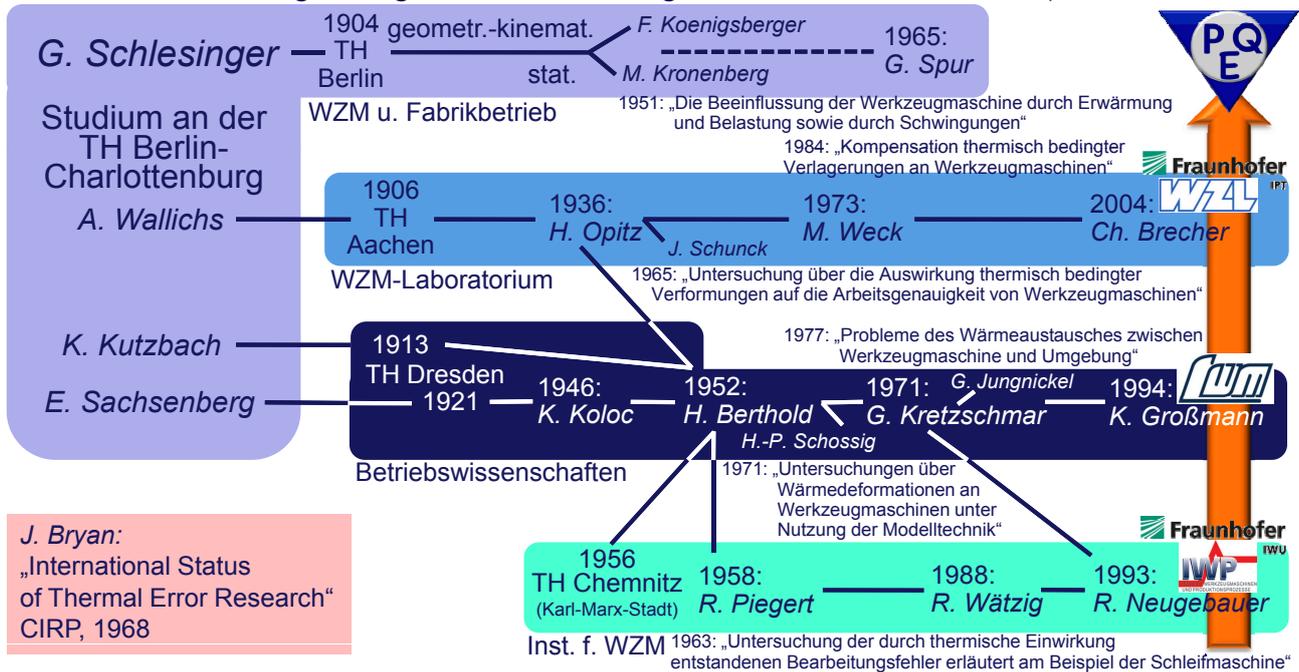
*Thermo-Energetische Gestaltung  
von Werkzeugmaschinen  
- eine systemische Lösung des Zielkonflikts  
von Energieeinsatz, Genauigkeit und Produktivität*



# Von den Anfängen der Thermik-Forschung bis zum Transregio

1927: „Die Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschinen“

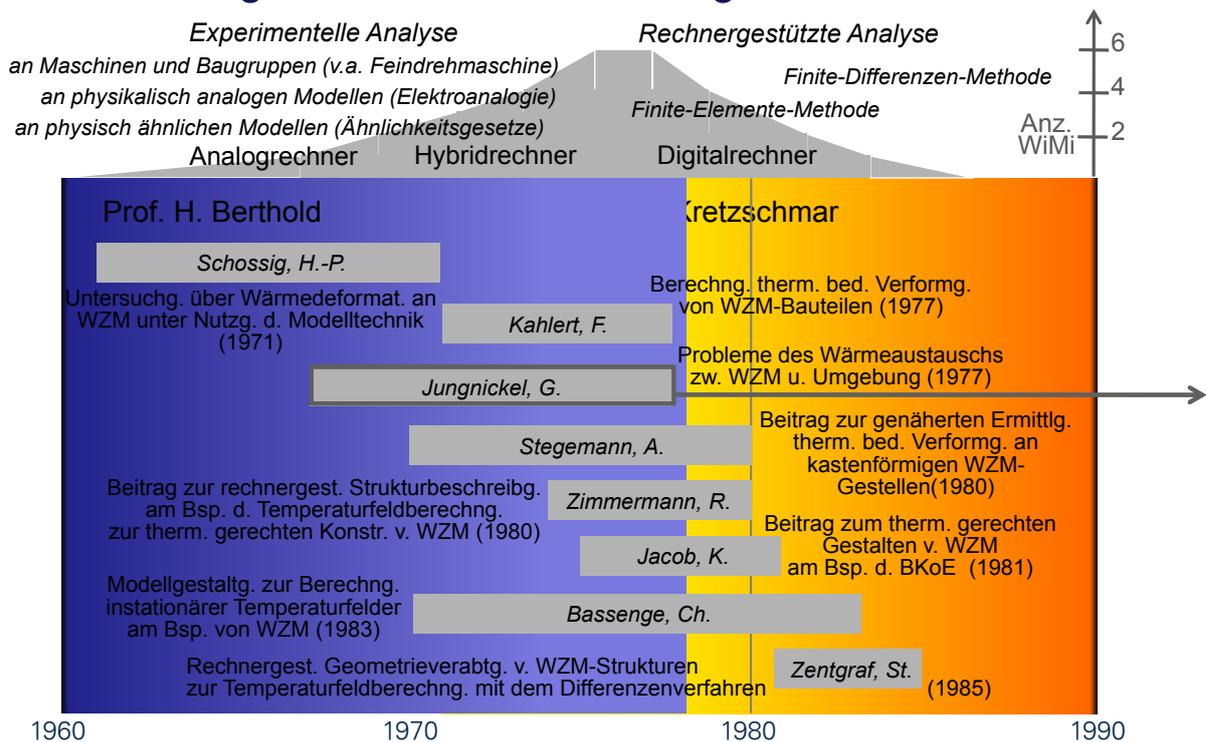
1969: „Thermal Behavior Optimization of Machine Tools“



Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Historie

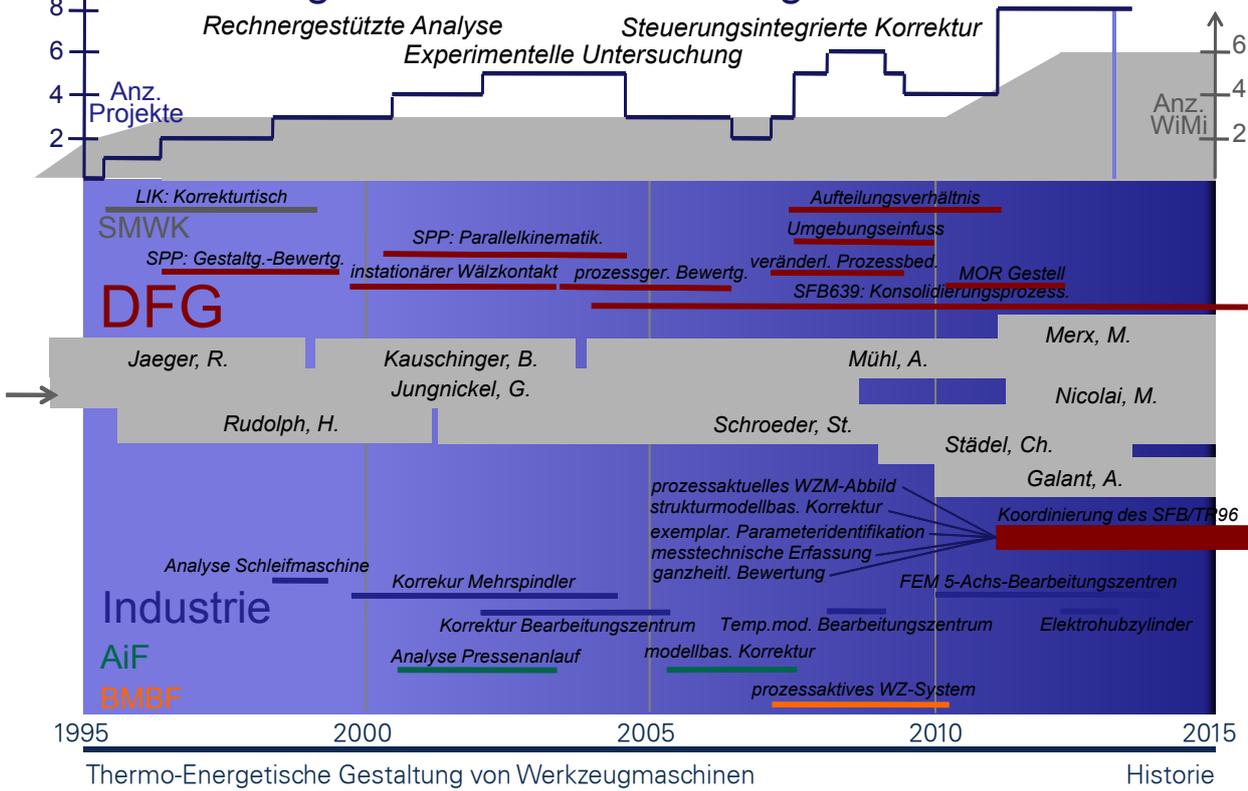
# Entwicklung der Thermik-Forschung in Dresden bis 1990



Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Historie

# Entwicklung der Thermik-Forschung in Dresden ab 1995



# Vorbereitung des Transregio

05 / 2009 Konzept zu einem DFG-AiF-Cluster

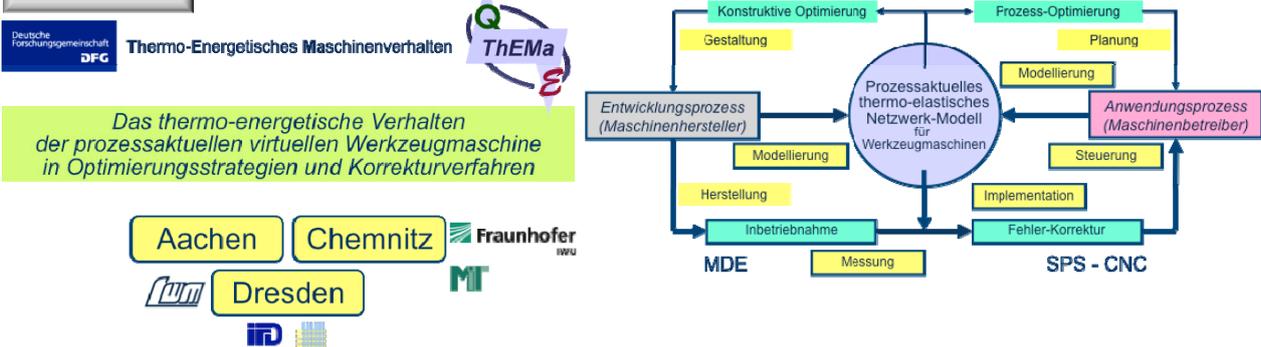
Modellgestützte Korrektur thermisch bedingter Fehler im Arbeitsraum von Werkzeugmaschinen



11 / 2009 Konzept zu einem DFG-SFB-TR

Thermo-Energetisches Maschinenverhalten

Das thermo-energetische Verhalten der prozessaktuellen virtuellen Werkzeugmaschine in Optimierungsstrategien und Korrekturverfahren



# Beantragung des Transregio

04 / 2010 Beratungsgespräch

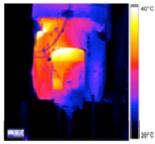
12 / 2010 Vollantrag

SFB/Transregio 96



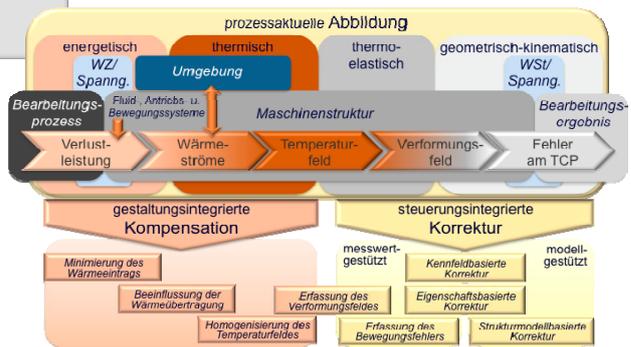
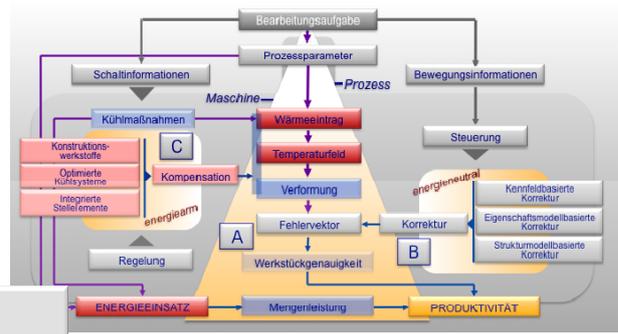
Dresden – Aachen – Chemnitz

*Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen*  
- eine systemische Lösung des Zielkonflikts von Energieeinsatz, Genauigkeit und Produktivität



02 / 2011 Begutachtung / Begehung

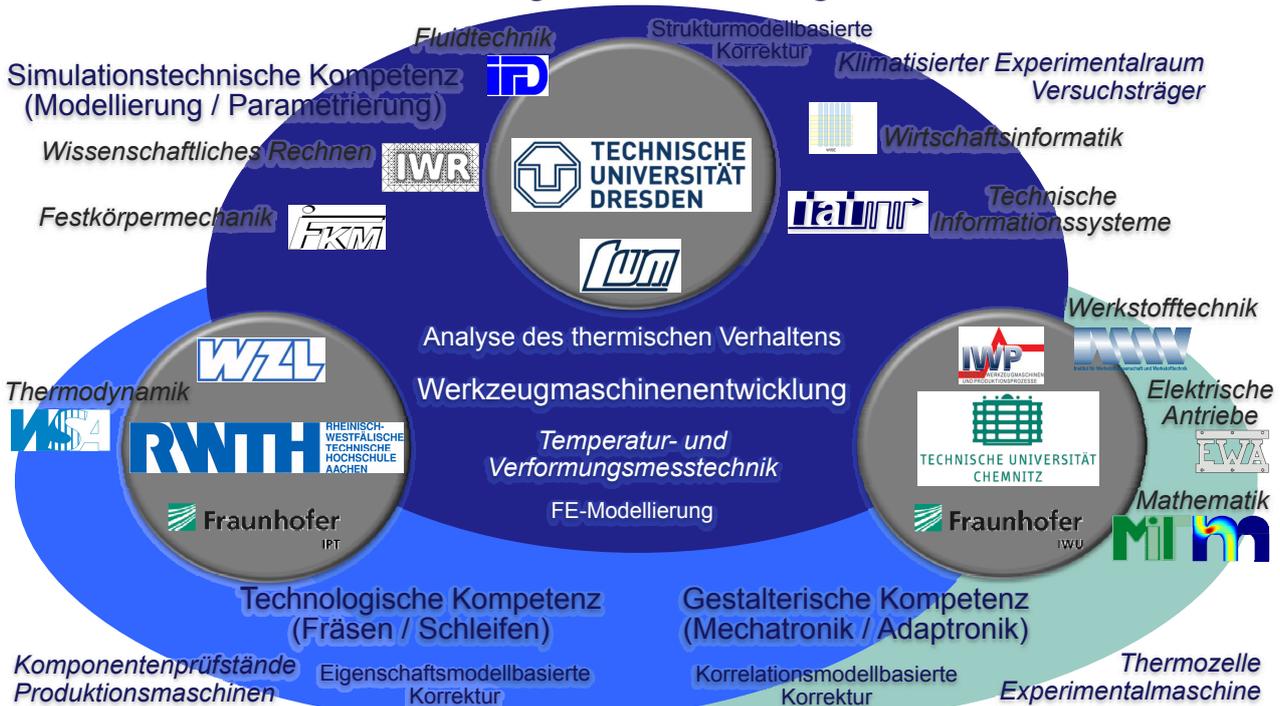
07 / 2011 Start



Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Historie

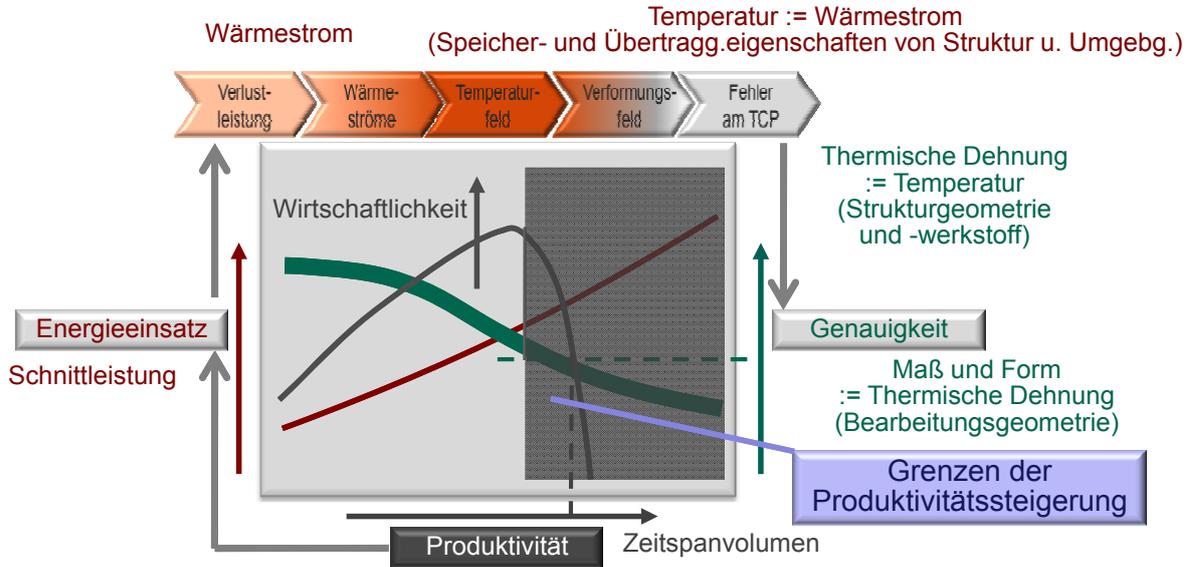
# Beteiligte im Transregio



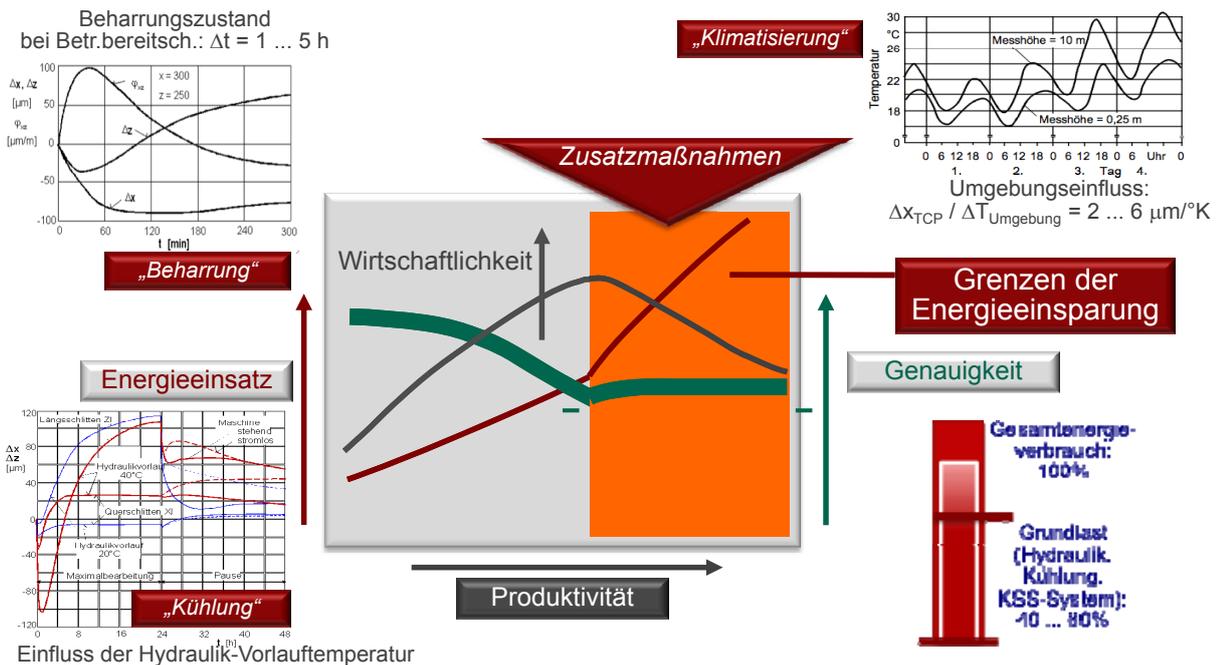
Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Übersicht zum SFB/TR96

## Problemstellung im Transregio

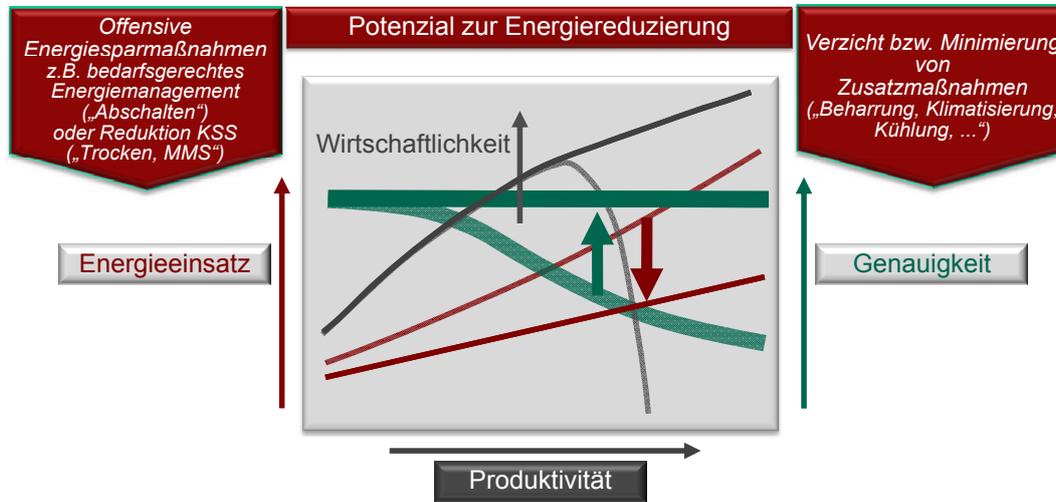


## Problemstellung im Transregio

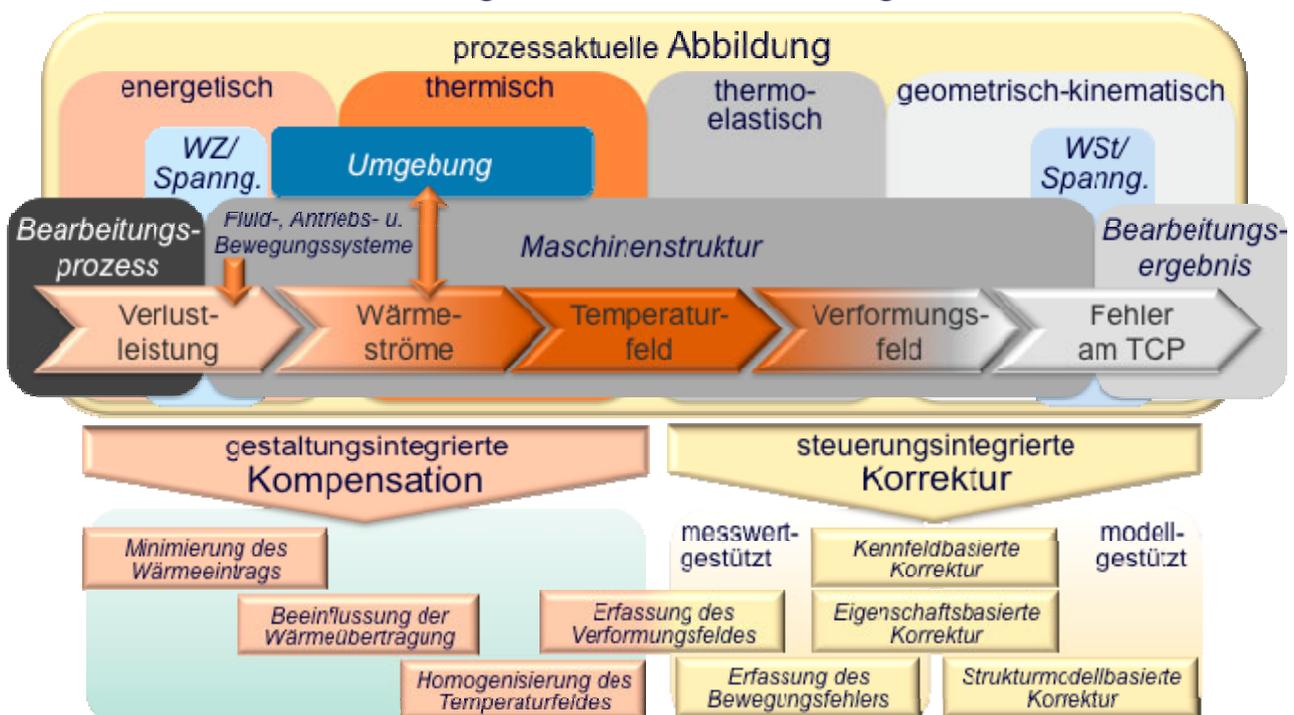


## Problemstellung im Transregio

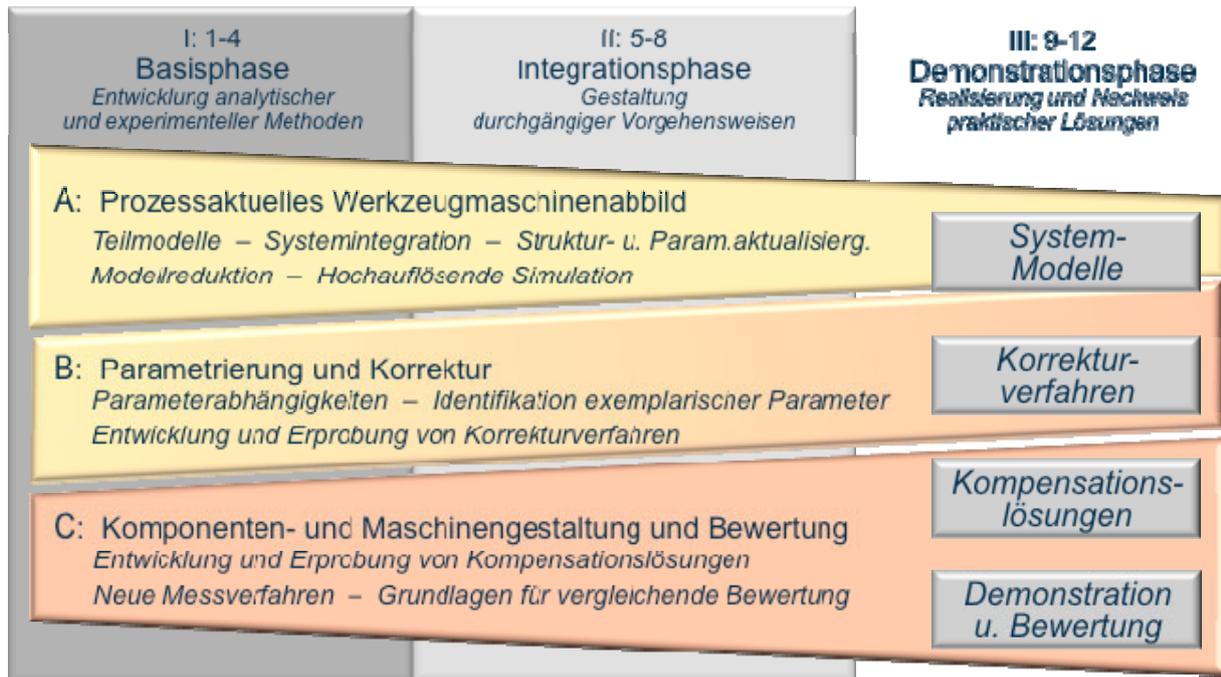
Befähigung spanender Werkzeugmaschinen zu Fertigungsqualität und Wirtschaftlichkeit unter den Bedingungen energieeffizienter Produktion durch konstruktive und steuerungstechnische Lösungen



## Lösungsansatz im Transregio



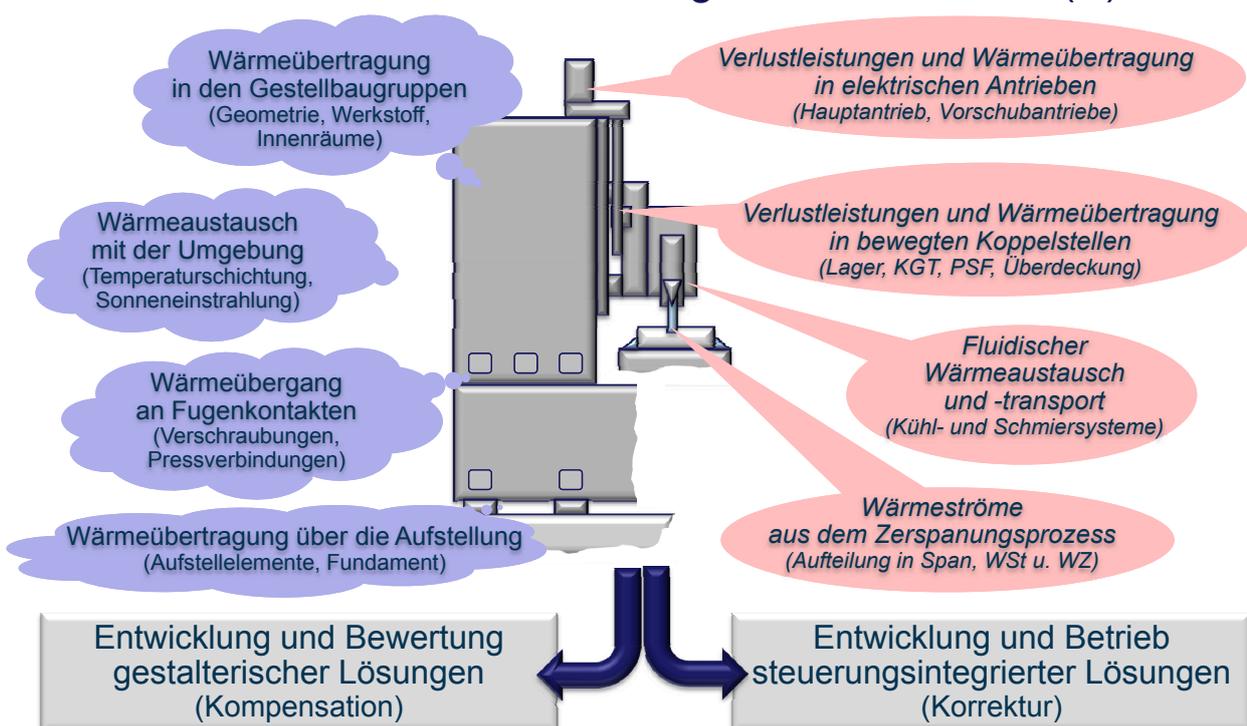
## Phasen und Projektbereiche des Transregio



Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Übersicht zum SFB/TR96

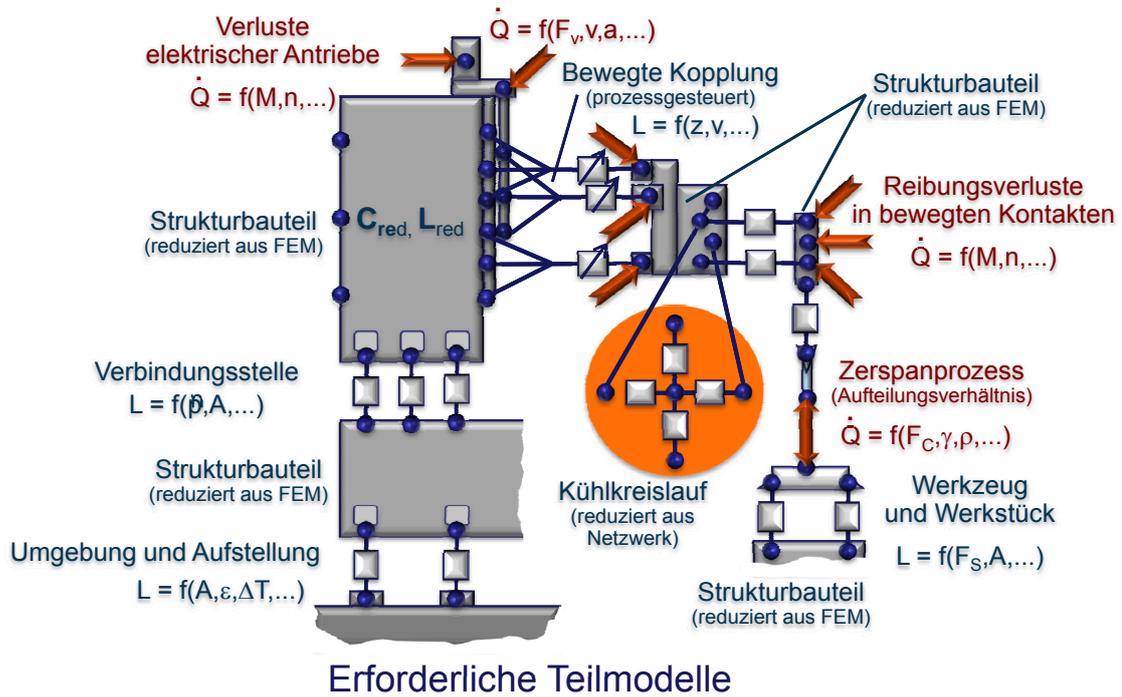
## Prozessaktuelles Werkzeugmaschinenabbild (A)



Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Übersicht zum SFB/TR96

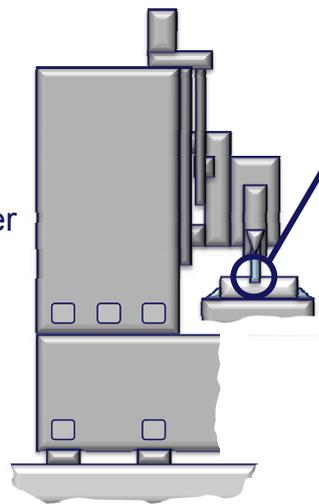
## Prozessaktuelles Werkzeugmaschinenabbild (A)



## Vorträge zu den Teilmodellen (A / B)

Sensorlösungen und zeitkontinuierliche Messmethoden für die Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide

analytische Methoden und ausgewählte Modelle zur Simulation von Wärmeströmen und Temperaturfeldern

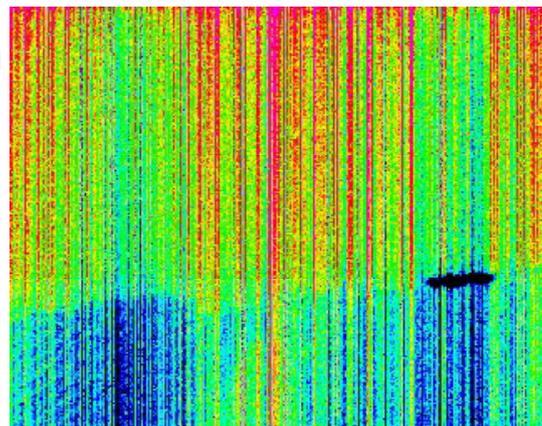


Infrarotkameraaufnahme des Zerspanprozesses (Räumen)

WZL

UM

Untersuchungen des Zerspanungsprozesses hinsichtlich auftretenden Wärmeströme und Temperaturen

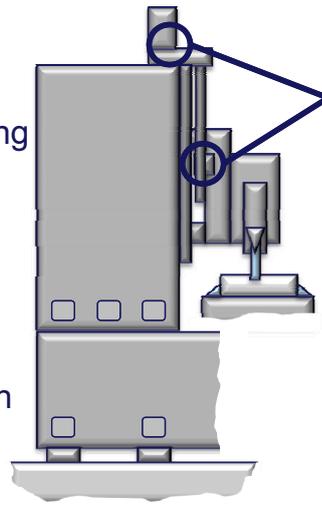


## Vorträge zu den Teilmodellen (A / B)

Ermittlung der Verlustleistung  
aus dem Bewegungsprofil

Bestimmung der  
Wärmeübergänge auf  
angrenzende Bauteile

Erfassung der Verlagerung  
der einzelnen Komponenten  
des Führungssystems

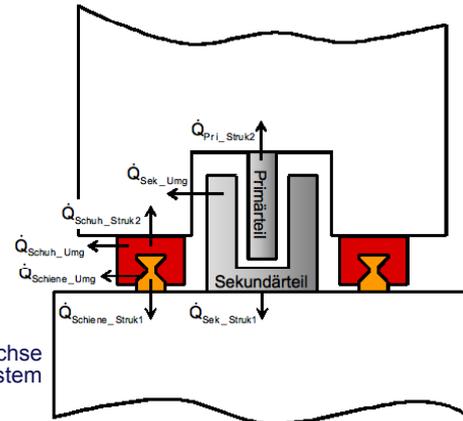


Vorschubachse  
mit Linearmotor und Führungssystem

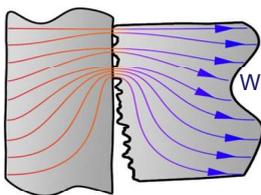
Verlustleistungen  
in einer Vorschubachse  
und die daraus resultierende  
Temperaturverteilung

EWÄ

WZL



## Vorträge zu den Teilmodellen (A / B)

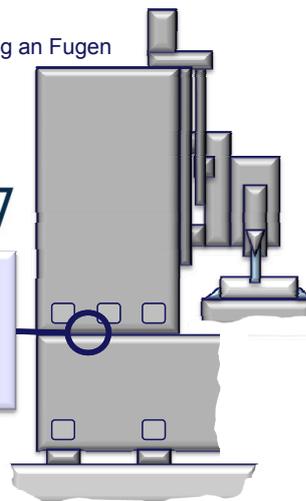


Wärmeübertragung an Fugen

WZL

WZL

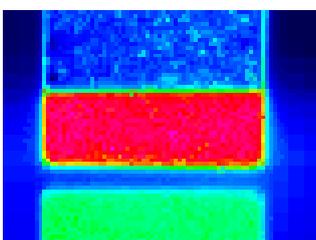
Messungen  
des Wärmeübergangs  
an Fugenkontakten  
von Werkzeugmaschinen



Einfluss der Fugen  
auf die Wärmeübertragung

Charakterisierung von Fugen

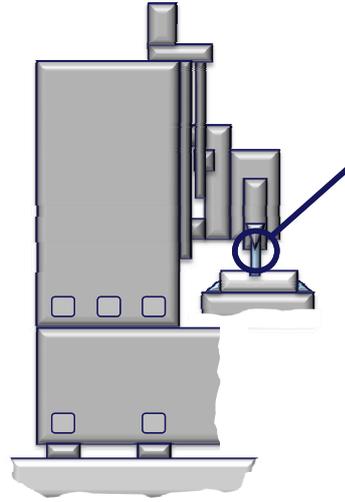
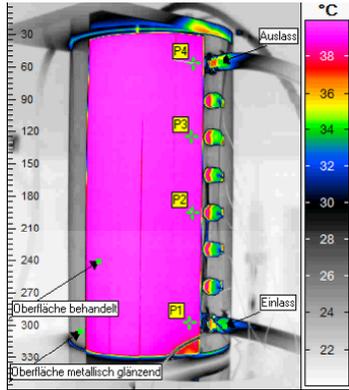
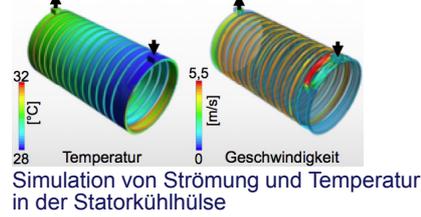
Messverfahren zur Bestimmung  
der Wärmeübergänge



Infrarot-Thermographiemessung  
an einer Probe  
bei instationärem Kontaktversuch

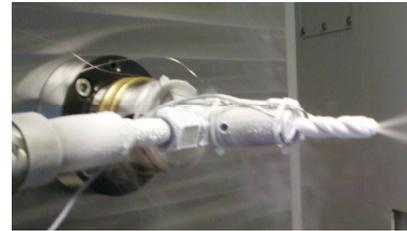
## Vorträge zu den Teilmodellen (A / B)

Optimierung der Kühlung an der Motorspindel durch Kanalgestaltung und Betriebsparameter



Fluidische Kühlung von Motorspindeln und Werkzeugen

Optimierung der WZ-Kühlung durch Strahlführung und alternative Fluide

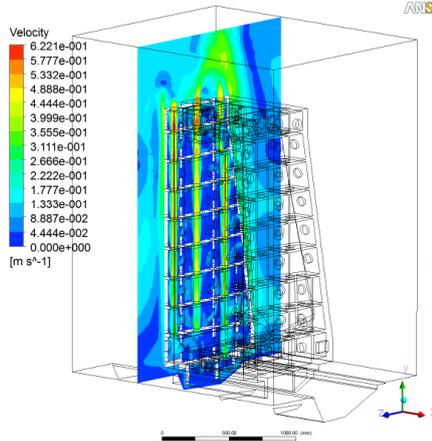


WZ-Innenkühlung mit flüssigem Stickstoff

## Vorträge zu den Teilmodellen (A / B)



Modellierung des Wärmeaustauschs Maschine-Umgebung



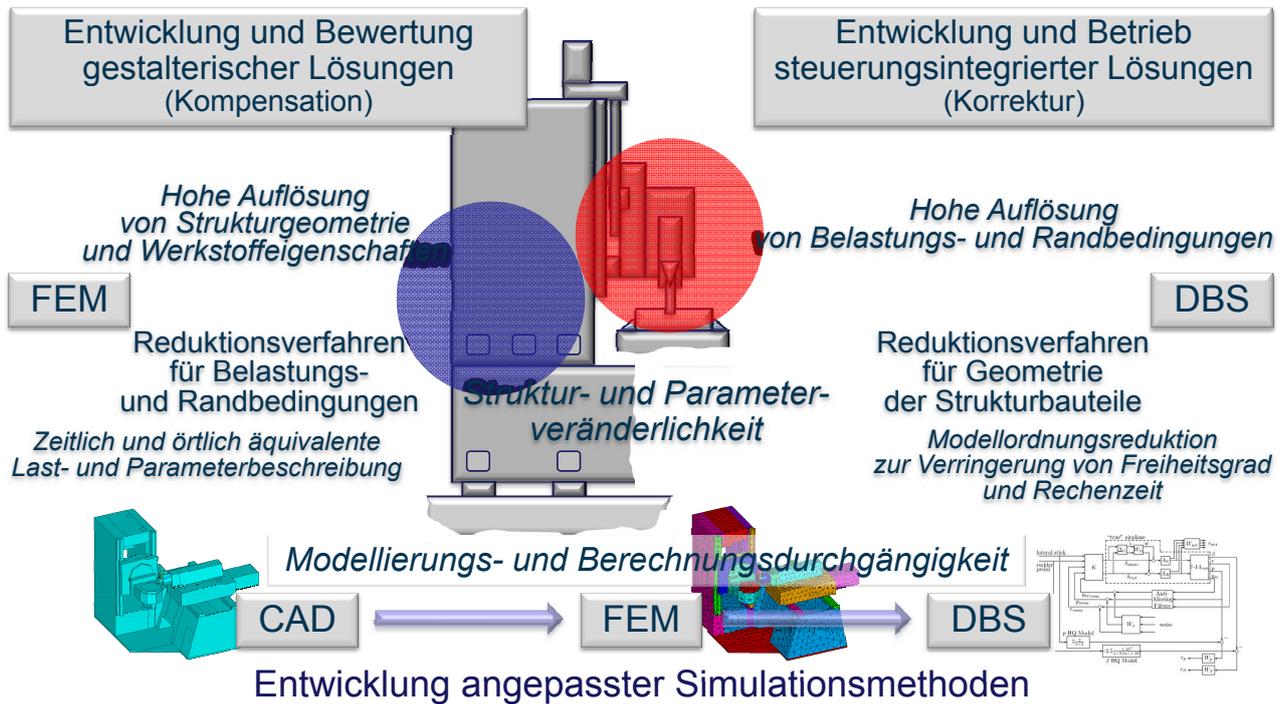
Modellierung der Konvektion über klassische Ähnlichkeitsmodelle und der Strahlung über das Stefan-Boltzmann-Gesetz

Untersuchungen zur Gültigkeit vereinfachter Modelle

Validierung durch experimentelle Untersuchungen an einem Maschinenständer

Modellierung der freien Konvektion mittels numerischer Strömungsberechnung

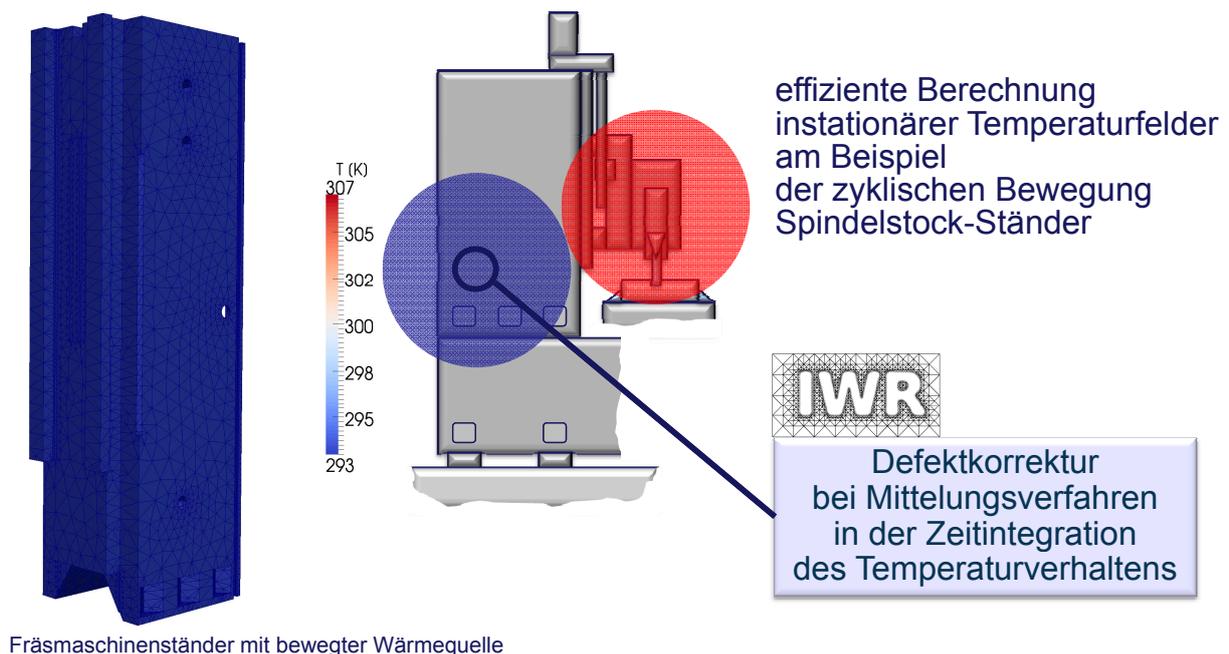
## Prozessaktuelles Werkzeugmaschinenabbild (A)



Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Übersicht zum SFB/TR96

## Vorträge zu den Simulationenethoden (A)



Fräsmaschinenständer mit bewegter Wärmequelle

Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Übersicht zum SFB/TR96

## Vorträge zu den Simulationenethoden (A)

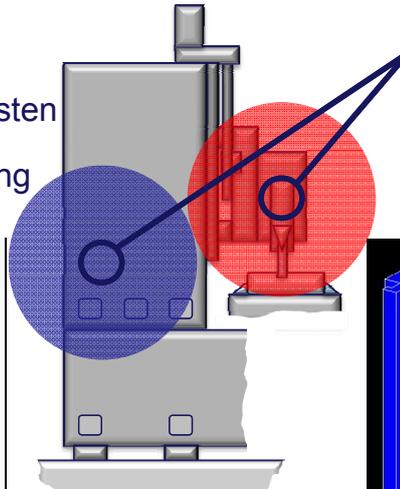
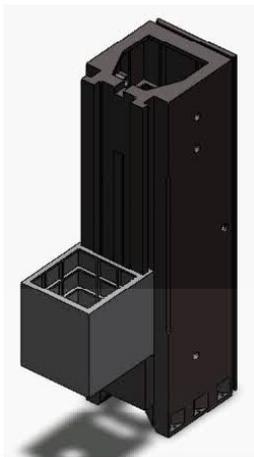
Bearbeitungsablauf CAD-FEM-MOR-DBS

große Relativbewegungen

äquivalente thermische Lasten

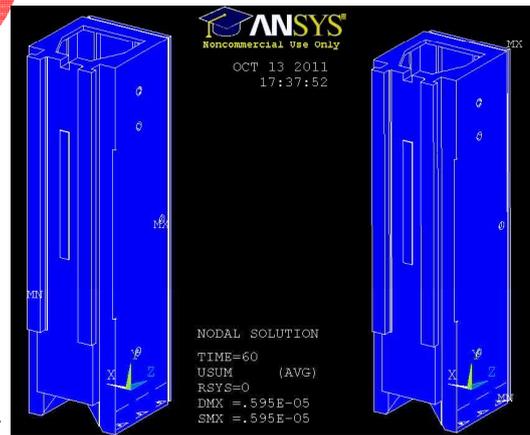
Visualisierung u. Verformung am FE-Modell

Strukturveränderlichkeit in FEM und Blocksimulation bei der Berechnung von Temperaturfeldern



Bewegungszyklus des Spindelstocks am Fräsmaschinenständer

Temperaturfeld und Verzerrungszustand am Fräsmaschinenständer



Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

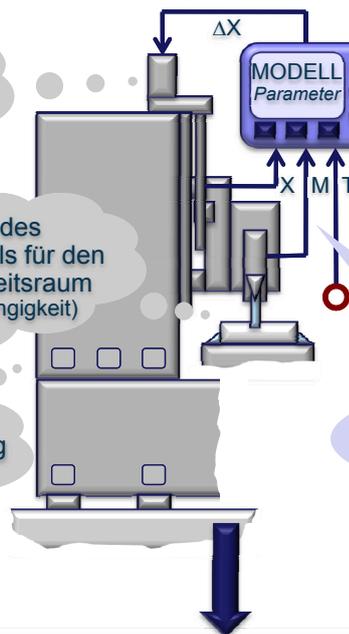
Übersicht zum SFB/TR96

## Parametrierung und Korrektur (B)

Steuerungintegrierte Korrektur der Sollwerte an den Vorschubachsen (Interpolationstakt)

Gültigkeit des Korrekturmodells für den gesamten Arbeitsraum (Positionsabhängigkeit)

Möglichst einfache Generierung bzw. Parametrierung des Korrekturmodells (Aufwand, Zeit, Qualifikation)



Verwendung industriell verfügbarer Steuerungstechnik (CNC, SPS)

Möglichst einfache Implementation und Inbetriebnahme (Aufwand, Zeit, Qualifikation)

Möglichst ohne bzw. wenig zusätzliche Sensorik (Aufwand, Robustheit)

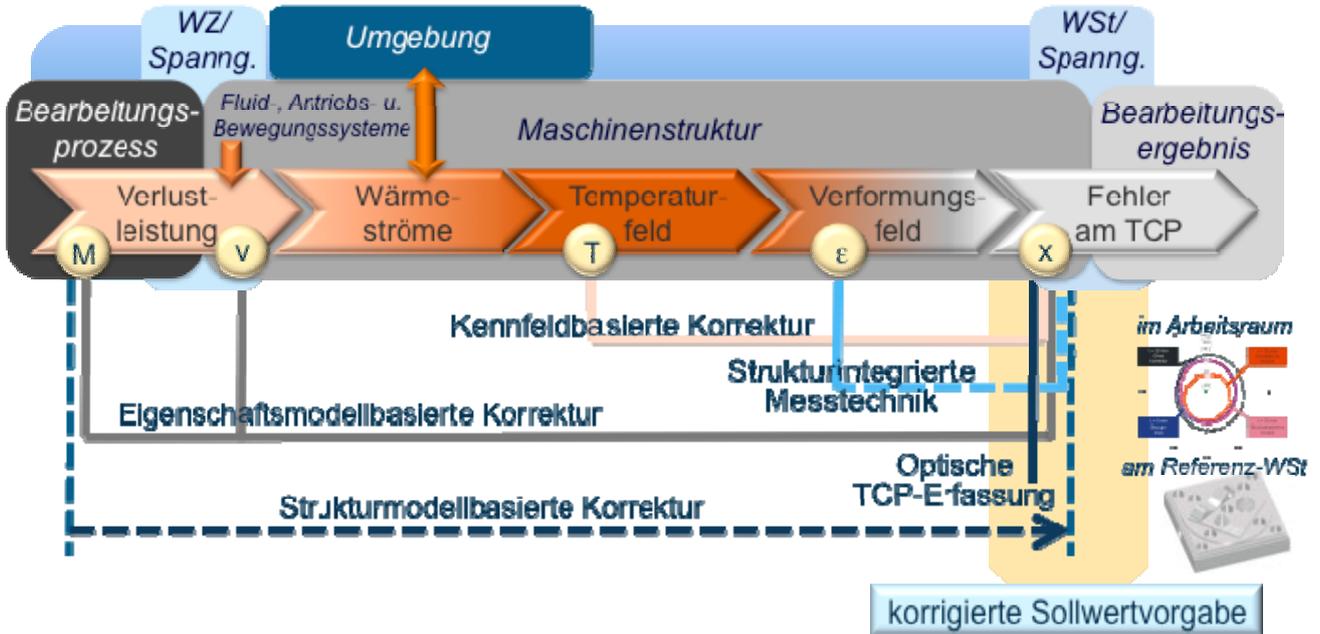
Entwicklung, Erprobung und Bewertung alternativer Korrekturverfahren (messwert- u. modellbas. / variable u. konst. Konfiguration / Arbeitspkt. u. Arb.raum)

Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Übersicht zum SFB/TR96

## Alternative Korrekturverfahren (B / C)

hinsichtlich der verarbeiteten Größen entlang der Wirkungskette



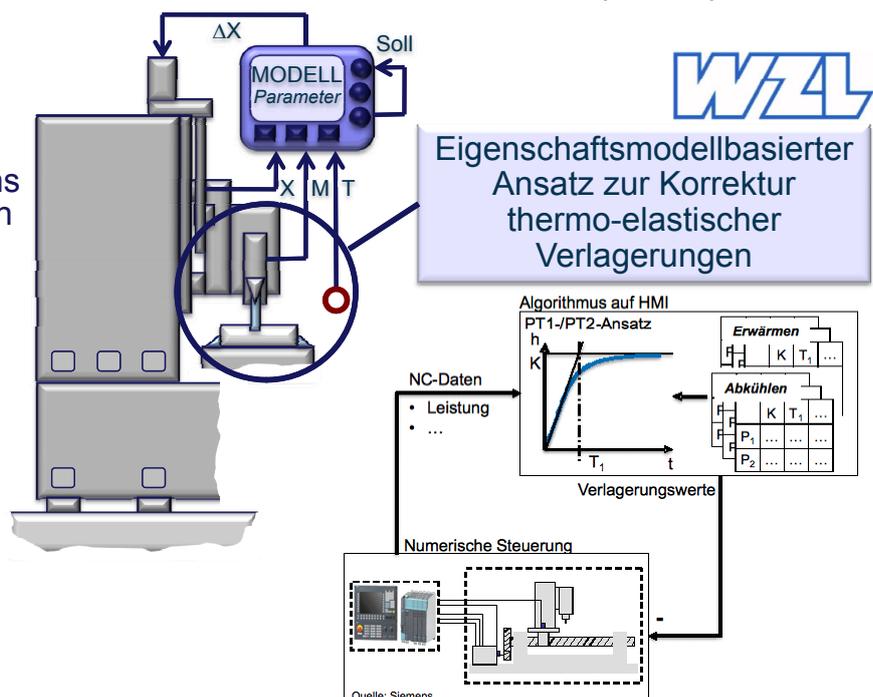
## Vorträge zu alternativen Korrekturverfahren (B / C)

Beschreibung des Übertragungsverhaltens für Erwärmen und Abkühlen

Aktualisierung mit Steuerungsdaten

keine zusätzliche Sensorik

Korrektur achsbedingter Anteile



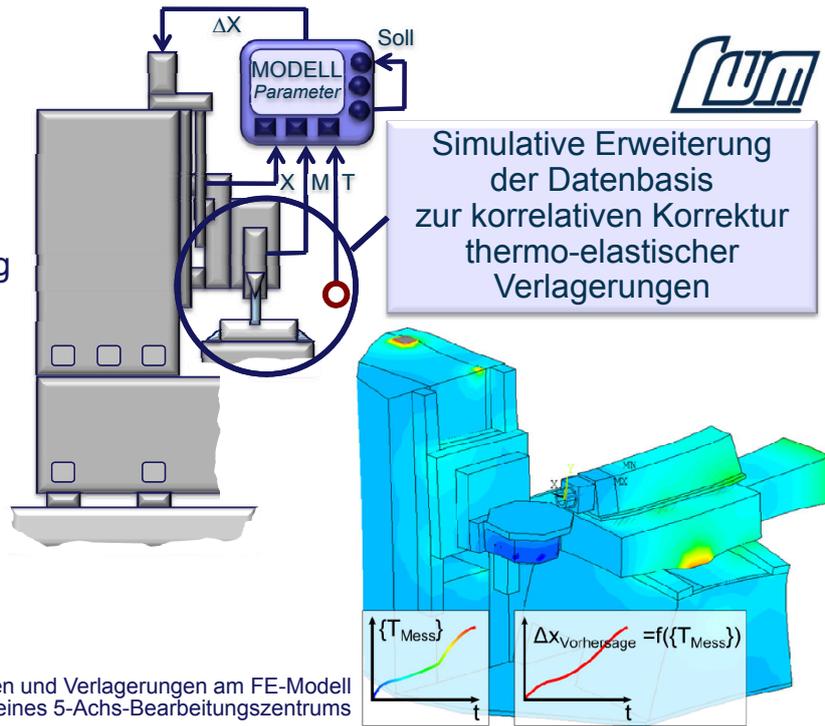
Ansatz zur eigenschaftsmodellbasierten Korrektur

## Vorträge zu alternativen Korrekturverfahren (B / C)

Abgrenzung der modellbasierten Korrekturverfahren

Abgleich und Erweiterung der Datenbasis mittels FE-Simulation

Berücksichtigung der kinematischen Strukturvariabilität



Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Übersicht zum SFB/TR96

## Vorträge zu alternativen Korrekturverfahren (B / C)

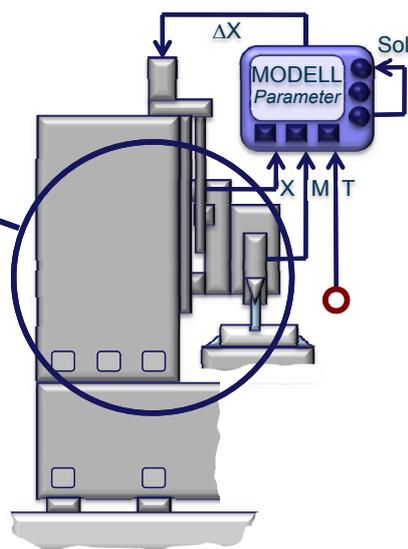


Thermografie und Nahbereichs-Fotogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern

Grundlagen der selektiven thermografischen Messung

Qualifizierung der Methodik (Marken, Kamerasystem, Kalibrierung)

Demonstration an Beispielen (Probekörper, Maschinenständer)

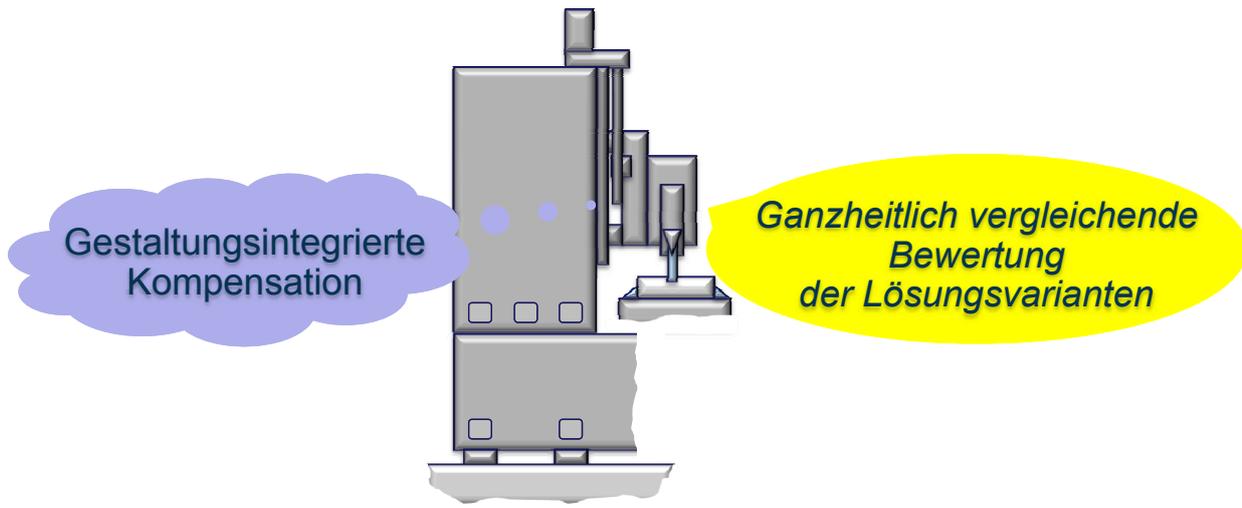


Ansatz zur Korrektur

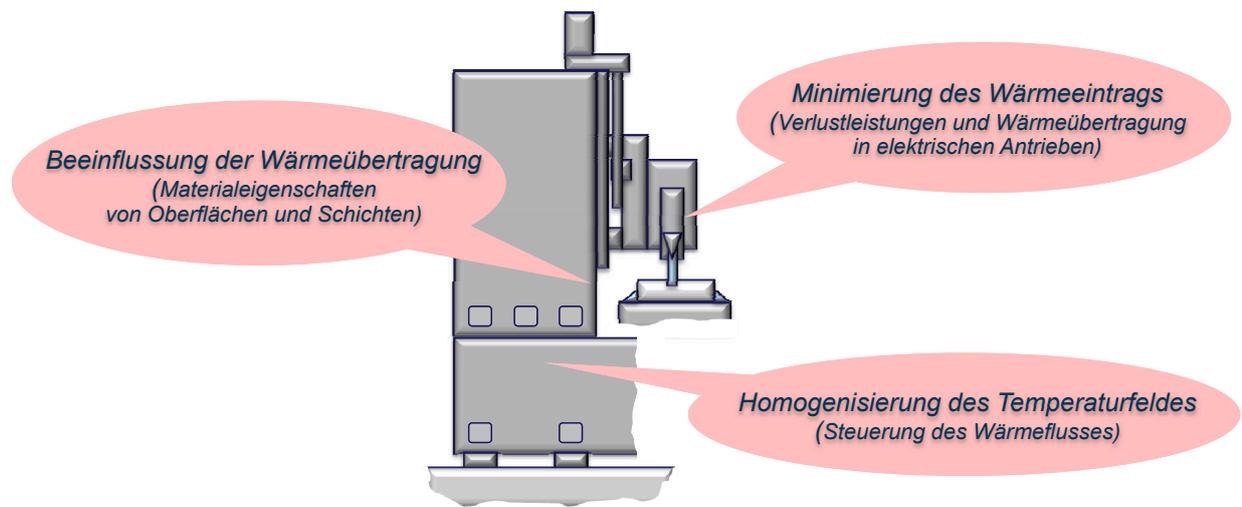
Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Übersicht zum SFB/TR96

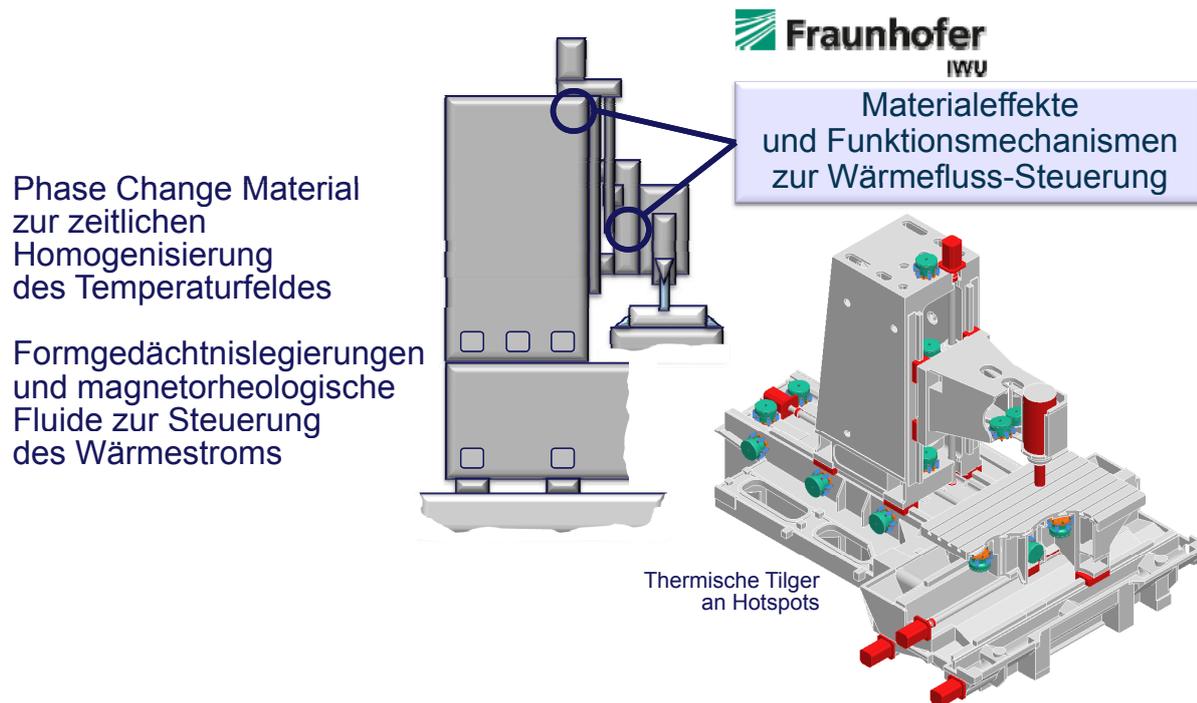
## Komponenten- und Maschinengestaltung und Bewertung (C)



## Gestaltungsintegrierte Kompensation (C)



## Vortrag zur gestaltungsintegrierten Kompensation (C)



Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Übersicht zum SFB/TR96

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Die Arbeiten im SFB/TR 96 werden mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert, wofür gedankt wird



# **Untersuchungen des Zerspanungsprozesses hinsichtlich auftretender Wärmeströme und Temperaturen**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. F. Klocke;  
Dipl.-Ing. M. Brockmann  
RWTH Aachen, WZL

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann; Dipl.-Ing. Ch. Städel  
TU Dresden, IWM

# UNTERSUCHUNGEN DES ZERSPANPROZESSES HINSICHTLICH AUFRETENDER WÄRMESTRÖME UND TEMPERATUREN

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke  
Prof. Dr.-Ing. habil. Knut Großmann  
Dipl.-Ing. Christian Städel  
Dipl.-Ing. Matthias Brockmann

## 1 Einleitung und ausgewählter historischer Überblick

### 1.1 Bedeutung der Temperaturen beim Zerspanprozess

Die beim Zerspanprozess entstehenden Temperaturfelder und die daraus resultierenden Wärmeströme beeinflussen maßgeblich den Verschleiß des Werkzeuges sowie die resultierende Bauteilqualität. Das Temperaturfeld in der Schneide ist hierbei verantwortlich für die Verschleißart, hohe Temperaturen begünstigen einen schnelleren Werkzeugverschleiß durch Diffusion und Verzunderung und sind daher zu vermeiden [KLOC08]. Die durch den Zerspanprozess eingetragene Wärme bedingt weiterhin eine thermo-elastische Verformung von Werkstück- und Werkstückhalter sowie von Werkzeug und Werkzeughalter, was wiederum zu Einbußen in der Maßhaltigkeit und damit der Qualität des zu fertigenden Bauteils resultiert. Durch zu hohe thermische Last kann ebenfalls die Oberfläche des Bauteils geschädigt werden, was in einer geringeren Lebensdauer des Produktes resultiert. Die angesprochenen Aspekte zeigen repräsentativ die Signifikanz der Temperaturen in Werkzeug, Werkstück und Span für den Zerspanprozess, die Kenntnis und Vorhersage der Temperaturen ist aus diesem Grund schon lange Gegenstand der Forschung.

### 1.2 Ausgewählter historischer Überblick über Forschungsarbeiten

Erste Versuche zu Temperaturmessungen in der Zerspanung wurden bereits im 18. Jhd. von Count Rumford, auch bekannt als Benjamin Thompson, durchgeführt [RUMF98]. Fokus der Untersuchung war der Bohrprozess eines gusseisernen Kanonenrohres. Der entsprechende Zylinder für die ersten Versuche wurde mit einem Thermoelement ausgestattet und zur Umgebung durch Flanell (Wollmaterial) isoliert. Da nach der Kalorischen Theorie Wärme nicht erzeugbar und nicht zerstörbar ist, müsste, so die Annahme von Thompson, bei zeitlich aufeinander folgenden Reibvorgängen (z.B. im Inneren des Kanonenrohres) beim zweiten Durchgang weniger Wärme „erregt“ werden. Das zweite Experiment wurde mittels Reiben durch stumpfen Bohrer durchgeführt. Das Experiment war hierbei im Prinzip eine Wiederholung des ersten Experiments, jedoch wurde diesmal innerhalb eines mit Wasser gefüllten Kastens zerspannt. Da bei jeder Wiederholung vergleichbare Ergebnisse erhalten wurden, die Wärme bzw. gemessene Temperatur jedoch stets die gleichen waren, konnte nach der damaligen Vorstellung kein Element bzw. die Kalorische Substanz nicht aus dem Kanonenrohmaterial gezogen werden. Durch die Isolierung konnte auch kein Element aus der Luft gezogen werden. Eine im Universum stets konstante Größe dieses Wärmeelements war damit also wiederlegt. Thompson schloss, dass die Bewegung mittels der Reibung Wärme erzeugt (ebenso wie F. Bacon, Boyle, Hook und Newton), hatte aber keine Erklärung wie Wärme in Form von Bewegung gespeichert wird.

Neben diesen grundlegenden, fast philosophischen Experimenten, wurden im Zeitalter der industriellen Revolution weitere gezielte Zerspanversuche mit Temperaturmessungen durchgeführt. Gottwein [GOTT25] führte 1925 Messungen der Temperatur an der Werkzeugschneide für die Zerspannung von Flußeisen durch. Schon damals erkannte Gottwein den signifikanten Zusammenhang zwischen Werkzeugschneide und Verschleiß. Das Thermoelement das Gottwein nutzte wurde hierbei

durch den Drehmeißelstahl und das Flußeisen gebildet (Einmeißelmethode). Gottwein bestimmte Drehzahl-Temperatur-Kurven dessen qualitativer Verlauf noch heute gültig ist.

Erste berührungslose Messungen wurden 1933 von Schwerd [SCHW33] durchgeführt. Das von ihm entwickelte Pyrometer bestand aus einer Salzlinsenoptik die Wärmestrahlung auf ein Thermoelement fokussierte. Fokus der Untersuchungen war ebenfalls die Messung der Werkzeugschneidentemperatur.

Weitere wegweisende Arbeiten wurden von Schmidt und Roubik [KOMA01] zum Thema kalorimetrische Messungen und von Bickel [BICK50] zum Thema Analogie von Spannungen und Temperaturfeldern durchgeführt, hierauf wird im Weiteren nicht im Detail eingegangen.

## **2 Übersicht von Sensorlösungen zur Temperaturmessung für die Zerspanung und deren Anwendung**

Um die Temperaturen im Zerspanprozess messen zu können wurden verschiedene, vorhandene Temperatursensoren für die Anwendung in der Zerspanung entwickelt. Hierbei kann zunächst zwischen zeitaufgelösten und indirekten Messtechniken unterschieden werden. Indirekte Messungen wie temperaturempfindliche Farben, Pulver mit konstantem Schmelzpunkt sowie das Begutachten des metallurgischen Schliffs sind als Temperaturmesstechniken für die wissenschaftliche und industrielle Anwendung unbrauchbar.

Die besser geeigneten zeitaufgelösten Messtechniken lassen sich weiterhin in thermoelektrische und Strahlungsmesstechniken unterteilen. Zu ersteren gehören das Widerstandsthermometer und das Thermoelement. Widerstandsthermometer messen Temperaturen anhand der elektrischen Widerstandsänderung eines Leiters. Neben dem relativ großem Messfleck und dem begrenzten Temperaturbereich sind Messungen die auf diesem Prinzip beruhen eher für robuste Messungen geeignet. Das Prinzip wird aktuell auf seine Eignung für Dünnschichtsensoren untersucht. Thermoelemente nutzen den Seebeck Effekt um Rückschlüsse auf vorhandene Temperaturen zu gewährleisten. Hierbei entsteht eine Spannung in der Kontaktstelle zweier unterschiedlicher Materialien in einem Temperaturgradienten. Thermoelemente sind prinzipiell in einem weiteren Temperaturbereich einsetzbar als Widerstandsthermometer, die entstehenden sehr geringen Spannungen müssen jedoch durch geeignete Hardware verstärkt werden. Anwendung in der Zerspanung findet das Thermoelement neben den bereits angesprochenen wissenschaftlichen Untersuchungen häufig als in die Schneidplatte integriertes Thermoelement. Hierzu sind teilweise bereits industriell vermarktete Lösungen zu erwerben.

Die unter dem Oberbegriff Strahlungsmesstechniken zusammengefassten Prinzipien Thermografie und Pyrometrie bieten den Vorteil einer kontaktlosen Messung, was speziell im Bereich der Zerspanungsuntersuchungen von signifikantem Vorteil sein kann. Thermografiekameras sind dabei in der Lage ein komplettes Temperaturbild zu messen mit dem man in einer Messung auf ein gesamtes Temperaturfeld schließen kann. Nachteil der heutzutage verfügbaren Kameratechnologien ist der unbekannte Emissionsgrad von Metallen der zudem wellenlängen- und temperaturabhängig ist. Abhilfe schafft hier die Zwei-Farben-Pyrometrie die im Gegensatz zu der Thermografie auf der Messung der Strahlung an zwei diskreten Wellenlängen beruht. Durch geschickte Wahl der Wellenlängen kann zu einem gewissen Grad eine Emissionsgradänderung vernachlässigt werden und so eine absolute Temperaturmessung gewährleistet werden. Nachteilig ist hier aber wiederum die Messung an nur einem Messpunkt.

Temperaturmessungen im Zerspanprozess stellen generell hohe Anforderungen an die gewählte Messtechnik, die optimale Sensorlösung muss für den einzelnen Anwendungsfall gewählt werden. Generell sind Kombinationen der hier angesprochenen Temperaturmesssensoren als optimal anzusehen, beispielsweise die Kombination von Zweifarben-Pyrometer und Infrarotkamera.

## **3 Übersicht über Modellierungen der Temperaturen in der Zerspanung**

Aufgrund der beschränkten Zugänglichkeit aller Sensorlösungen gab es wie im ersten Kapitel beschrieben schon sehr früh den Bedarf nach Modellen zur Vorhersage von Temperaturen bei der Zerspanung. Hierbei ist der Großteil der vorhandenen Modelle empirischer Natur, häufig wird mit dem sogenannten Aufteilungskoeffizienten gearbeitet, der das Verhältnis der Wärmeströme in Werkzeug und Span ausdrückt. Die verschiede-

denen Modelle sind hierbei in Abhängigkeit der Peclet Zahl ausgedrückt, welche die Zerspanparameter Schnittgeschwindigkeit und Spannungsdicke enthält. Der Nachteil an empirischen Modellen ist die fehlende physikalische Basis und die fehlende Vorhersagbarkeit von gesamten Temperaturfeldern, dies macht diese Art von Modell inflexibel und schwer übertragbar auf neue Anwendungsfälle. Analytische Modelle basieren dem hingegen auf Lösung der Wärmeleitungsdifferentialgleichung und sind somit prinzipiell als universal zu verstehen. Die verschiedenen in der Literatur vorhandenen Lösungen basieren hierbei meistens auf der analytischen Lösung für eine bewegte Linienwärmequelle. Das Modell von Komanduri und Hou, das als Lösung eine angestellte Bandwärmequelle vorweist ist hierbei das aktuellste Modell und enthält frühere Modelle als Speziallösung.

Neben den analytischen Modellen haben Simulationsmodelle einen weiteren großen Stellenwert, da sie über die analytischen Modelle hinausgehend auf verschiedenste Anwendungsfälle anwendbar sind. Als Beispiel wird im Vortrag das Modell von Jungnickel vorgestellt, welches auf einem ebenen Wärmekapazitäts-Wärmeleitwert-Netzwerk basiert. Leistungen werden in diesem Modell an Span- und Freifläche, sowie in der Scherebene eingebracht. Die statische Streuung der Spannungsparameter wird hierbei innerhalb praktisch anwendbarer Grenzen betrachtet. Die Simulation berechnet dann die Wärmestromanteile in Werkstück, Werkzeug und Span. Die Spannungsparameter sind hierbei ähnlich wie bei den empirischen Modellen in Ähnlichkeitskenngrößen, z. B. dimensionslose Wärmeleitfähigkeit zusammengefasst. Die Ordnungen sind wieder über die Peclet Zahl erfasst. Das Modell bietet die Bildung einfacher mathematischer Gebrauchsformeln als Ergebnis für den praktischen Gebrauch in der Industrie.

## **4 Ausgewählte Anwendungen**

Mit der Vorhersage und dem Verständnis der im Zerspanprozess entstehenden Temperaturen und Wärmeströme können verschiedene industrierelevante Problemstellungen bewältigt werden. Im Folgenden sind exemplarische Beispiele in den Bereichen Prozessauslegung, -überwachung und -regelung für verschiedene Industriezweige beschrieben.

### **4.1 Prozessauslegung – Zertifizierung in der Triebwerksindustrie**

Die Anwendung von Temperaturmesstechniken zur Prozessauslegung im Sinne der Zerspanparameter ist vor allem für Industriebranchen interessant, in denen sicherheitskritische oder sehr teure Produkte gefertigt werden. Ein Beispiel für diese Art der Anforderung stellt die Fertigung von sicherheitskritischen Bauteilen in der Triebwerksindustrie dar. Hierbei wird die Fertigung von rotierenden Teilen anhand der sogenannten Oberflächenintegrität als Qualitätskenngröße bestimmt, einmal eingestellte Zerspanparameter können nach einer zwingend durchzuführenden Zertifizierung nicht mehr verändert werden. Diese so „festgefrorenen“ Prozesse sind extrem unflexibel und als Folge davon sehr konservativ ausgelegt. Eine Korrelation von physikalischen Werten wie der Temperatur kann hier helfen die fixen Strukturen aufzuweiten um die Zertifizierung auf vernünftige Kennwerte basieren zu lassen.

### **4.2 Prozessüberwachung – Adaptive Materialdetektion für die Automobilindustrie**

Ein weiterer Anwendungsfall für den die Temperaturmessung und Modellierung Potenzial bietet ist die Überwachung und Adaption von Fertigungsprozessen. In einem von der Automobilindustrie definiertem Fallbeispiel soll ein neuer Werkstoff für dasselbe Produkt angewendet werden, um dabei die vorhandenen Randbedingungen (Fabrik, Werkzeugmaschinen, Werkzeuge, etc.) weiterhin nutzen zu können, wurde hier die Forderung nach einer Materialerkennung und entsprechender Adaption der Zerspanparameter gefordert. Durch geeignete Messsensorik und Modellierung bezüglich der entstehenden Temperaturunterschiede für die beiden Werkstoffe kann eine solche adaptive Fertigung gewährleistet werden. Die eher als Laborlösung anzusehenden Temperaturmesssensoriken können hierbei durch Korrelation der Sensorsignale durch industriell einsetzbare Sensoriken, wie Wirkleistungsmesssysteme, ersetzt werden.

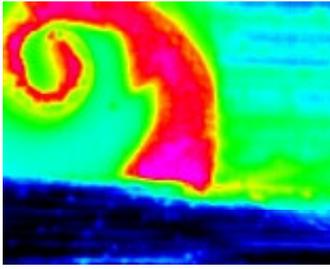
### **4.3 Prozessregelung – Produktorientierte Regelung von Zerspanprozessen**

Im Sinne einer automatischen Prozessregelung für Zerspanprozesse stellt die Temperatur durch geeignete Sensorik oder Ersatzsensorik eine potenziell weitreichende Regelgröße dar. Die für eine Regelung zu definierenden Sollwerte der Regelgröße müssen dabei durch Zerspanversuche zur jeweiligen Qualitätskenngröße korreliert werden (z. B. Zusammenhang gemessene Zerspanntemperatur und Eigenspannungen des Bauteils). Die Stellgröße wie Vorschub und Schnittgeschwindigkeit werden hierbei nach dem Regler durch die thermo-

elastische Verformung von Werkstück, Werkstückaufnahme und Werkzeug gestört. Diese Zusammenhänge müssen bei der Auslegung einer temperaturgeregelten Lösung beachtet werden.

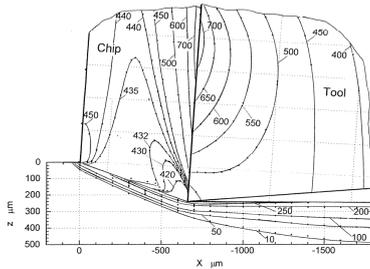
## 5 Literatur

- [KLOC08] Klocke F.; König, W.: Fertigungsverfahren 1, 8. Auflage; Springer Verlag, S. 75 – 91, 2008.
- [RUMF98] [http://www.dartmouth.edu/~library/Library\\_Bulletin/Apr1995/King\\_Rumford.html#fn5](http://www.dartmouth.edu/~library/Library_Bulletin/Apr1995/King_Rumford.html#fn5)
- [GOTT25] Gottwein, E.: Die Messung der Schneidentemperatur beim Abdrehen von Flußeisen, Maschinenbau – Der Betrieb, 4./23. S. 1125-1135, 1925.
- [SCHW33] Schwerd, F.: Über die Bestimmung des Temperaturfeldes beim Spanablauf, Zeitschrift des VDI, 9./77. S. 211-216, 1933.
- [KOMA01] Komanduri, R.; Hou, Z.B.: A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology, Tribology Int., 34, S. 653-682, 2001.
- [BICK50] Bickel, E.: Die Zerspanungsforschung am Werkzeugmaschinenlaboratorium der ETH in Zürich, Industrielle Organisation, 19, S. 237-244, 1950.



# Untersuchungen des Zerspanungsprozesses hinsichtlich auftretender Wärmeströme und Temperaturen

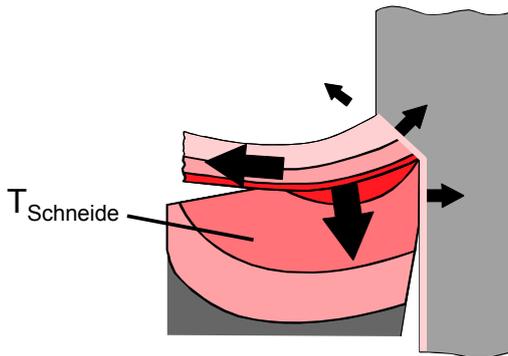
16. Dresdner-WZM Fachseminar



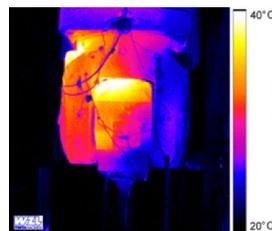
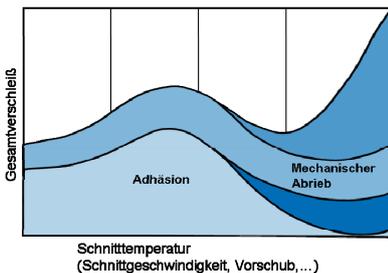
Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann  
Dipl.-Ing. C. Städel  
IWM, TU Dresden

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. F. Klocke  
**Dipl.-Ing. M. Brockmann**  
WZL, RWTH Aachen

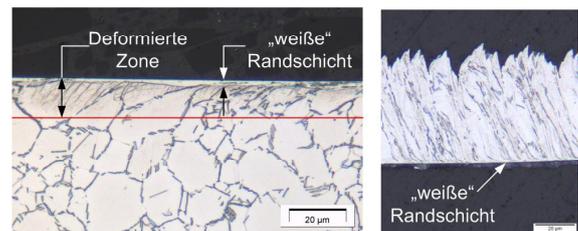
## Relevanz der Temperaturen beim Zerspanen



- Temperatur in der Schneide ist maßgeblich verantwortlich für Verschleiß und Standzeit.
- Versteigung des Temperaturfeldes zur Verringerung (Kompensation, Korrektur) von thermo-elastische Verlagerungen in Werkzeugmaschinen
- Einfluss der Temperatur auf die Oberflächenbeschaffenheit der gefertigten Bauteile



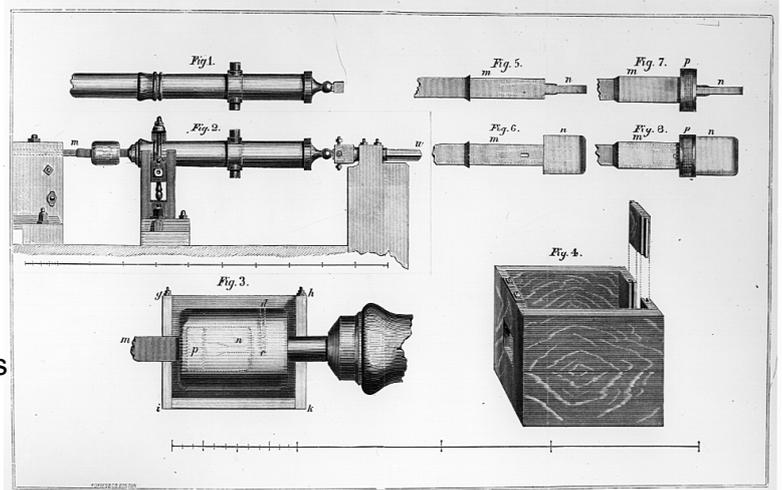
Thermo-elastische Verlagerung



Oberflächenintegrität

## Historischer Überblick der Forschung

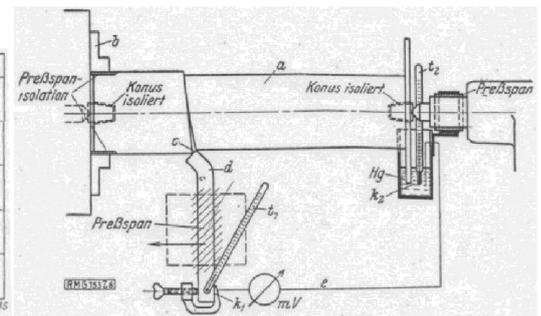
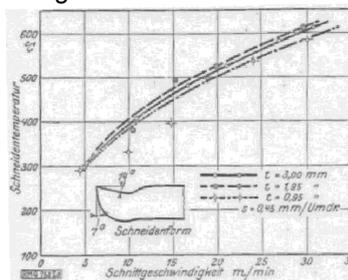
- Bis ins 19. Jhd. „Kalorische Theorie“
  - Kalorische Substanz:
    - Wärmeelement
    - fließt von wärmerem zu kälterem Körper
    - Nicht erzeugbar, nicht zerstörbar
- Benjamin Thompson (Count Rumford) (1798):
  - „Woher kommt die Wärme beim Bohren?“
- Wiederholung der Experimente führte nicht zu Abnahme der „erregten“ Wärme
- „Endliche“ Kalorische Substanz als eigenes Wärmeelement wiederlegt
- → Wärme  $\triangleq$  Bewegung



Quelle: [http://www.dartmouth.edu/~library/Library\\_Bulletin/Apr1995/King\\_Rumford.html#fn5](http://www.dartmouth.edu/~library/Library_Bulletin/Apr1995/King_Rumford.html#fn5)

## Historischer Überblick der Forschung

- Erwin Gottwein (1925):
  - Messung der Temperatur an der Werkzeugschneide während Zerspanung von Flußeisen
  - $T_{\text{Schneide}}$  beeinflusst des Verschleiß des Werkzeugs
  - Thermolement bestehend aus Drehmeißelstahl und Flußeisen
  - Bestimmung von Drehzahl-Temperatur-Kurven



Quelle: Gottwein, Messung der Schneidentemperatur beim ..., Maschinenbau - Der Betrieb, Bd. 4, 1925

- Friedrich Schwerd (1933):
  - Salzlinsenoptik
  - Erste Berührungslose Temperaturmessung der Werkzeugschneide beim Zerspanen

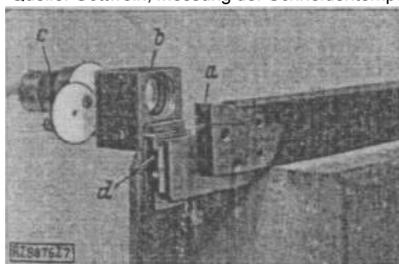
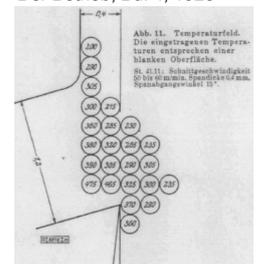


Abb. 7 Ansicht der Salzlinsen-Meßeinrichtung.  
a Werkzeug  
b Stelle, an der sich die Salzlinsen befindet  
c Thermolement  
d Einstellvorrichtung

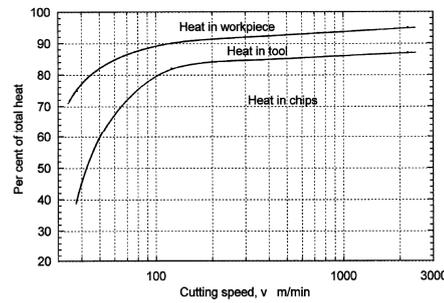


Quelle: Schwerd, Über d. Bestimmung d. Temperaturfeldes..., Zeitschr. d. Ver.. dt. Ingenieure, Bd. 77, 1933

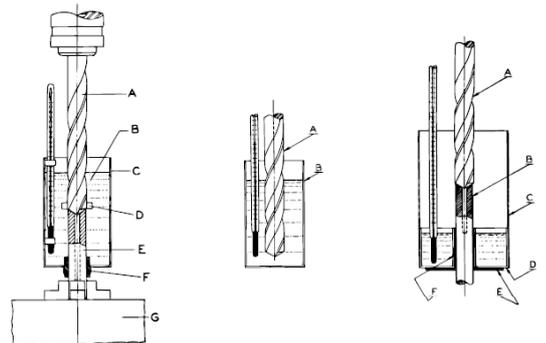
## Historischer Überblick der Forschung

- Schmidt A., Roubik J.  
Kalorimetrische Messungen beim Bohren:

- Gesamtwärmemenge,
- Wärmestrom in die Späne
- Wärmestrom ins Werkzeug

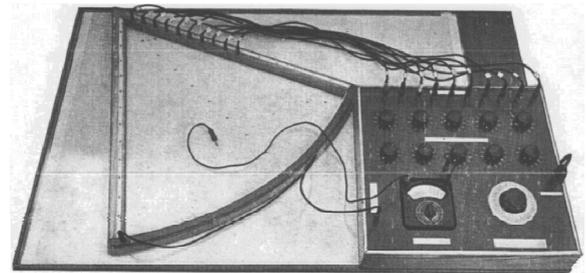
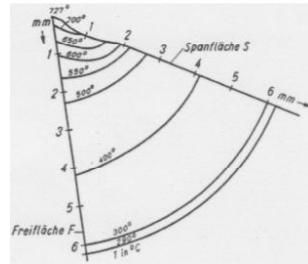


Quelle: Komanduri, Hou, Tribology International 34 (2001)



- Erich Bickel:

- Analogieversuch mit elektrischen Strom an einem als Elektrolyt (Leitungswasser) ausgebildeten Modell
- Messung örtlicher Spannungen
- Erstellung von Äquipotentiallinien
- Abgleich der Analogie (Spannung / Temperatur) durch Referenzmessungen mit Thermofarben am realen WZ



Quelle: Die Temperaruten an der Werkzeugschneide, Industrielle Organisation Bd. 20, 1951

### 1 Einleitung

### 2 Experimentelle Untersuchungen

### 3 Modellierung

### 4 Anwendungen

### 5 Zusammenfassung

## Übersicht Temperaturmesstechniken



### Indirekte Messtechniken

Temperatur-empfindliche Farben

Pulver mit konstanten Schmelzpunkt

Metallurgie

### Zeitaufgelöste Messtechniken

**Thermo-elektrische Messtechniken**  
 • Widerstandsthermometer  
 • Seebeck Effekt

**Strahlungsmesstechniken**  
 • Pyrometrie  
 • Thermografie

## Widerstandsthermometer

### ■ Physikalisches Messprinzip

- Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes

$$\rho_t = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T - 20))$$

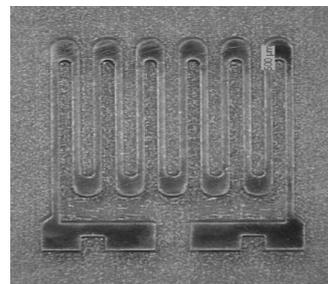


### ■ Vor- und Nachteile

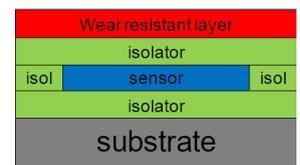
- Spannungsquelle notwendig
- Großer Messfleck
- Begrenzter Temperaturbereich
- genau und zeitstabil
- einfache Signalverarbeitung
- kostengünstig

### ■ Anwendung in der Zerspanung

- Dünnschichtsensor für Smart Machining Tool



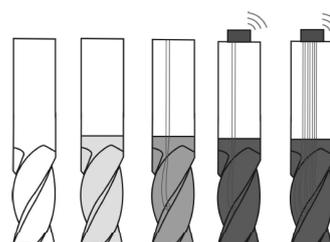
Leiterbahnen Laserablation



Aufbau Dünnschicht



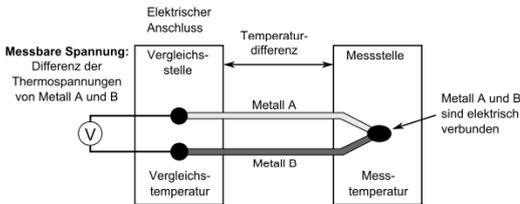
Telemetrie und Smart Tool



## Seebeck Effekt

### ■ Physikalisches Messprinzip

- Spannung zwischen Leitern mit Temperaturdifferenz



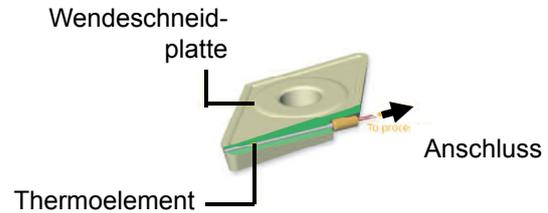
### ■ Vor- und Nachteile

- kleine Spannungen
- Materialabhängigkeit
- Großer Temperaturbereich

Quelle: wikipedia, TMH GmbH, Actarus SAS

### ■ Anwendung in der Zerspanung

- Eindraht-/Zweidrahtthermoelemente
- Werkzeug-Werkstück Thermoelement
- Integrierte Thermoelemente



Fräswerkzeug mit Telemetrie

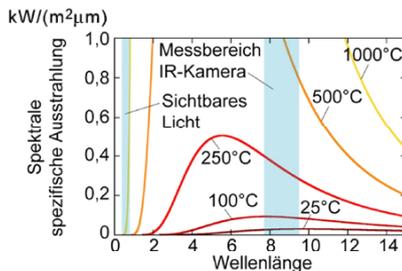


Drehwerkzeug mit Verstärker

## Thermografie

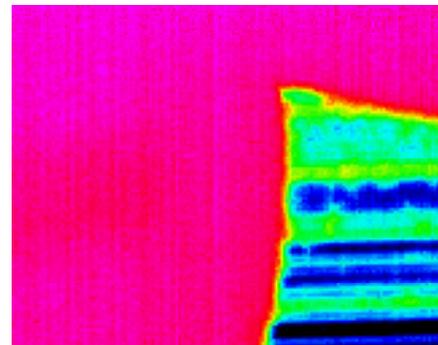
### ■ Physikalisches Messprinzip

- Strahlungsmessung in Wellenlängenbereich



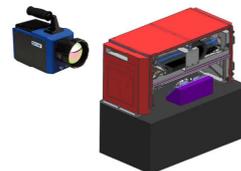
### ■ Anwendung in der Zerspanung

- Laboruntersuchungen Zerspanung
- Industrielösungen



### ■ Vor- und Nachteile

- Direkte Messung Temperaturverteilung
- Emissionsgradabhängigkeit
- Hohe relative Genauigkeit



Grundlagenprüfstand



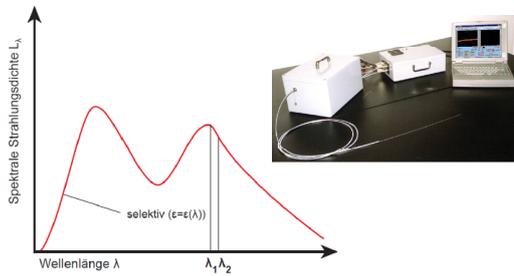
Industrielle Lösung FLIR A320

Quelle: WSA RWTH, FLIR

## Pyrometrie

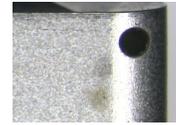
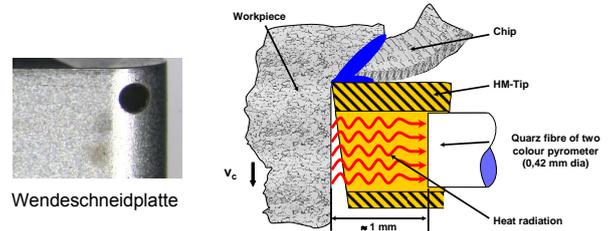
### ■ Physikalisches Messprinzip

- Strahlungsmessung bei zwei Wellenlängen



### ■ Anwendung in der Zerspaltung

- Laboruntersuchungen Zerspaltung
- Integrierte Schleifscheibe



Pyrometer integriert in Schleifscheibe

### ■ Vor- und Nachteile

- Nur punktuelle Messung
- genaue Absoluttemperatur
- geringe Störeffekte
- Hohe Abtastraten

Quelle: WSA RWTH, IntelliTool Consortium

## 1 Einleitung

## 2 Experimentelle Untersuchungen

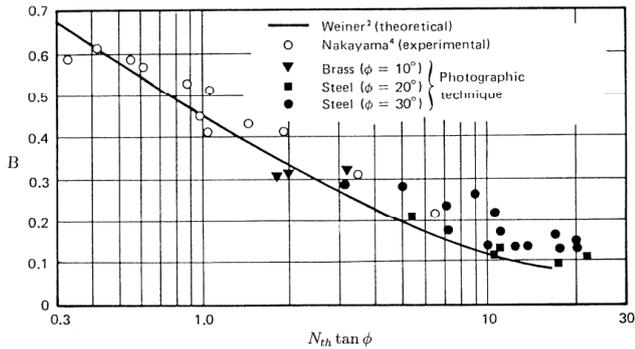
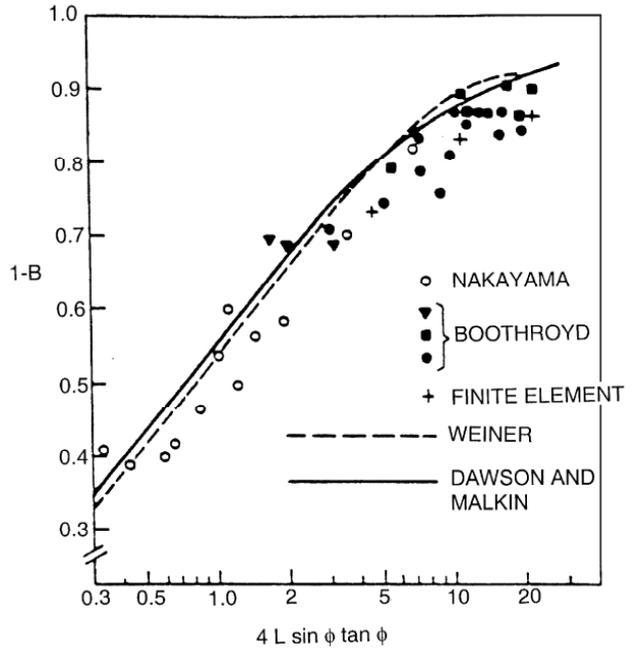
## 3 Modellierung

## 4 Anwendungen

## 5 Zusammenfassung

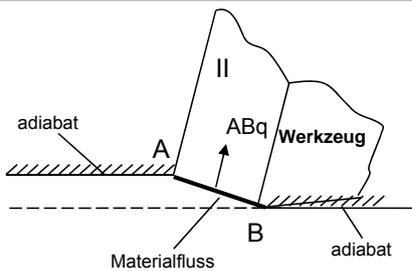
## Empirische Modelle

Source	Equation for the determination of B
Trigger and Chao [13]	$B = 0.1$
Loewen and Shaw [14]	$(1 - B) = 1 / \left( 1 + 1.328 \sqrt{\frac{a\gamma}{v_c t_c}} \right)$
Leone [15]	$B = 1 / \left( 1 + 1.13r \sqrt{\frac{L v_c}{a}} \right)$
Boothroyd [17]	$B = f(N_{th} \tan \phi)^n$

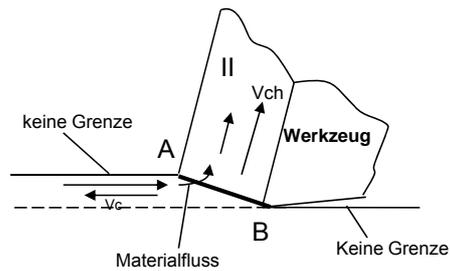


Quelle: Komanduri und Hou, Boothroyd, Dawson und Malkin

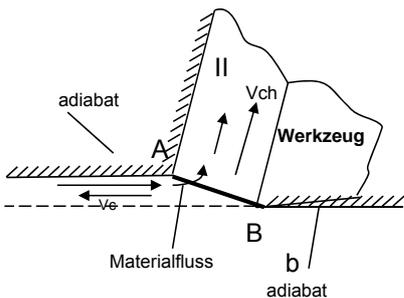
## Analytische Modelle



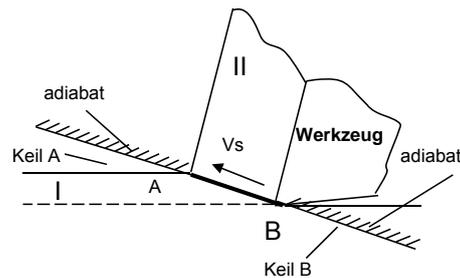
Trigger und Chao (1951)



Hahn (1951)



Chao und Trigger (1953)



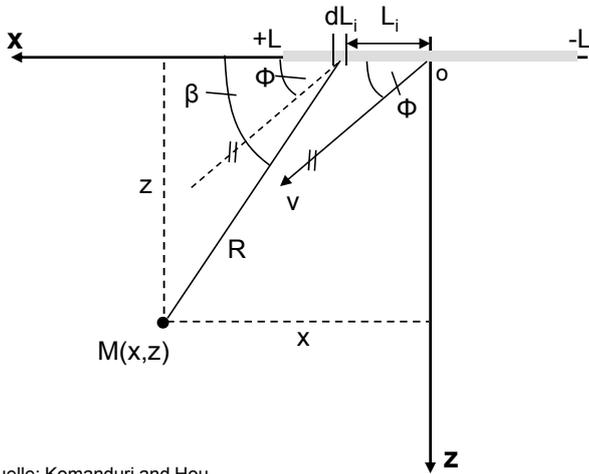
Loewen und Shaw (1954)

Quelle: Trigger und Chao, Hahn, Chao und Trigger, Loewen und Shaw

**Analytisches Modell Komanduri und Hou**

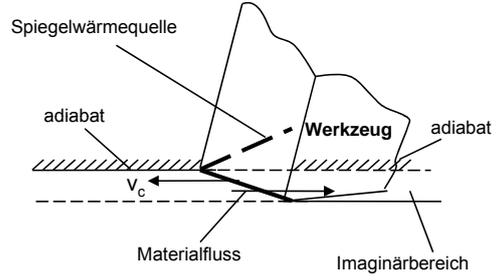
Bewegende angestellte Bandwärmequelle

$$\Theta_m = \frac{\dot{q}''}{2\pi\lambda} \int_{-L}^{+L} e^{-vR\cos(\beta-\Phi)/2a} \cdot K_0(Rv/2a) dL_i$$

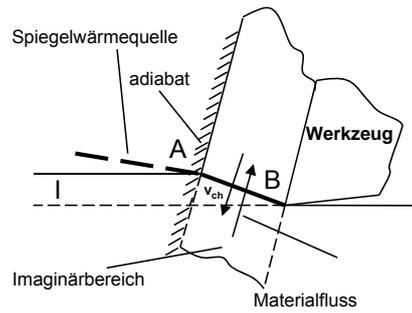


Quelle: Komanduri and Hou

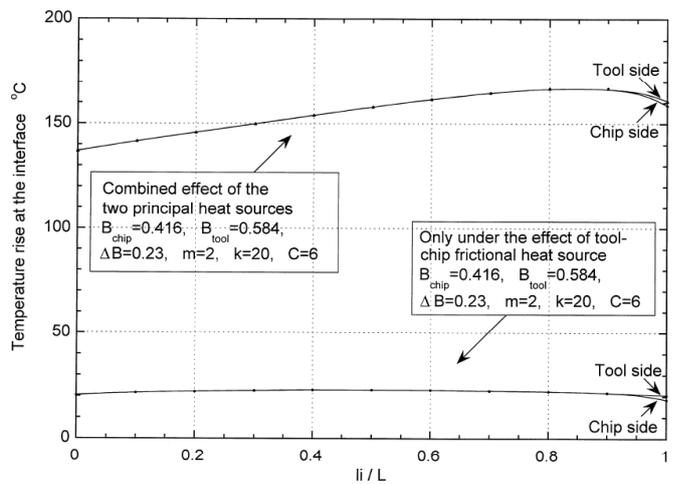
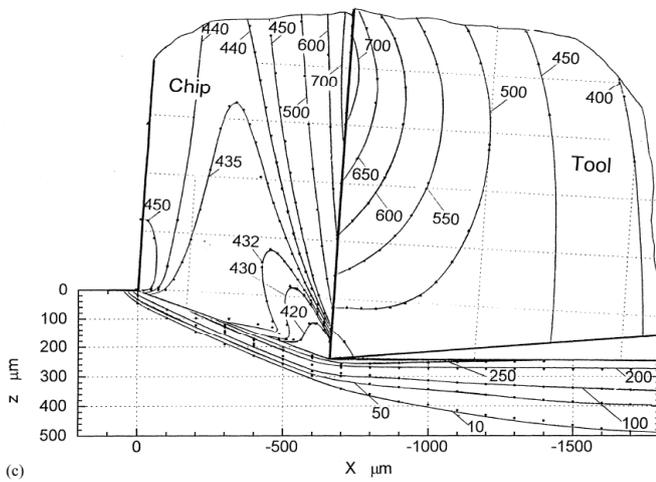
Modellierung für Temperaturverteilung im Werkstück



Modellierung für Temperaturverteilung im Span



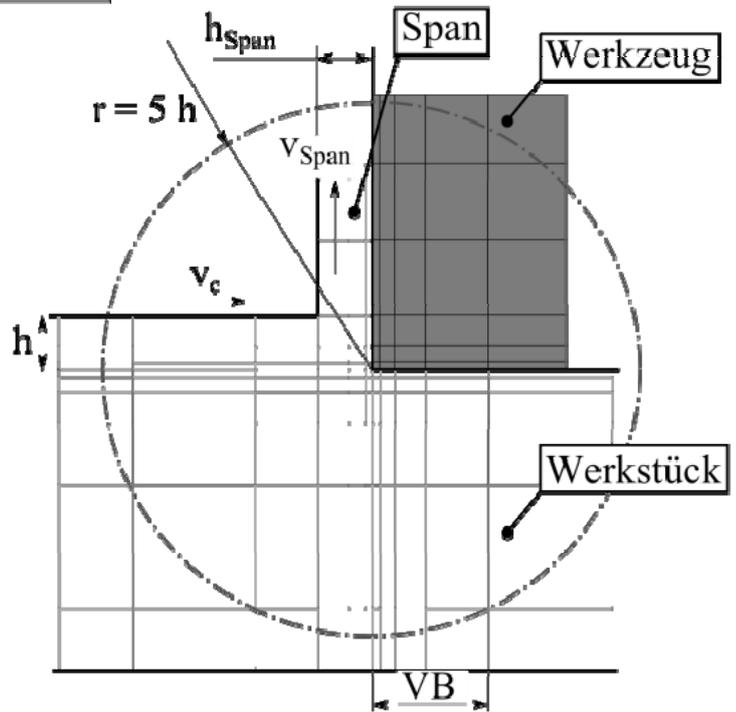
**Analytisches Modell - Auswertung**



Quelle: Komanduri and Hou

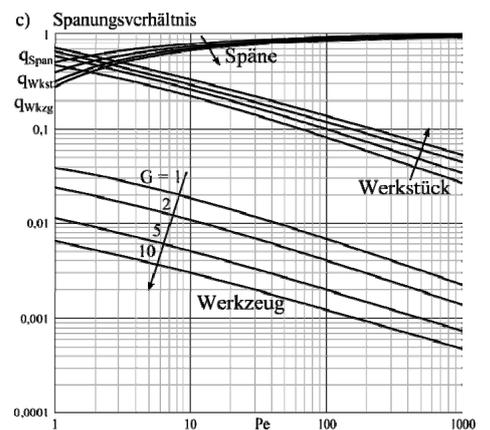
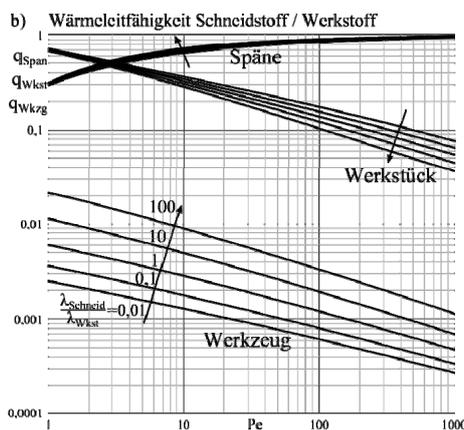
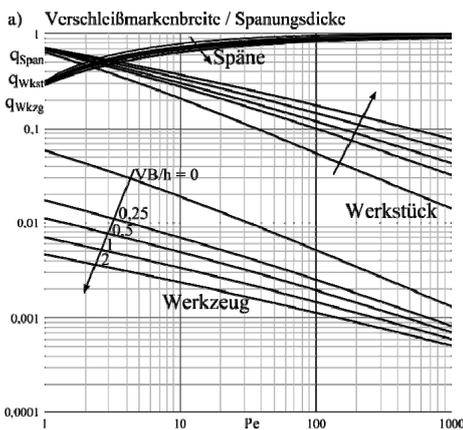
### Simulationsmodell Jungnickel

- Ebenes Wärmekapazitäts-Wärmeleitwert-Netzwerk
- Leistungseinbringung an Span- und Freifläche sowie in Scherebene
- Statistische Streuung der Spanungsparameter innerhalb praktischer Grenzen
- Ermittlung der Wärmestromanteile  $q_{Wkst}$ ,  $q_{WZ}$  und  $q_{Span}$



### Simulationsmodell - Auswertung

- Zusammenfassung von Spanungsparametern zu Ähnlichkeitskenngößen  $VB/h$ ,  $\lambda_{Schneid}/\lambda_{Wkst}$ ,  $G=b/h$
- Ordnen über Péclet-Zahl:  $Pe = (v_c \cdot h \cdot c_p \cdot \rho) / \lambda$
- Bildung einfacher mathematischer Gebrauchsformeln  $q_{Span/Wkst/WZ} = f(Pe, VB/h, \lambda_{Schneid}/\lambda_{Wkst}, G)$



1 Einleitung

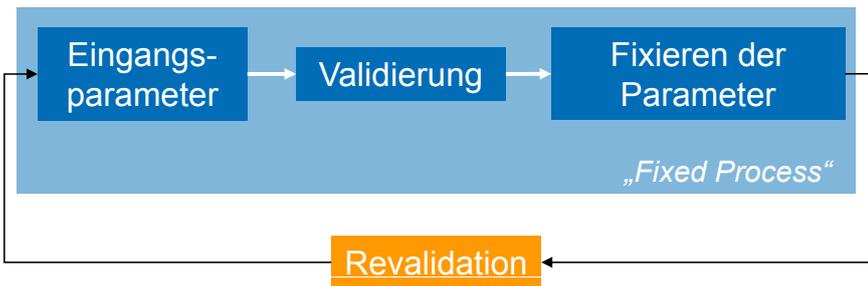
2 Experimentelle Untersuchungen

3 Modellierung

4 Anwendungen

5 Zusammenfassung

Prozessauslegung



**Anforderung:** LCF

- Normtests zu Nachweis der Lebensdauer

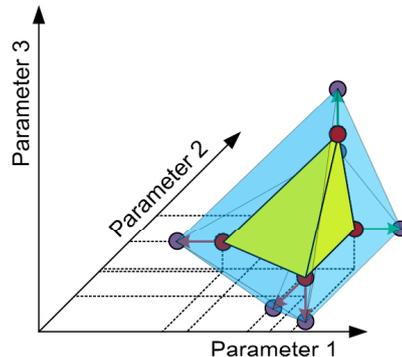
→ **Zertifikat**



**Anforderung:** Oberfläche Rauheit Werkstoff

- Qualität beruht auf Güte des Fertigungsprozesses

→ **Bauteilzertifikat**



**Prozessauslegung**

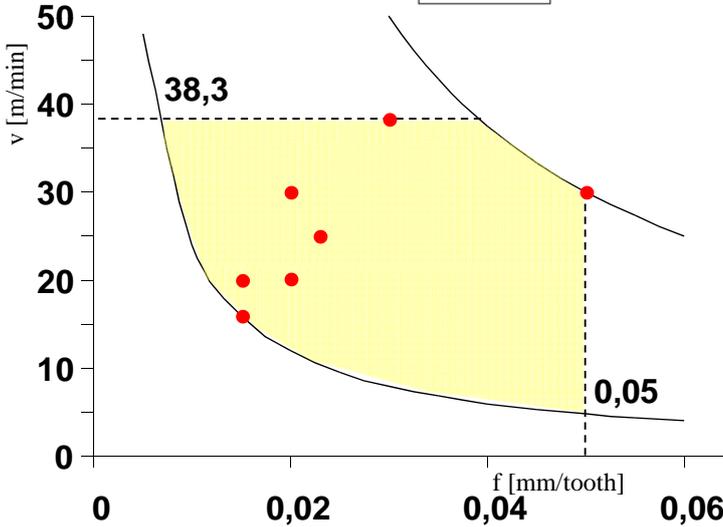
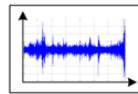
Péclet Zahl

$$Pe = \frac{v \cdot h}{a}$$

SI



PÜ



Quelle: ACCENT Consortium, Rolls-Royce plc



**Prozessüberwachung**

■ **Werkstoffe**

- Grauguss(GG 25)
- Gusseisen mit Vermikulargraphit(CGI 450)
- duktil, hohe Festigkeit, gute Dämpfungseigenschaften,...

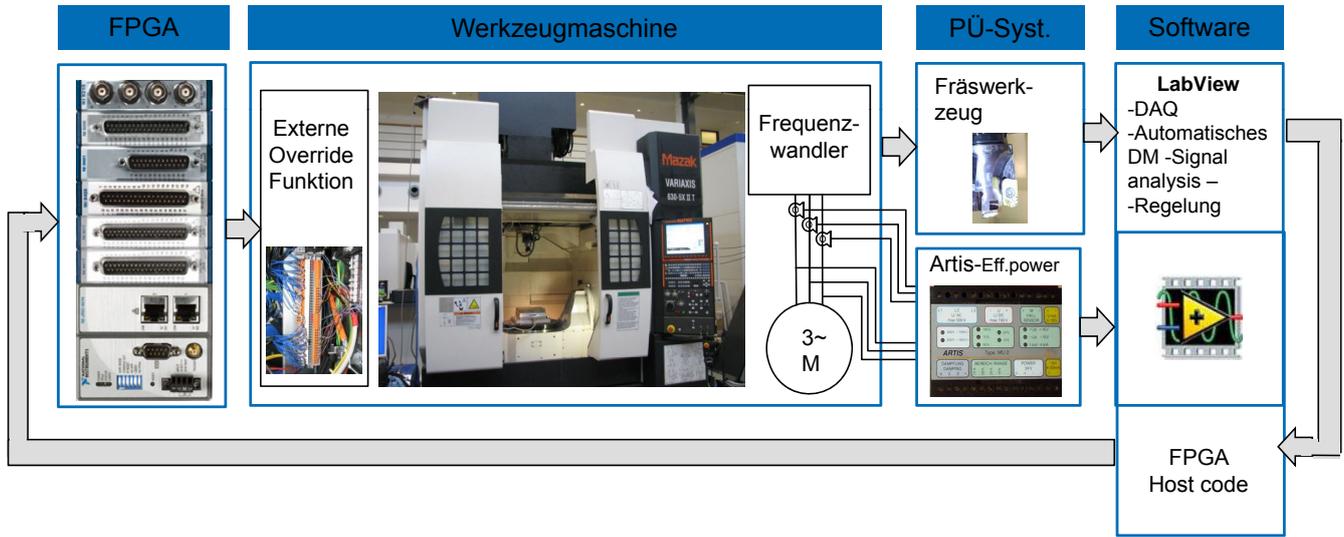
■ **Ziel**

- Produktion von beiden Werkstoffen in derselben Produktionslinie mit denselben Randbedingungen (Werkzeug, Maschine,...)
- Automatische Überwachung und Adaption der Zerspanungsparameter



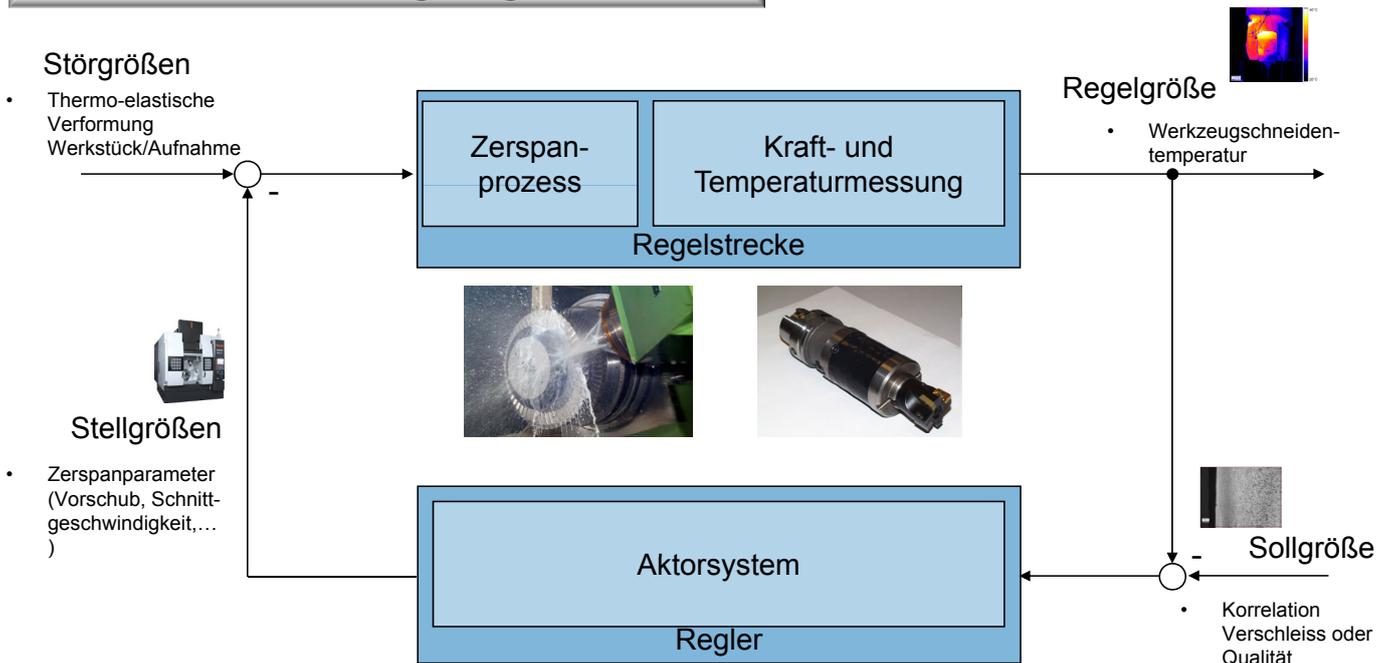
Quelle: ADACOM Consortium, DIAD, CR FIAT, FIAT Group

## Prozessüberwachung



Quelle: ADACOM Consortium, DIAD, CR FIAT, FIAT Group, Actarus SAS

## Prozessregelung



1 Einleitung

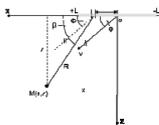
2 Experimentelle Untersuchungen

3 Modellierung

4 Anwendungen

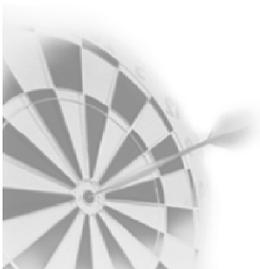
5 Zusammenfassung

Messung und Modellierung



- Temperaturen und Wärmeströme sind von signifikanter Bedeutung für die Werkzeugmaschine, Verschleiß des Werkzeuges und die **Qualität** des Produktes.
- **Messen** von Temperaturen im Zerspanprozess ist aufwändig und teilweise kostenintensiv, es existieren aber industrielle Lösungen für fast alle Sensorprinzipien.
- Die **Modellierung** ist ein elementarer Bestandteil der Anwendung da nicht an jedem Ort gemessen werden kann.

Anwendungsgebiete



- **Prozessauslegung:** Definition der Parameter anhand physikalischer Kennwerte zur Expansion „festgefrorener“ Prozesse.
- **Prozessüberwachung:** Verschleißüberwachung des Werkzeuges während des Prozesses.
- **Prozessregelung:** Produktorientierte Regelung von Zerspanprozessen.

# **Verlustleistungen in einer Vorschubachse und die daraus resultierende Temperaturverteilung**

Prof. Dr.-Ing. R. Werner; Dipl.-Ing. St. Winkler  
TU Chemnitz, EWA

Prof. Dr.-Ing. Ch. Brecher; Dipl.-Ing. D. Haber  
RWTH Aachen, WZL

# VERLUSTLEISTUNGEN IN EINER VORSCHUBACHSE UND DIE DARAUS RESULTIERENDE TEMPERATURVERTEILUNG

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher; Prof. Dr.-Ing. R. Werner; Dipl.-Ing. D. Haber; Dipl.-Ing. S. Winkler

## 1. Einleitung

Im Werkzeugmaschinenbau steigen die Anforderungen an die Produktivität, Effizienz und Fertigungsgenauigkeit. Durch die bessere Beherrschbarkeit von Geometrie und Dynamik gewinnt das thermische Verhalten zunehmend an Bedeutung. In Werkzeugmaschinen befinden sich innere Wärmequellen und -senken, die zusätzlich zu Umgebungseinflüssen zu einer inhomogenen Temperaturverteilung führen. Zu den Wärmequellen innerhalb der Maschinenstruktur zählen neben der Hauptspindel alle Komponenten, die für den Vorschub der Achsen verantwortlich sind. Dazu zählen Motoren, Kugelgewindetriebe, Zahnstangen, Ritzel und Führungssysteme. Diese erzeugen Wärme durch verschiedene Mechanismen wie Reibung, Strom-Wärme-Verluste und Ummagnetisierungsverluste. Durch die Erwärmung wird einerseits Wärme an die Umgebung und angrenzende Bauteile abgegeben, andererseits dehnen sich die Komponenten aus und tragen so zu einer Verschiebung zwischen Werkstück und Werkzeug bei.

Die Kenntnis des thermoelastischen Verhaltens der Achssysteme ist sowohl Grundlage für eine erfolgreiche Korrektur als auch Kompensation der Verlagerungsabweichungen in Werkzeugmaschinen. Zur Verwendung verschiedener Achssysteme in einer Simulation ist eine solide Datenbasis in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern wie Vorschub, Leistung, Baugröße, Schmierung, Last und Ausführung bzw. Bestromung des Motors notwendig. Die Variation dieser Parameter und die Untersuchung des sich einstellenden Temperaturfeldes sowie der Verformungen sind auf der Werkzeugmaschine aus Zugänglichkeitsgründen und da nicht alle Parameter wie beispielsweise die Baugröße variiert werden können, nicht möglich. Daher sind umfassende Prüfstandsuntersuchungen erforderlich. Zur Modellierung einer gesamten Vorschubachse wird das Verhalten von Linearmotoren und Führungssystemen getrennt voneinander im Sonderforschungsbereich (SFB) Transregio 96 untersucht. Die entstehenden Modelle können direkt in ein Gesamtmodell einer Werkzeugmaschine übertragen werden.

## 2. Antrieb

Einer der untersuchten Vorschubantriebe ist ein eisenloser Linearmotor. Als Vorschubantriebe in Werkzeugmaschinen gewinnen elektrische direkte Linearantriebe mehr und mehr an Bedeutung. Mit ihnen sind prinzipiell höhere Positioniergenauigkeiten und Wirkungsgrade möglich, da bei Direktantrieben keine zusätzliche Umformung der Bewegung, beispielsweise mit Getrieben oder Gewindespindeln, notwendig ist.

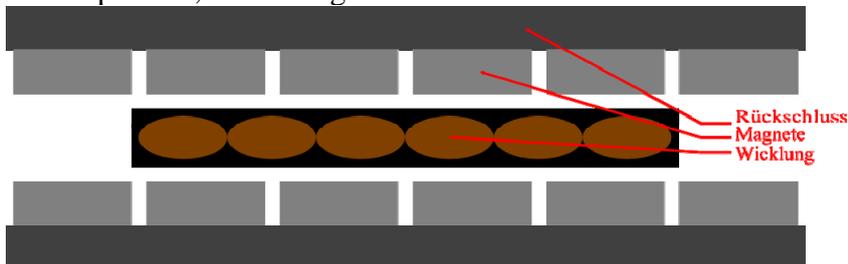


Bild 1: Prinzipieller Aufbau des Linearmotors

Grundsätzlich kann jede Ausführungsform elektrischer Motoren ebenfalls auf eine lineare Variante angepasst werden. Da lineare Motoren über vergleichbare Charakteristiken verfügen wie konventionelle Motoren bietet es sich für Vorschubantriebe an ebenfalls permanent erregte Synchronmotoren zu verwenden, da diese ebenso wie die rotierenden Varianten über hohe Leistungsdichten verfügen. Bei zusätzlicher eisenloser Ausführung des Motors können die Ummagnetisierungsverluste

stark reduziert werden, da sich im Innern der Maschine keine ferromagnetischen Werkstoffe befinden, in denen diese Verluste entstehen können.

Neben den mechanischen Verlusten belaufen sich die Gesamtverluste des Motors in erster Näherung auf die Strom-Wärme-Verluste der Wicklungen und die in den Permanentmagneten induzierten Wirbelstromverluste. Für eine genaue Betrachtung des Einsatzes von Linearantrieben in Werkzeugmaschinen müssen die Einzelverluste entsprechend bestimmt werden, um eine bestmögliche Aussage über die Höhe und den Ort des Wärmeeintrages in die Werkzeugmaschine machen zu können.

## 2.1 Verlustbestimmung

Lineare Motoren im Allgemeinen und Direktantriebe im Speziellen verhalten sich nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie andere Motoren auch. Demnach lassen sich die Verluste prinzipiell ebenfalls nach den gleichen Methoden bestimmen.

Für die Verlustbestimmung gibt es eine Reihe standardisierter Messverfahren, welche alle darauf basieren, dass der Motor in einem stationären Zustand betrieben wird. Zu diesem Zweck werden die Ströme und Spannungen des Motors gemessen und anschließend als arithmetischer Mittelwert aus dem Produkt der beiden Größen die elektrische Leistung gebildet. Um die Abweichungen bei diesem Verfahren zu minimieren wird mit entsprechend langen Integrationszeiten gearbeitet.

Linearmotoren werden auf Grund des meist kurzen Verfahrenswegs und des vorgegebenen Verfahrens im Normalfall nicht in einem stationären Zustand betrieben, daher stehen auch bestenfalls Momentanwerte der elektrischen Größen zur Verfügung.

Es ist daher vorteilhaft die Verluste auf andere Größen als den elektrischen beziehen zu können. Bei Vorschubantrieben bieten sich zu diesem Zweck die Geschwindigkeit bzw. die abgeforderte Kraft an. Bei Synchronmaschinen lässt sich zu diesem Zweck eine Motorkonstante aufstellen, die das direkte Verhältnis von Strom und Kraft angibt. Für die Bestimmung der Konstante ist es notwendig die gesamte aufzubringende Kraft des Motors, auch die Reibkraft des Führungssystems, zu betrachten.

Für den untersuchten Motor ergibt sich beispielsweise für eine Geschwindigkeit von 1m/s eine Reibkraft von 80N und ein Strom von 0,6A. Die Motorkonstante ergibt sich damit zu 133N/A, was dem Wert entspricht, der im Datenblatt des Motors angegeben wird.

## 2.2 Thermisches Verhalten

Der verwendete Motor ist von der Bauform her hoch und schmal, daher wird der Wärmetransport hauptsächlich über die Seiten hin stattfinden. Gleichzeitig wird durch den verwendeten magnetischen Rückschluss sichergestellt, dass sich die Außenseiten der jeweiligen Sekundärteile auf einem nahezu gleichen thermischen Potential befinden.

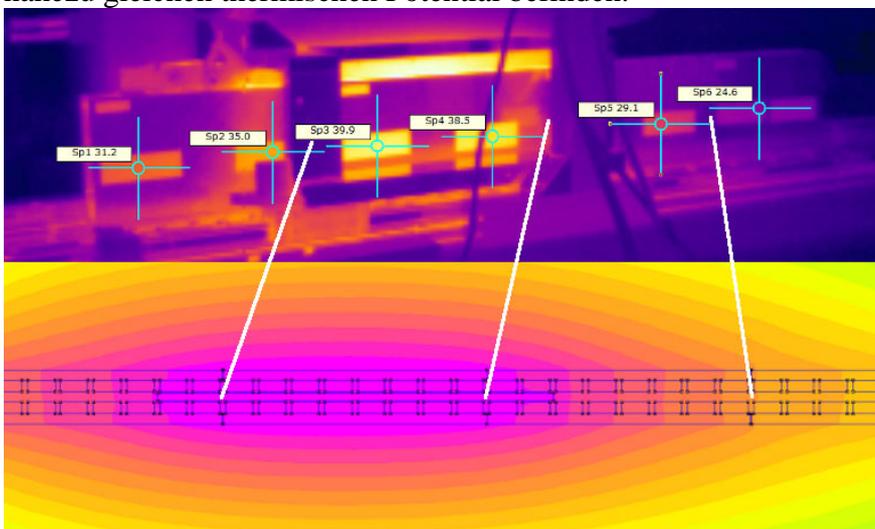


Bild 2: Vergleich Erwärmung Motor und FEM-Rechnung

Der magnetische Rückschluss sorgt durch seine große thermische Kapazität gleichzeitig dafür, dass zeitliche Schwankungen des Wärmeeintrags durch das Verfahren des Motors ausgeglichen werden. Eine erste Temperaturmessung (Bild2) bestätigt dies. Der größte Temperaturunterschied befindet sich am arithmetischen Mittelpunkt des Fahrwegs. Ob dadurch eine statische Simulation durch entsprechende Platzierung des Primärteils ausreichend ist, müssen weitere Messungen zeigen.

### 3. Linearführungen

Führungen und Lagerungen können je nach physikalischem Prinzip in folgende Gruppen unterteilt werden:

- Hydrodynamische
- Hydrostatische
- Aerodynamische
- Elektromagnetische
- Wälzführungen und -lager
- Gleitlager

In Vorschubachsen von Werkzeugmaschinen werden hauptsächlich lineare Wälzführungen in Form von Profilschienenführungen eingesetzt. Sie bestehen aus Führungsschienen und -schuhen. Die Führungsschuhe, auch Führungswagen genannt, umfassen die Schiene. Die Wälzkörper – Kugeln oder Rollen – befinden sich zwischen Wagen und Linearschiene und werden im Inneren des Wagens umgelenkt und zurückgeführt.

Im Teilprojekt B03 „Komponenten- und Baugruppenuntersuchung“ des SFB Transregio 96 werden Profilschienenführungssysteme (PSF) als eine der wichtigsten thermisch aktiven Baugruppen in der Werkzeugmaschine untersucht. In PSF entsteht durch die Reibung zwischen Wälzkörper, Schiene und Wagen Wärme, die einerseits zur Ausdehnung der Komponenten an sich und andererseits zu einem Wärmeübergang an benachbarte Komponenten führt, welche sich wiederum inhomogen ausdehnen und damit schwer vorherzusehende und Fertigungsfehler nach sich ziehen.

Zur Simulation von Führungssystemen muss bekannt sein, wie viel Wärmeleistung durch Reibung entsteht und welcher Anteil davon in welches Bauteil eingebracht wird. Des Weiteren müssen die Wärmeübergangsbedingungen von Schiene und Schuh zu ihren benachbarten Komponenten und der Umgebung bekannt sein.

Die gesamte am Reibkontakt entstehende Wärmeleistung  $\dot{Q}_{\text{ges}}$  entspricht dem Produkt aus der Reibkraft  $F_R$  und der Verfahrgeschwindigkeit und teilt sich in einen Wagen- und einen Schienenanteil auf:

$$\dot{Q}_{\text{ges}} = F_R \cdot v = \dot{Q}_{\text{Sch}} + \dot{Q}_{\text{Wag}} \quad (3.1)$$

Die Höhe der Gesamtwärmeleistung sowie der beiden Anteile hängt von verschiedenen Parametern wie Vorschub, Vorspannung, Schmierung, Belastung, Bauform und Baugröße ab. Diese Vielzahl an Parametern können nur bei der Untersuchung von Führungssystemen auf einem Prüfstand variiert werden, da in einer Werkzeugmaschine zwar verschiedene Verfahrgeschwindigkeiten, aber nur eine Belastung durch die vorhandene Gewichtskraft und auch nur eine Schmierungsart realisiert werden können. Die schlechte Zugänglichkeit in der Werkzeugmaschine macht eine detaillierte thermische Untersuchung unmöglich. Daher werden zunächst PSF eines Typs auf dem in Bild 3 dargestellten Prüfstand untersucht.

Zwei Profilschienen werden gegenüber an einem Träger montiert und miteinander verspannt. Dadurch kann künstlich eine Gewichtskraft bis zu 13 kN auf die Prüfschiene aufgebracht werden. Der Antrieb erfolgt über einen Linearmotor. Dieser ist über eine Kraftmesseinheit mit Dehnmessstreifen (DMS) zur Bestimmung der Reibkraft mit dem Prüfschuh verbunden.

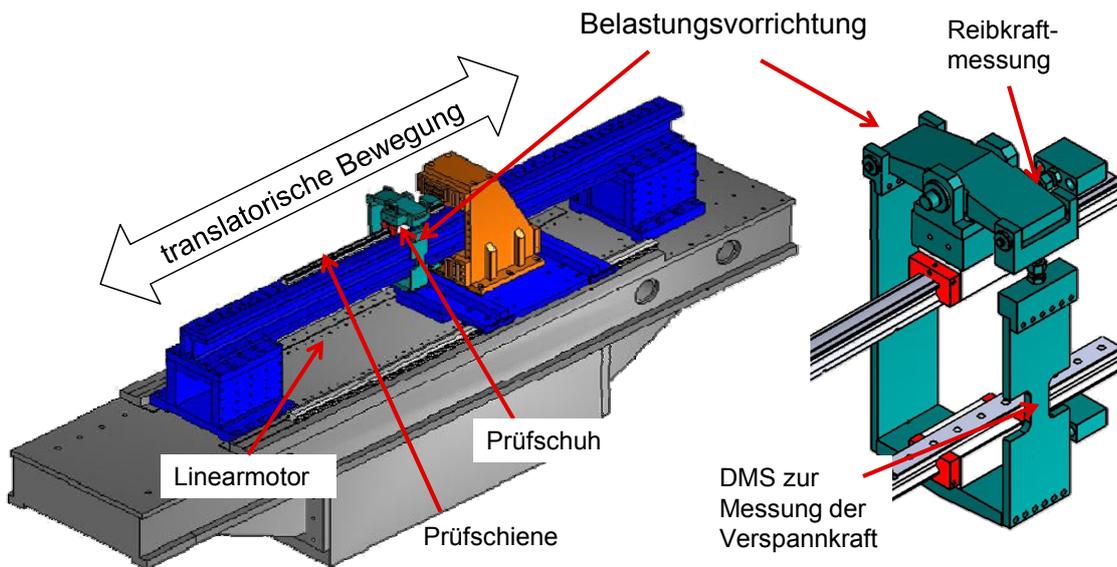


Bild 3: Prüfstand zur Untersuchung der Profilschienenführungssysteme

Für eine erste Abschätzung der Temperaturverteilung wird davon ausgegangen, dass das Verhältnis zwischen  $\dot{Q}_{\text{sch}}$  und  $\dot{Q}_{\text{Wag}}$  bei einer Änderung der Geschwindigkeit konstant bleibt:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{sch}_{v_1}}}{\dot{Q}_{\text{sch}_{v_2}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{wag}_{v_1}}}{\dot{Q}_{\text{wag}_{v_2}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{ges}_{v_1}}}{\dot{Q}_{\text{ges}_{v_2}}} \quad (3.2)$$

Die Temperatur in der Führungsschiene einer Werkzeugmaschine wurde bei den Verfahrgeschwindigkeiten 20 und 30 m/min gemessen. Mit Hilfe eines FE-Modells konnte anschließend aufgrund dieser gemessenen Temperaturen das Verhältnis der Wärmeleistungen annähernd bestimmt werden:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{sch}_{20}}}{\dot{Q}_{\text{sch}_{30}}} = 0,689 \quad (3.3)$$

Zur Validierung wurde eine baugleiche Führungsschiene auf dem oben beschriebenen Prüfstand mit einer ähnlichen Gewichtskraft wie in der Werkzeugmaschine belastet und die Reibkraft bei den beiden Geschwindigkeiten gemessen. Daraus ergibt sich das folgende Verhältnis:

$$\frac{P_{V_{20}}}{P_{V_{30}}} = \frac{F_{R_{20}} \cdot 20}{F_{R_{30}} \cdot 30} = 0,627 \quad (3.4)$$

Trotz großer Unsicherheiten wie der Untersuchung von Schienen eines anderen Herstellers, dem Umgebungtemperatureinfluss, der Schmierung und Vorspannung, ähneln sich die beiden Werte. Das Vorgehen ist vielversprechend, zur genauen Erfassung der Wärmeströme in Führungsschiene und -schuh sind allerdings noch umfassende Prüfstandsuntersuchungen erforderlich. Dabei werden die einzelnen Komponenten so modifiziert, dass Wärmeströme und Temperaturen gezielt erfasst werden können. Des Weiteren werden verschiedene Belastungen und Geschwindigkeiten, Schmiermittel und Baugrößen untersucht um als Grundlage für Simulationen eine breite Datenbasis zu schaffen. Mit der realistischen Simulation von Führungssystemen wird es möglich sein, Fertigungsungenauigkeiten von Werkzeugmaschinen schon in der Konstruktionsphase abschätzen zu können.

# Verlustleistungen in einer Vorschubachse und die daraus resultierende Temperaturverteilung

Prof. Dr.-Ing. R. Werner, Dipl.-Ing. S. Winkler – EWA, TU Chemnitz

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher, Dipl.-Ing. D. Haber – WZL, RWTH Aachen

16. Dresdner WZM-Fachseminar am 21. März 2013

---

**1** Einleitung

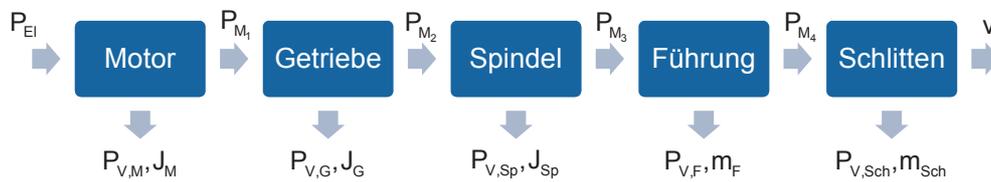
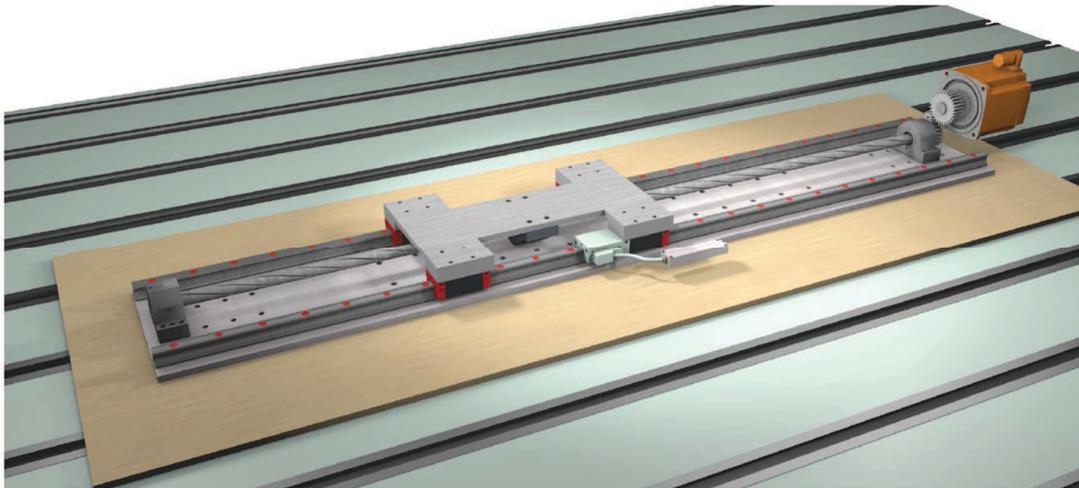
**2** Linearmotoren

**3** Führungsschienen

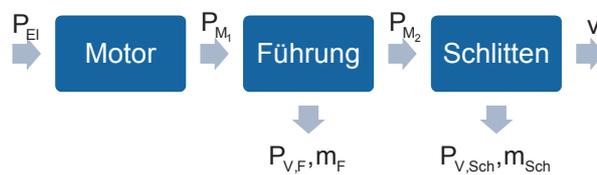
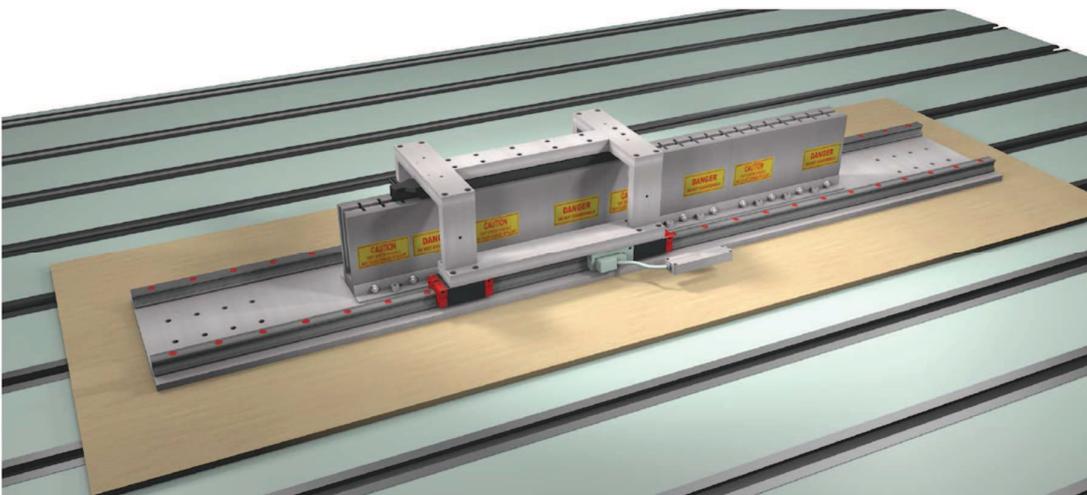
**4** Ausblick

---

„Klassische“ Vorschubachse



Vorschubachse mit Direktantrieb

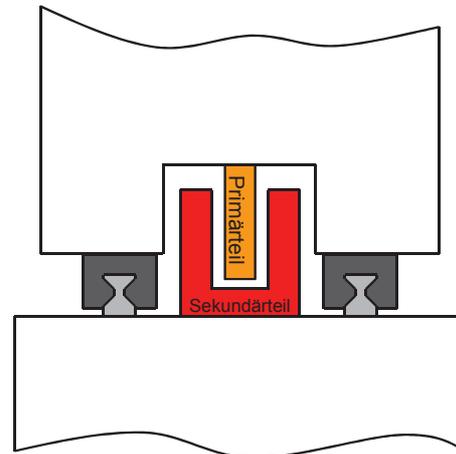


1 Einleitung

2 Linearmotoren

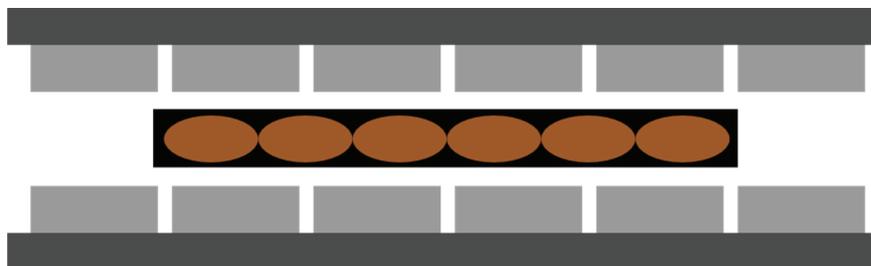
3 Führungssysteme

4 Ausblick



Linearmotoren: Übersicht

Parker Hannifin ML50



- Synchroner Linearmotor
- Hohe Leistungsdichte und Überlastfähigkeit  $F_{Max} = 2541 \text{ N}$ ,  $F_N = 568 \text{ N}$
- Eisenlos, daher keine Ummagnetisierungsverluste

## Linearmotoren: Verlustbestimmung

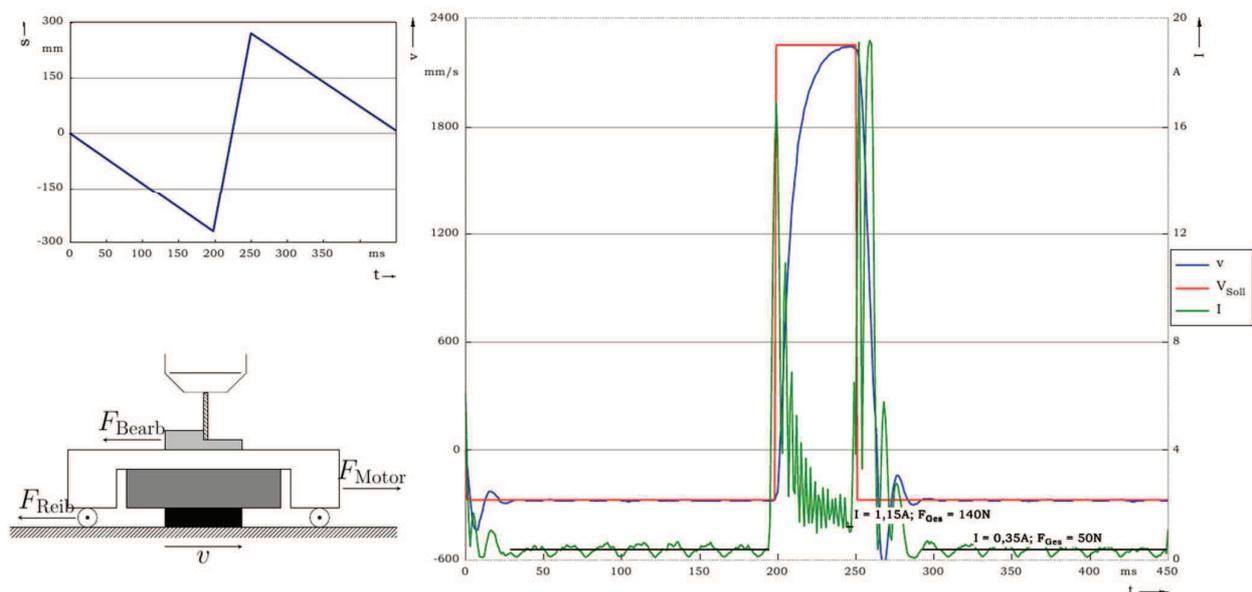
### Leistungsmessung

Allgemein:  $P = \frac{1}{T} \int_T u(t) \cdot i(t) dt$

- Praktisches Vorgehen:
    - Da im Allgemeinen  $T_{\text{integration}} \neq T$  gilt, wird eine lange Integrationszeit  $T_{\text{integration}} \gg T$  gewählt um den Fehler zu minimieren
  - Problem Linearmotor:
    - Der Verfahrweg und damit die Verfahrzeit sind begrenzt
      - $T_{\text{verfahr}} \approx T_{\text{integration}}$
      - Damit ist keine sinnvolle Leistungsmessung möglich
- Für schnelle Vorgänge sind andere Verfahren zur Verlustbestimmung notwendig

## Linearmotoren: Verlustbestimmung

Verlustbestimmung über die Motorkraft:  $F = k_F \cdot I = 130 \frac{N}{A} \cdot I$



## Linearmotoren: Temperaturverteilung

### Versuchsaufbau

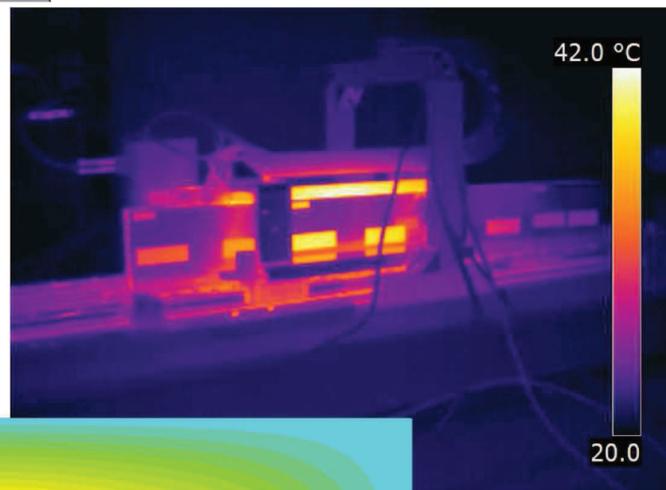
Vorgaben für Erwärmungslauf:

- Sinusförmiger Verlauf
- 700 mm Verfahrweg
- 330 ms Verfahrzeit
- 11 kg bewegte Masse

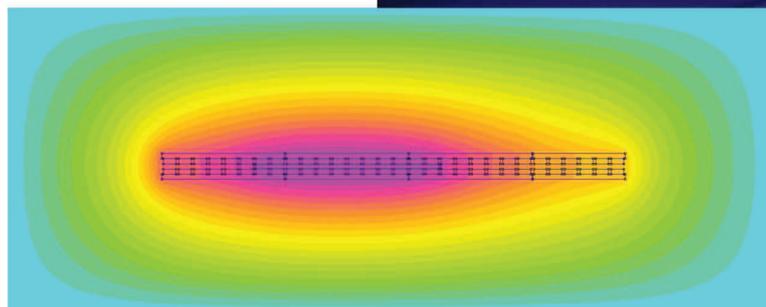


## Linearmotoren: Temperaturverteilung

### Messung



### FEM-Modell

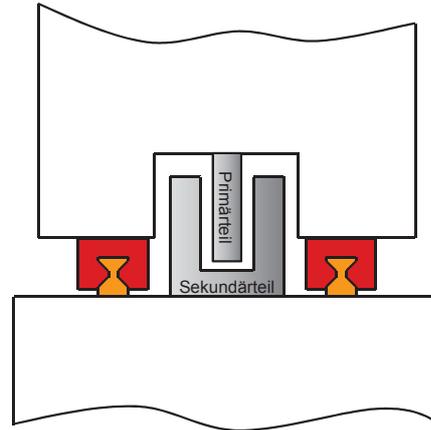


1 Einleitung

2 Linearmotoren

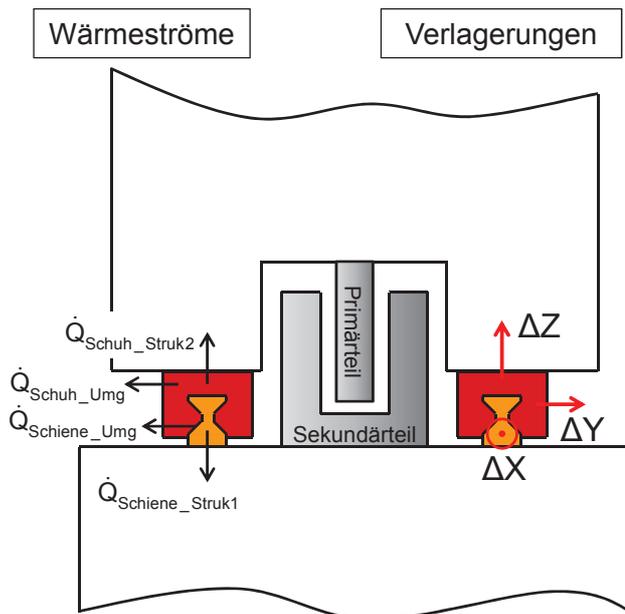
3 Führungssysteme

4 Ausblick



Führungssysteme

- Führungssysteme bestehend aus:
    - Führungsschiene
    - Führungsschuh
  - Beeinflussung der Werkzeugmaschinen-  
genauigkeit durch:
    - Temperatureinbringung in benachbarte Bauteile
    - Ausdehnung der Komponenten und damit direkter Einfluss auf die relative Lage von Werkzeug und Werkstück
- Kenntnis der Wärmeentwicklung und der Ausdehnung in Abhängigkeit verschiedener Parameter
- Verfahrgeschwindigkeit
  - Belastung durch Gewichtskraft
  - Schmierung
  - Vorspannung



## Vorgehen zur Bestimmung der Wärmeverteilung in Führungssystemen

Ziel: Erstellung eines Modells zur Bestimmung der Wärmeentwicklung in Führungssystemen über die Verlustleistung  $P_v$  und die Verfahrgeschwindigkeit  $v$

Annahmen:  $\dot{Q}_{Führ\_v_1} = \dot{Q}_{Sch\_v_1} + \dot{Q}_{Wag\_v_1}$

$$\frac{\dot{Q}_{Sch\_v_1}}{\dot{Q}_{Sch\_v_2}} = \frac{\dot{Q}_{Wag\_v_1}}{\dot{Q}_{Wag\_v_2}} = \frac{\dot{Q}_{Führ\_v_1}}{\dot{Q}_{Führ\_v_2}}$$

Messung der Temperatur in einer Führungsschiene in der Werkzeugmaschine

Bestimmung von  $\frac{\dot{Q}_{Sch\_v_1}}{\dot{Q}_{Sch\_v_2}}$  über die Simulation der Schiene

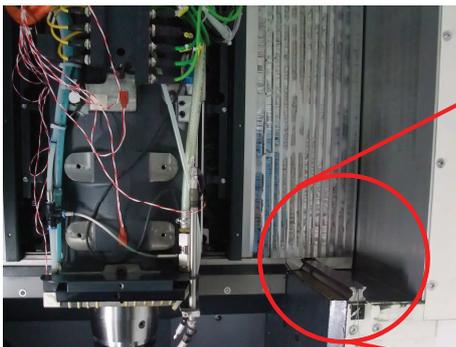
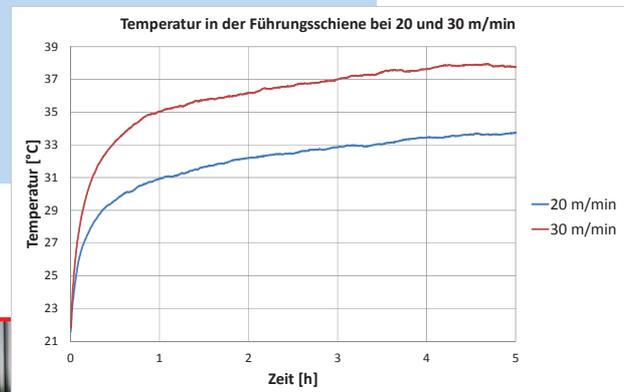
Annahme:  $\dot{Q}_{Führ\_v_1} = P_{v\_v_1} = F_{R\_v_1} \cdot v_1$

Bestimmung von  $P_v = F_R \cdot v$  über Reibkraftmessungen

Überprüfung durch Abgleich von  $\frac{\dot{Q}_{Führ\_v_1}}{\dot{Q}_{Führ\_v_2}}$  und  $\frac{P_{v\_v_1}}{P_{v\_v_2}}$

## Temperaturmessung an der Werkzeugmaschine

- Ermittlung der Wärmeentwicklung in der Führungsschiene der Y-Achse
- Verfahren der Maschine mit verschiedenen Geschwindigkeiten
- Wirkende Gewichtskraft: ca. 9,5 kN
- Führungssystem der Fa. Schneeberger
- Führungsschienen mit 35er Baugröße
- Fettschmierung der Führungswagen



## Abgleich von Wärmeleistung und Reibleistung

- Bestimmung der Wärmeleistungen, die nötig sind, um die sich in der Werkzeugmaschine einstellenden Temperaturen zu erreichen
- Da Konvektion und Wärmeübergang zu den angrenzenden Bauteilen nicht bekannt, aber konstant sind, kann der Quotient bestimmt werden:

$$\frac{\dot{Q}_{Sch\_v1}}{\dot{Q}_{Sch\_v2}} = \frac{\dot{Q}_{Sch\_20}}{\dot{Q}_{Sch\_30}} = 0,689$$

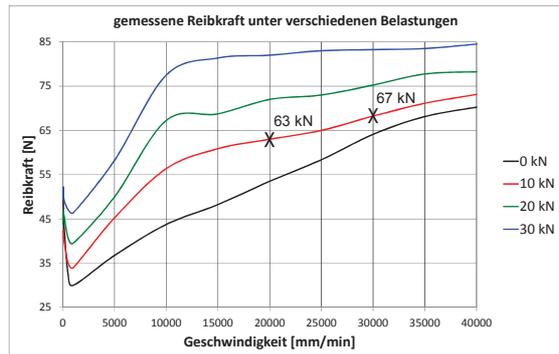
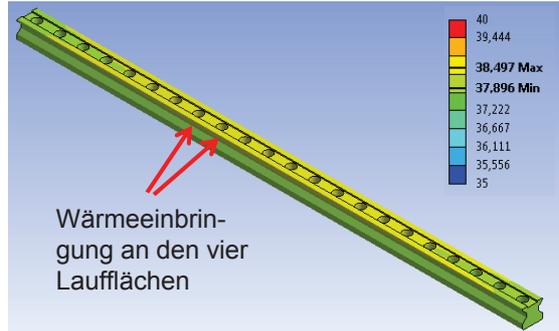
- Unter der Annahme, dass die gesamte Reibung in Wärme umgesetzt wird und sich gleichmäßig in Schiene und Wagen aufteilt, gilt:

$$\dot{Q}_{Führ\_v1} = \dot{Q}_{Sch\_v1} + \dot{Q}_{Wag\_v1} \quad \dot{Q}_{Führ\_v1} = P_{v\_v1} = F_{R\_v1} \cdot v_1$$

$$\frac{\dot{Q}_{Sch\_v1}}{\dot{Q}_{Sch\_v2}} = \frac{\dot{Q}_{Wag\_v1}}{\dot{Q}_{Wag\_v2}} = \frac{\dot{Q}_{Führ\_v1}}{\dot{Q}_{Führ\_v2}} = \frac{P_{v\_v1}}{P_{v\_v2}}$$

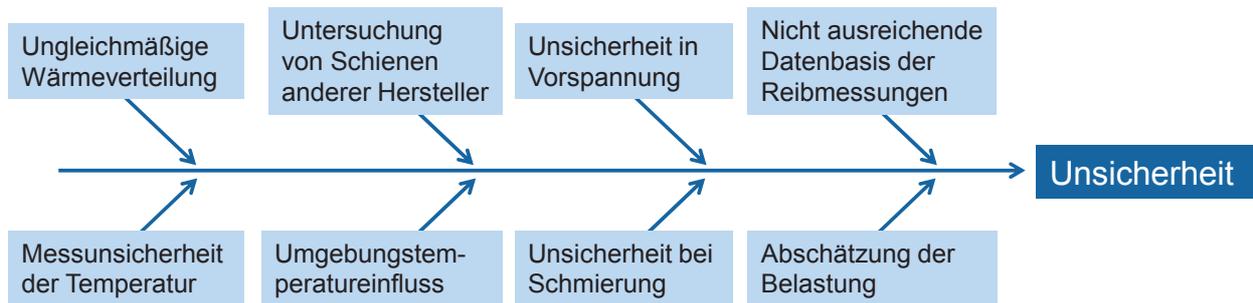
- Die Verlustleistung kann aus den dargestellten Reibkraftverläufen abgelesen werden:

$$\frac{P_{v\_20}}{P_{v\_30}} = \frac{F_{R\_20} \cdot 20}{F_{R\_30} \cdot 30} = 0,627$$



## Weitere Schritte

Das Ergebnis hat gezeigt, dass die Vorgehensweise funktioniert, aber mit Unsicherheiten verknüpft ist



Weitere Prüfstandsuntersuchungen in einer Klimakammer sind notwendig zur Erfassung der

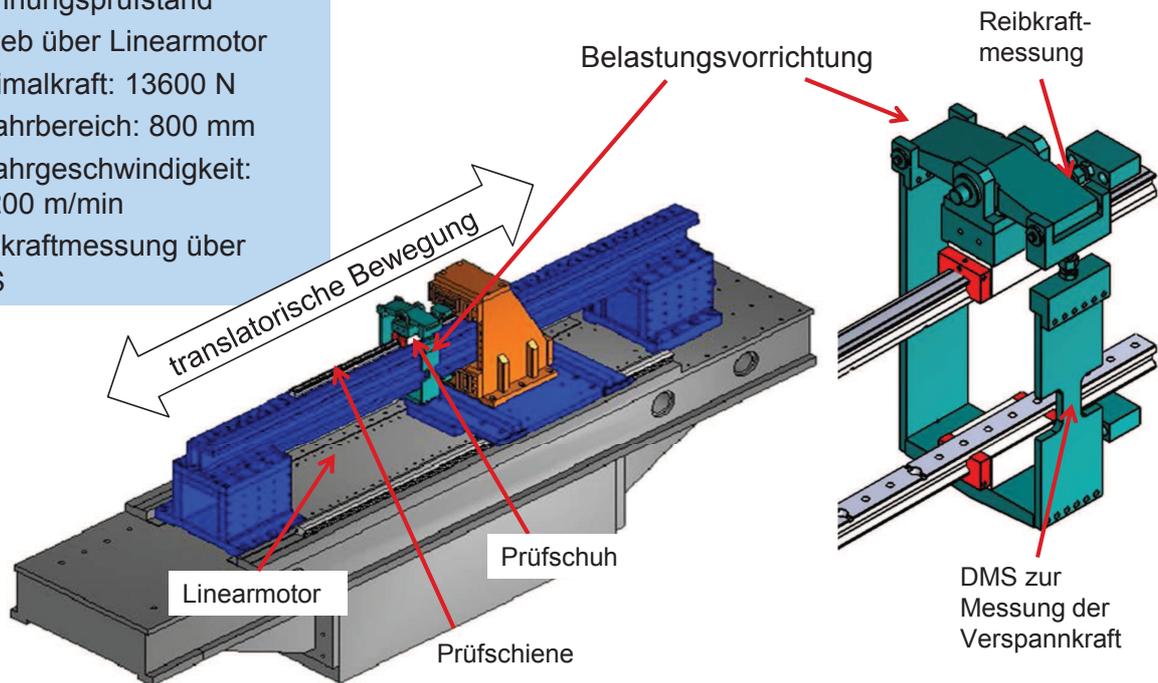
- Wärmeverteilung in Führungsschiene und Schlitten
- Temperatur bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen
- und der Wärmeübertragung an benachbarte Bauteile



## Messtechnische Untersuchung am Prüfstand in einer Klimakammer

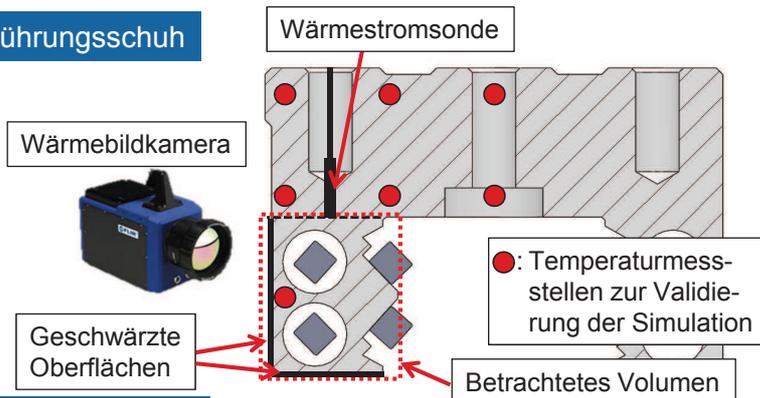
### Verspannungsprüfstand

- Antrieb über Linearmotor
- Maximalkraft: 13600 N
- Verfahrbereich: 800 mm
- Verfahrgeschwindigkeit: bis 200 m/min
- Reibkraftmessung über DMS



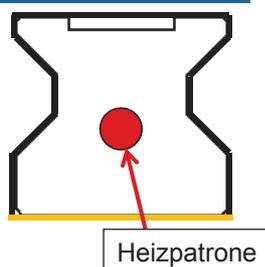
## Messung von Temperatur an Schiene und Führungsschuh

### Führungsschuh



- Wärmeströme an drei von vier Seiten des Kontrollvolumens bestimmbar
- Temperaturmesspunkte zur Validierung des sich in der Simulation einstellenden Temperaturfeldes

### Führungsschiene



#### 1. Ansatz

- Definierte Wärmeeinbringung über Heizpatrone
- Isolierung nach unten
- Wärmeübergang an die Umgebung über Wärmebildkameraaufnahmen bestimmen

#### 2. Ansatz

- Schiene definiert homogen erhitzen
- Über das Abkühlverhalten mit Thermographiemessung den Wärmeoeffizienten zur Umgebung bestimmen

1 Einleitung

2 Linearmotoren

3 Führungssysteme

4 Ausblick

Nächste Schritte



- Verlustmessung mit statischer Belastung, genaue Bestimmung von  $F$ ,  $I$  und  $P$
- Erweiterung der Temperaturmessung an Linearmotoren, genaue Messung mit Temperatursensoren bei unterschiedlichen Bedingungen und Abgleich mit Modell
- Prüfstand für die Linearführungen und die Klimakammer in Betrieb nehmen
- Solide Datenbasis für die Simulation schaffen

# **Messungen des Wärmeübergangs an Fugenkontakten von Werkzeugmaschinen**

Prof. Dr.-Ing. R. Kneer; Dipl.-Ing. S. Vieler  
RWTH Aachen, WSA

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann; Dipl.-Ing. St. Schroeder  
TU Dresden, IWM

# MESSUNGEN DES WÄRMEÜBERGANGS AN FUGENKONTAKTEN VON WERKZEUGMASCHINEN

Prof. Dr.-Ing. R. Kneer, Dipl.-Ing. S. Vieler, RWTH Aachen, WSA  
Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann; Dipl.-Ing. St. Schroeder, TU Dresden, IWM

## 1 Wärmeübergang an Fugen von Werkzeugmaschinen

Die Wärmeübertragung von Fugen spielt bei vielen thermischen Betrachtungen eine wichtige Rolle. Fugen sind Verbindungsstellen, an denen zwei Körper aufgrund einer vorliegenden Kraft in Kontakt stehen. Aufgrund der Oberflächenrauheit berühren sich die Kontaktpartner nur auf einem kleinen Anteil der nominellen Fläche (s. auch Folie 3).

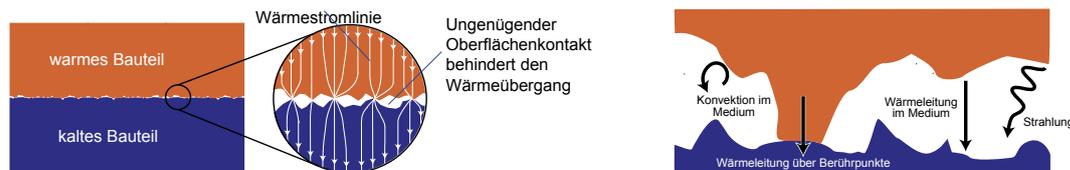


Abbildung 1: Wärmetransport an Kontaktflächen

Dieser Anteil beträgt meist nur 1-5% [Mad1996]. An diesen wenigen Berührungspunkten findet Wärmeleitung zwischen den Kontaktpartnern statt. Zusätzlich kann Wärme durch Strahlungsaustausch zwischen den Flächen und Wärmeleitung durch das meist schlechter leitende Zwischenmedium erfolgen. Konvektion ist unter diesen geometrischen und thermischen Gegebenheiten normalerweise vernachlässigbar.

Fugen werden durch viele verschiedene Parameter charakterisiert, die entsprechend die Wärmeübertragung an der Kontaktstelle beeinflussen können. Zum einen sind die Materialeigenschaften der Kontaktpartner für den Wärmetransport wichtig. Zusätzlich spielt die Härte der Oberfläche eine wichtige Rolle, da diese starken Einfluss auf die Verformung der Rauheitsspitzen und entsprechend auf die reale Kontaktfläche hat. Auch die Rauheit der Körper sowie das vorhandene Zwischenmedium sind für den Wärmeleitwiderstand relevant. Der an der Kontaktstelle herrschende Druck wirkt sich ebenfalls stark auf die reale Kontaktfläche und somit auf den Wärmeübergangskoeffizienten aus. Weitere Parameter wie die Art der Belastung (z.B. oszillierend) und das vorherrschende Temperatureturniveau sind bei den Untersuchungen mit einzubeziehen.

An Werkzeugmaschinen gibt es diverse Fugen, die nur geringe Auswirkungen auf das thermische Gesamtverhalten haben. Die meisten Kontaktflächen der Fugen haben eine niedrige Rauheit und eine relativ hohe Flächenpressung. Des Weiteren besitzen die Fugen relativ große nominale Kontaktflächen. Dadurch ergibt sich in den meisten Fällen ein großer Leitwert gegenüber den umgebenden thermischen Leitverbindungen. Ein typisches Beispiel zeigt Abbildung 2 (s. auch Folie 4).

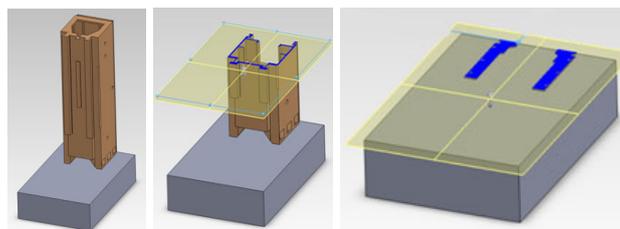
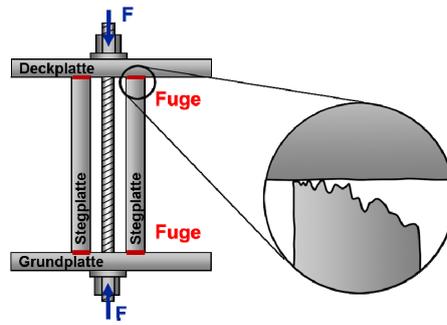


Abbildung 2: Verbindung eines Ständerbauteils mit einem Grundgestell

Die Fuge der hier dargestellten Verbindung eines Ständerbauteils mit einem Grundgestell besitzt die doppelte Querschnittsfläche des Ständers. Bei gleichzeitig niedriger Rauheit und hohen Flächenpressung behindert diese Fuge den Wärmestrom nicht signifikant.

Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel einer verhaltensrelevanten Fuge (s. auch Folie 5).



**Abbildung 3: Fuge an einer Aluminium-Leichtbaustruktur**

Die Schlitten des Versuchsträgers MAX [Gro2009] sind als Aluminium-Leichtbaustruktur gestaltet. Diese ist fächerartig aufgebaut. An Stellen der Lasteinleitung und Kraftübertragung sind Stege eingebracht. Ein typischer Teilausschnitt besteht aus einer Grundplatte sowie einer Deckplatte mit dazwischen paarweise angeordneten Stegplatten. Der Zusammenhalt wird über einen vorgespannten Gewindestab erzeugt. Insgesamt ergibt sich damit eine sehr lastgerecht gestaltete, leichte und steife Struktur. Durch die große Anzahl an Stegplatten entstehen relativ viele Fugen. Die Fugengeometrie ergibt sich durch die mit Abrasiv-Wasserstrahl geschnittenen Stirnflächen der Stegplatten. Die Kontaktflächen haben daher eine hohe Rauheit und auf Grund von verfahrensbedingt schrägen Schnittflächen nur einen einseitigen Kontakt. Der resultierende Wärmewiderstand der Fugen lässt eine deutliche Behinderung des Wärmeflusses vermuten.

Für die Beschreibung solcher Kontaktwärmübergangskoeffizienten gibt es in der Literatur verschiedenste Berechnungsformeln und Modelle, z.B. das Modell von Mikic [Mic1974]. In diesem Modell werden zur Berechnung verschiedene vereinfachende Annahmen getroffen (s. auch Folie 6):

- Isotrope Oberflächen
- Halbkugelförmige Rauigkeitsspitzen
- Spitzen besitzen Gauß'sche Höhenverteilung
- Einzelne Kontaktpunkte beeinflussen sich weder thermisch noch mechanisch

Die im Modell berücksichtigten Parameter sind neben Härte und nominellem Druck auch die quadratisch gemittelte Rauheit sowie das harmonische Mittel der Wärmeleitfähigkeiten beider Kontaktpartner. Zusätzlich beinhaltet die Formel auch den mittleren Winkel der Rauheitsspitzen. Dies ist ein Parameter, der im Allgemeinen bei Anwendern nicht bekannt ist und erschwert somit die Anwendbarkeit dieses Modells. Auch der Gültigkeitsbereich dieses Modells ist eingeschränkt, wird jedoch nicht explizit angegeben. Für zahlreiche Fugen kann der Wärmeübergang noch nicht rechnerisch bestimmt werden, z.B. falls die Fugeneigenschaften außerhalb des Definitionsbereiches bestehender Fugenmodelle liegen oder die Modelle eine zu große Unsicherheit besitzen. In diesen Fällen kann der Wärmeübergang nur durch Messungen ermittelt werden. Dabei unterliegt die Fuge einer definierten thermischen Last. Die sich ergebenden Temperaturen werden gemessen. Im Anschluss erfolgt auf Basis der Messwerte die rechnerische Ermittlung des Wärmeübergangs der Fuge.

Prinzipiell kann dabei zwischen stationären und instationären Verfahrensvarianten zur Messung von Kontaktwärmübergangskoeffizienten an Fugen unterschieden werden (s. auch Folie 7). Bei dem stationären Verfahren muss sich das System im thermischen Beharrungszustand befinden, bevor Daten gemessen und ausgewertet werden können. Dies ermöglicht dann die Nutzung relativ einfacher zeitunabhängiger Modelle. Beim transienten Verfahren hingegen wird der zeitlich hoch aufgelöste Temperaturverlauf beider Kontaktpartner gemessen. Die Auswertung erfolgt dann entsprechend über zeitabhängige Modelle unter Berücksichtigung kapazitiver Effekte. Im Gegensatz zur stationären Methode soll nicht der thermische Beharrungszustand erreicht werden, sondern hier sollen möglichst ausgeprägte zeitliche Temperaturänderungen induziert werden. Im Folgenden werden diese beiden Messmethoden exemplarisch an zwei Versuchsständen vorgestellt.

## 2 Stationäre Messung am Beispiel des Versuchsträgers MAX

Anhand der bereits vorgestellten Fugen der Aluminium-Leichtbaustruktur soll eine stationäre Messung der Wärmeübergänge vorgestellt werden. Wie bereits beschrieben haben die Fugen für Verhältnisse an Werkzeugmaschinenengestellen eine recht raue Fugenkontaktfläche. Des Weiteren besitzen die wasserstrahlgeschnittenen Stirnflächen eine deutliche Schräge. Daraus resultieren eine kleine einseitige Kontaktfläche und ein keilartiger Luftspalt. Der Einfluss dieser Fugen auf das thermische Verhalten wurde zunächst mit einer Überschlagsrechnung abgeschätzt, um die Notwendigkeit einer Messung zu evaluieren. Da es derzeit kein gültiges Modell zur Berechnung des thermischen Leitwerts der Fuge gibt, wurde die tatsächliche Kontaktfläche auf der Basis von Oberflächenmessungen abgeschätzt. Für diese Kontaktfläche wurde dann mit bestehenden Modellen der Wärmeübergang bestimmt. Anhand der Wärmeleitung über einen Teilausschnitt der Struktur wurde der Einfluss der Fugen auf das thermische Verhalten untersucht. Dabei wurde die Wärmeleitverbindung von Grund- zur Deckplatte über eine Stegplatte mit Teilleitwerten modelliert. Der Gesamtleitwert von Grund- zur Deckplatte ist bei wasserstrahlgeschnittenen Fugen deutlich niedriger als bei gefrästen Referenzflächen. Zudem zeigt sich, dass sich in Abhängigkeit der Fugenqualität eine erhebliche Streuung der Leitwerte einstellt. Um das thermische Verhalten in ausreichender Genauigkeit abzubilden ist deshalb eine Beschreibung der Fugen in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften notwendig. Dies kann nur durch Messungen erreicht werden.

Der für die Messungen entwickelte Versuchsstand besitzt den Aufbau eines typischen verspannten Gestellbauteils mit Grund-, Deck- und Stegplatten (s. auch Folie 8).

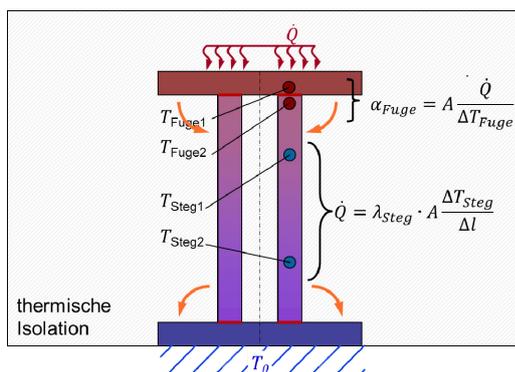


Abbildung 4: Angepasstes Fugenmodell

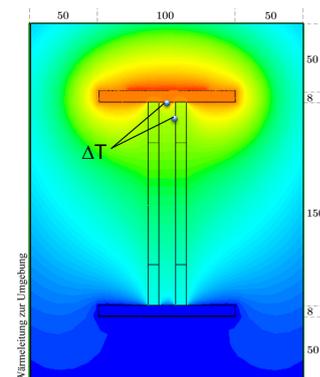


Abbildung 5: Stationärer Versuchsaufbau

An diesem Bauteil können die relevanten Eigenschaften wie Vorspannung und Fugenqualität definiert eingestellt werden. Der Versuchsablauf gestaltet sich wie folgt: Durch das Erwärmen der Deckplatte und das Kühlen der Grundplatte wird ein Temperaturgefälle eingestellt. Der Wärmestrom wird durch eine umgebende thermische Isolation kanalisiert. Der Wärmeübergangskoeffizient der Fuge wird dann aus beiderseitig an der Fuge gemessenen Temperaturen berechnet. Der dazu notwendige Wärmestrom wird aus einer weiteren Messung am Steg gewonnen. Leider erreicht dieses einfache Modell noch nicht die notwendige Genauigkeit. Ursache ist die inhomogene Temperaturverteilung der Fügeflächen und deren beschränkte messtechnische Zugänglichkeit. Des Weiteren entsteht ein signifikanter Wärmestrom über die Isolation, der nicht den Annahmen des einfachen Modells entspricht.

Die beschriebenen Effekte werden deshalb durch ein erweitertes Messmodell berücksichtigt. Grundlage dieses erweiterten Messmodells ist ein thermisches Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) des Versuchsstandes, mit dem sich die Temperaturverteilung bestimmen lässt. Mit Hilfe einer iterativen Optimierung erfolgt dann die Identifikation des Fugenparameters. Dabei werden die Wärmeübergänge an den Fugen so lange variiert bis die Temperaturen der Temperaturmessstellen des FE-Modells denen der Messung weitgehend entsprechen.

Um die Parametrierung der Fugen von thermischen Modellen der Aluminium-Leichtbaustruktur auf einfache Weise zu ermöglichen ist ein angepasstes Fugenmodell erstellt worden (s. Abbildung 4 bzw. auch Folie 9). Das Modell basiert auf einer Regressionsanalyse der Versuchsdaten und lehnt sich in der Struktur an bestehende Fugenmodelle an. Es ermöglicht die Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten der Fuge in Abhängigkeit der wesentlichen Einflussparameter.

Ein Vergleich von modellseitig berechneten und gemessenen Werten zeigt eine gute Übereinstimmung. Ungenauigkeiten ergeben sich insbesondere durch eine lokal stark streuende Rauheit und Schnittflächenneigung, unterschiedliche Verspannungsabstände sowie durch vorherige Verspannungen veränderte Kontaktflächen der Fugen (Vorgeschichte).

### 3 Instationäre Messung am Beispiel eines Versuchsstandes

Alternativ zur stationären Versuchsmethode ist eine Bestimmung von Kontaktwärmübergangskoeffizienten auch mit instationären Temperaturmessungen möglich. Die folgende Abbildung zeigt einen entsprechenden Versuchsaufbau (s. auch Folie 12).

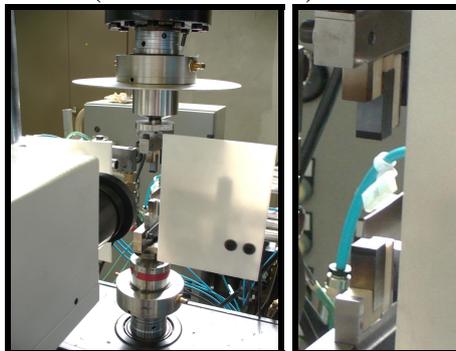


Abbildung 6: Instationärer Versuchsaufbau

Zwei quaderförmige Proben mit definierter Rauheit werden ohne in Kontakt zu stehen mit Heizkörpern auf homogene, aber jeweils unterschiedliche Anfangstemperaturen erwärmt. Sobald diese erreicht sind entfernen sich die Heizkörper und die Proben werden stirnseitig bis zu einem vorgegebenen Druck in Kontakt gebracht. Der anfängliche Temperaturunterschied induziert einen Wärmestrom von der heißen zur kalten Probe. Die dabei auftretenden Temperaturänderungen werden kontinuierlich von einer IR-Kamera erfasst. Um den Einfluss des Emissionsgrades der Proben zu minimieren, werden die Proben an den von der IR-Kamera detektierten Flächen teilweise dünn mit schwarzer Farbe lackiert, so dass bei der Auswertung der Thermographie-Daten an diesen Stellen von einem Emissionsgrad von Eins ausgegangen werden kann. An diesem Versuchsstand können Materialpaarung, Oberflächenrauheit, Kontaktdruck und Zwischenmedium variiert werden. Zusätzlich können Anfangstemperaturen, die Temperaturdifferenz sowie die Versuchswiederholung berücksichtigt werden.

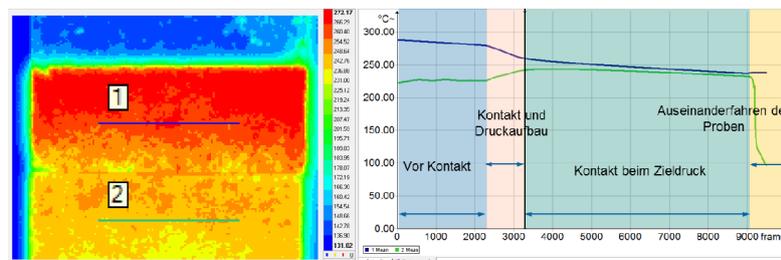
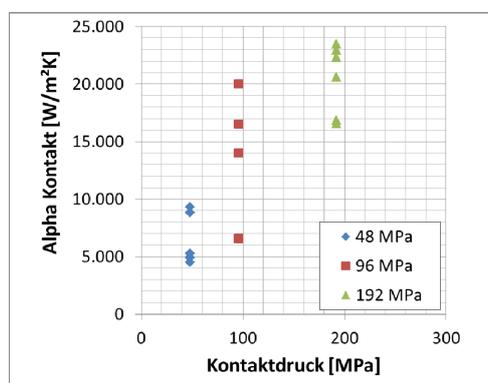


Abbildung 7: Beispiel eines gemessenen zeitlichen Temperaturverlaufs

Ein Beispiel für eine IR-Aufnahme ist in Abbildung 7 abgebildet (s. auch Folie 13). Für die Auswertung dieser Thermographie-Messungen als inverses Problem müssen vereinfachende Annahmen getroffen werden. Hierzu gehören u.a. die Annahme eines eindimensionalen Wärmeleitproblems sowie die Annahme, dass die Proben zur Einspannung hin als adiabat angesehen werden können.

Für die schlussendliche Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten werden je Kontaktpartner in gleichem Abstand zur Kontaktzone die Temperaturen einer Pixelreihe gemittelt und zeitlich betrachtet. Der zeitliche Verlauf dieser Temperaturen ist auf der rechten Seite von Abbildung 7 dargestellt. Er kann in vier Phasen unterteilt werden: vor Kontakt, Kontakt und Druckaufbau, Kontakt bei Zieldruck und Auseinanderfahren der Proben. Die Phasen sind auch im Diagramm eingetragen. Bei der Auswertung der zeitlichen Verläufe wird wie auch bei stationären Verfahren ein Wärmeübergangskoeffizient geschätzt und iterativ optimiert. Allerdings müssen bei dieser Methode Messwerte eines zeitlichen Intervalls bestimmt werden, wodurch die Auswertung im Vergleich zur stationären Methode komplexer wird.

Exemplarische Ergebnisse sind in der nachstehenden Abbildung dargestellt. Sie zeigen, dass mit steigendem Kontaktdruck der Kontaktwärmübergangskoeffizient zunimmt. Auch der Einfluss der Versuchswiederholung wird deutlich, da mit steigender Wiederholungszahl der Wärmeübergangskoeffizient ansteigt. Dies kann mit plastischer Verformung der Rauheitsspitzen erklärt werden, muss jedoch noch durch entsprechende Untersuchungen überprüft werden.



**Abbildung 8: Ergebnisse aus instationären Kontaktversuchen**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Fugen einen signifikanten Einfluss auf das thermische Verhalten von Werkzeugmaschinen besitzen können. Für die Beschreibung des thermischen Maschinenverhaltens sind deshalb thermische Fugenmodelle notwendig, wobei vorhandene Fugenmodelle nicht im gesamten Bereich der Einflussgrößen gültig sind, zum Teil von schwer bestimmbar Parametern abhängen und teilweise mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Daher sind experimentelle Untersuchungen der Fugeneigenschaften notwendig. Hierbei kann zwischen stationären und instationären Untersuchungsmethoden unterschieden werden. Je nach Problemlage ist zu entscheiden, welche der hier beispielhaft vorgestellten Methode effizienter einzusetzen ist.

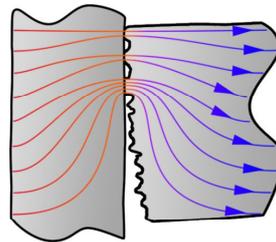
Diese Arbeiten werden mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des SFB/TR 96 gefördert (Teilprojekt B02, B04 und C06).

## Literatur

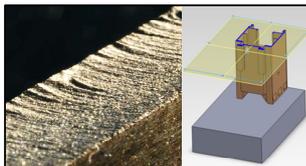
- [Gro2009] Großmann, K.: MAX – Versuchsträger für eine Hochgeschwindigkeits-Leichtbau-Genauigkeitsmaschine. 14. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar, 3./4.12.2009, Vortrag und Tagungsband
- [Mad1996] Madhusudana, C.V.: Thermal Contact Conductance, Springer Verlag, New York, 1996
- [Mic1974] Mikic, B.: Thermal Contact Conductance: Theoretical Considerations; International Journal of Heat and Mass Transfer 17, 205-214, 1974

# Messungen des Wärmeübergangs an Fugenkontakten von Werkzeugmaschinen

R. Kneer, S. Vieler RWTH Aachen  
K. Großmann, S. Schroeder TU Dresden



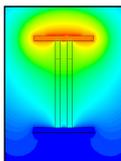
## Gliederung



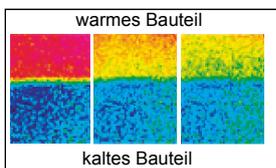
Wärmeübergang an Fugen von Werkzeugmaschinen

$$\alpha_K = 1,13 \tilde{\lambda} \frac{\tan \theta}{R_q} \left( \frac{p}{p+H} \right)^{0,94}$$

Beispiele für bestehende Berechnungsmodelle für Kontaktwärmeübergangskoeffizienten



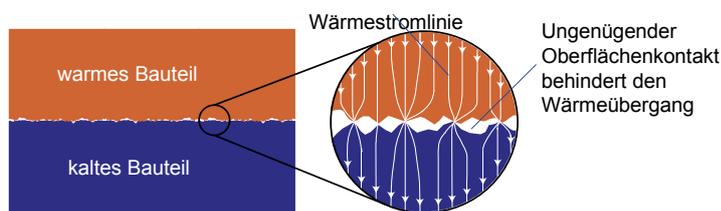
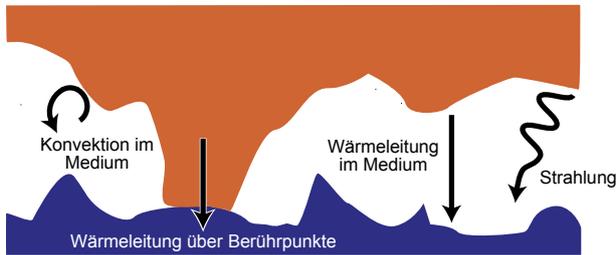
Stationäre Messmethode am Beispiel einer Versuchsmaschine



Instationäre Messmethode

## Wärmeübergang an Fugen von Werkzeugmaschinen

### Fugenaufbau und Wärmeübertragungsmechanismen



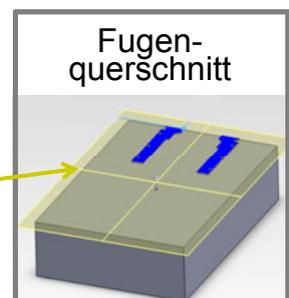
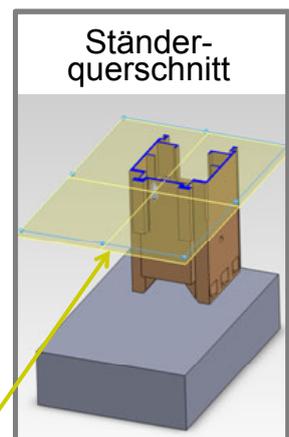
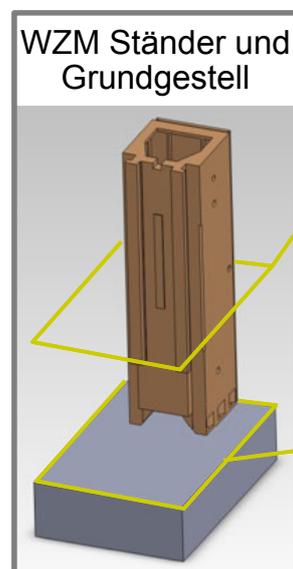
- Kontakt ohne Stoffschluss
- Verschiedene Wärmeübertragungsmechanismen
- Hoher Kontaktwärmleitwiderstand
  - Geringe Kontaktfläche
  - Geringe Wärmeleitfähigkeit von Zwischenmedien wie Luft
  - Geringe Wärmeübertragung durch Strahlung

3

## Wärmeübergang an Fugen von Werkzeugmaschinen

### Beispiel thermisch nicht verhaltensrelevanter Fugen

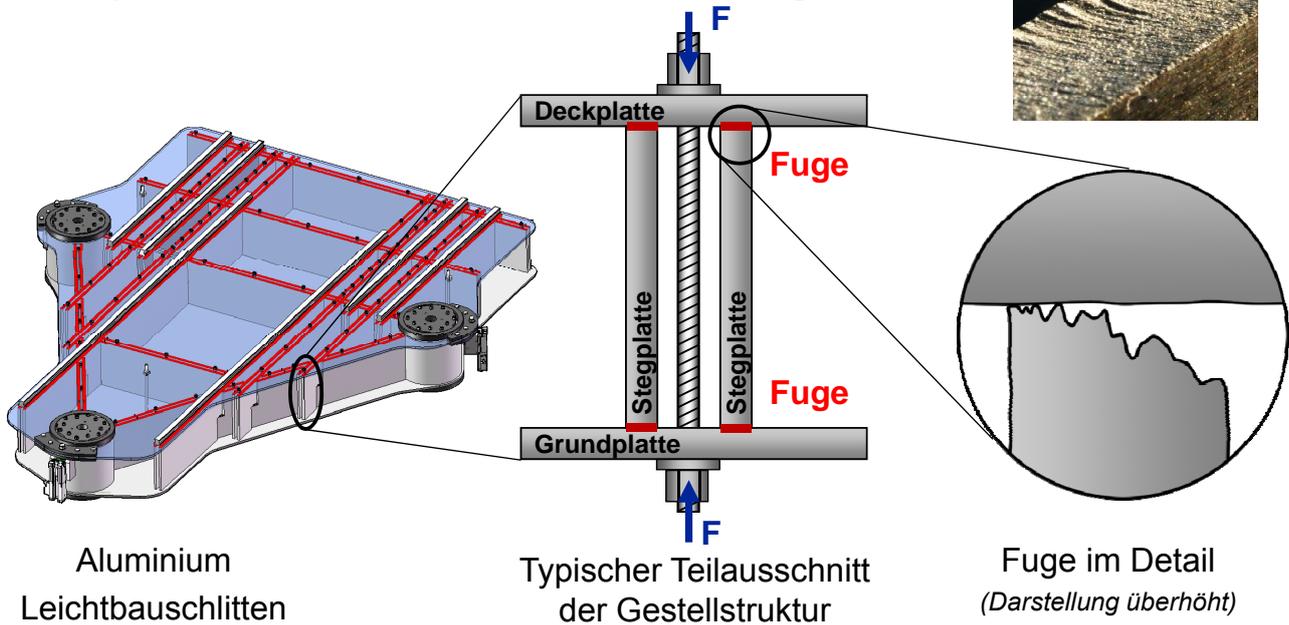
- Vielzahl Fugen haben hohen Leitwert verglichen mit der angrenzenden Struktur
- Ursachen:
  - Zum Erreichen von hohen Kontaktsteifigkeiten meist große Querschnittsfläche
  - Relativ niedrige Rauigkeit und hohe Flächenpressung
- Hauptwärmeströme werden durch diese Fugen kaum gebremst



4

Wärmeübergang an Fugen von Werkzeugmaschinen

Beispiel thermisch verhaltensrelevanter Fugen

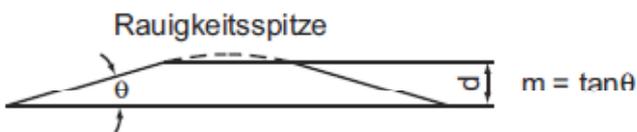


Bestehende Modelle für den Wärmeübergang an Fugen

- Zahlreiche Fugenmodelle in Literatur zu finden
  - „Ingenieurmäßig handhabbare“ Modelle mit einfach zu beschaffenden Parametern
  - Theoretische Modelle mit teilweise sehr aufwändig zu beschaffenden Parametern
- Genauigkeit der Modelle meist nicht bekannt
- Gültigkeitsbereich meist nicht angegeben
- Teilweise große Abweichungen der Modelle zu Messungen

Beispiel: Modell nach Mikic (1974)

$$\alpha_K = 1,13\tilde{\lambda} \frac{\tan\theta}{Rq} \left( \frac{p}{p+H} \right)^{0,94}$$



- $\alpha_K$ : Wärmeübertragungskoeffizient
- $\tilde{\lambda}$ : harmonisches Mittel der Wärmeleitfähigkeiten von Proben 1&2
- $Rq$ : quadratisch gemittelte Rauheit
- $\theta$ : mittlerer Winkel der Rauheitsspitzen
- $p$ : nomineller Druck
- $H$ : Härte

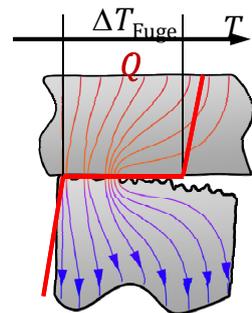
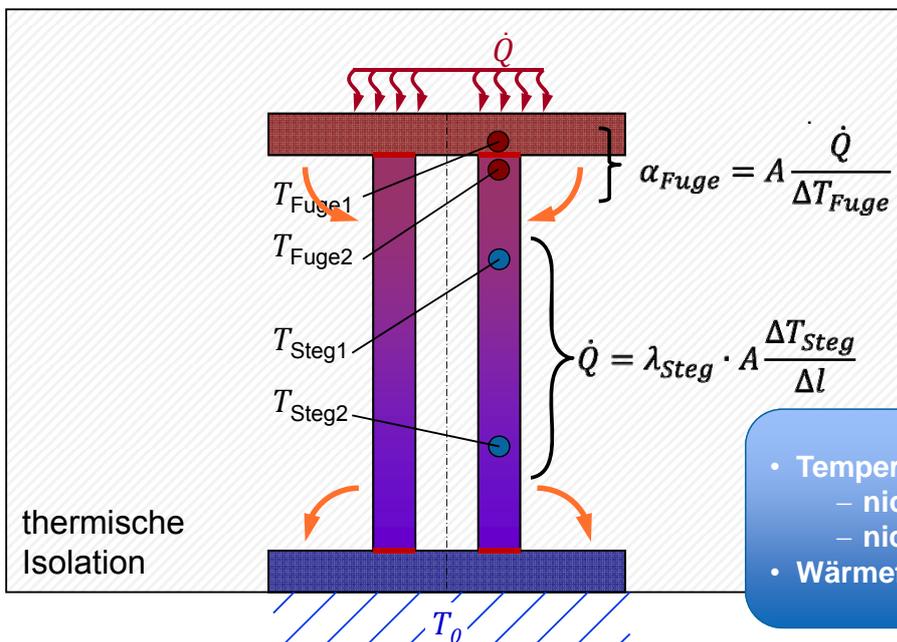
# Wärmeübergang an Fugen von Werkzeugmaschinen

## Experimentelle Methoden

	Varianten für experimentelle Untersuchungen	
	stationär	instationär
Thermische und mechanische Belastung der Fuge	Proben stehen permanent unter Druck und werden mit konstanter thermischer Leistung beaufschlagt; Beharrungszustand	Ausgehend von homogenen Anfangstemperaturen werden die Proben erst für die Messung in Kontakt gebracht; Temperaturlausgleich
Messung von Temperaturen und/oder Wärmeströmen	Messung im stationären Beharrungszustand	Messung eines zeitlichen Verlaufes
Berechnung des Wärmeübergangs aus Messwerten	Zeitunabhängige Modelle	Zeitabhängige Modelle unter Berücksichtigung kapazitiver Effekte

## Stationärer Versuchsaufbau

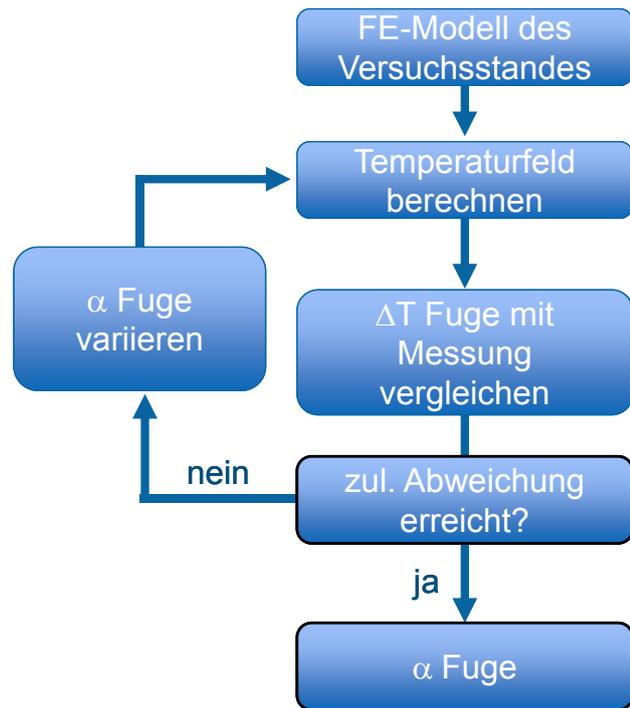
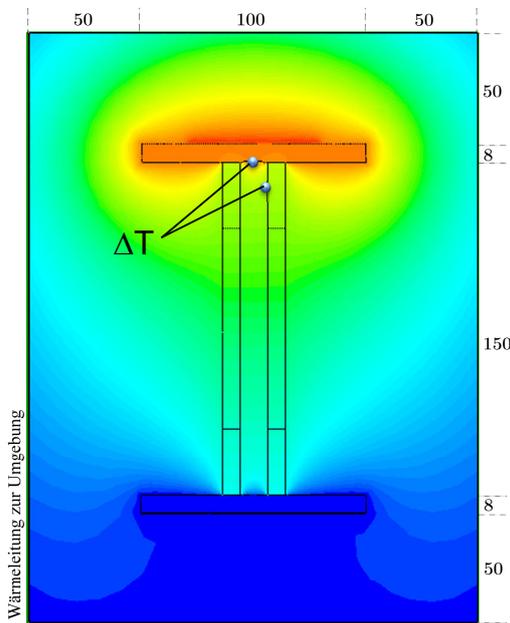
### Messprinzip und Vorgehen



- Temperaturen Fügeflächen
  - nicht homogen
  - nicht direkt messbar
- Wärmefluss über Isolation

Stationärer Versuchsaufbau

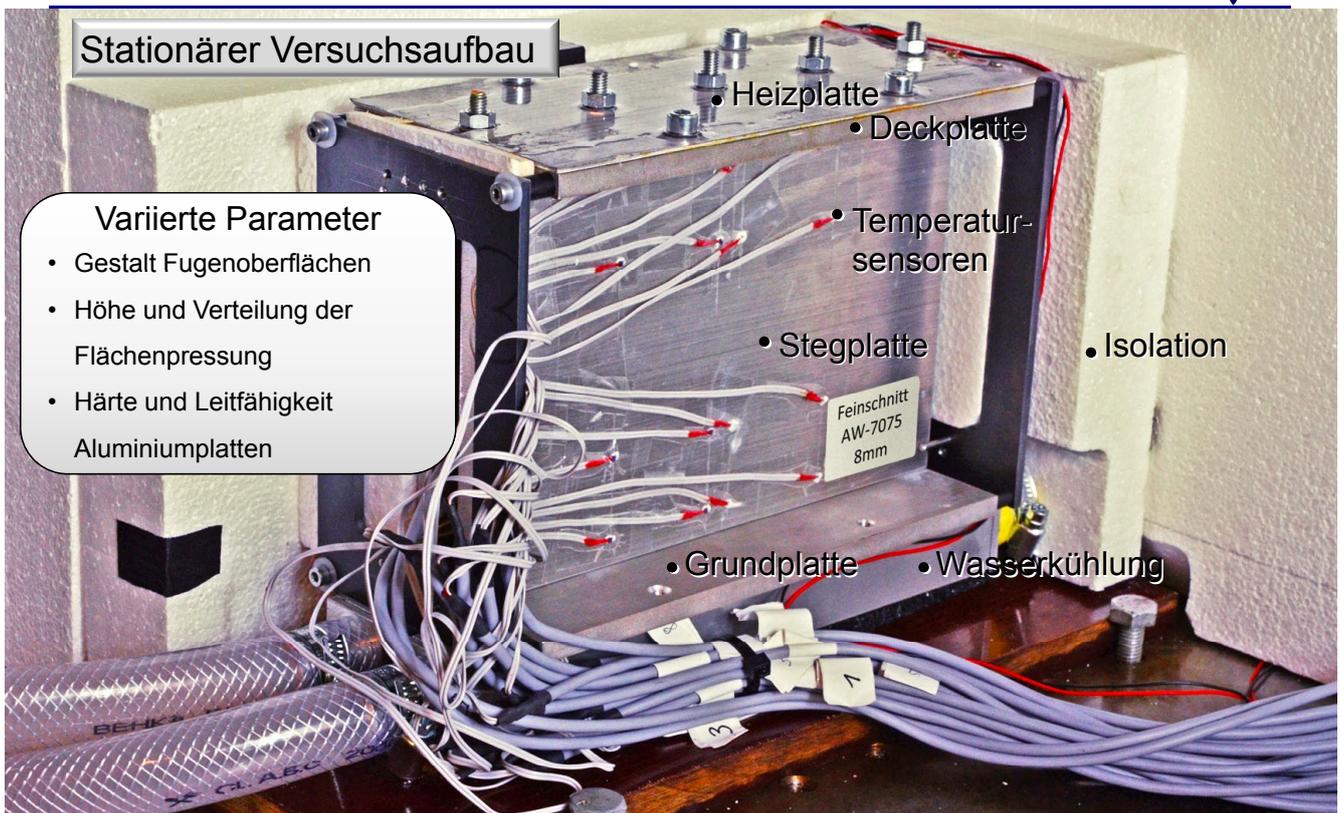
Erweitertes Messmodell



Stationärer Versuchsaufbau

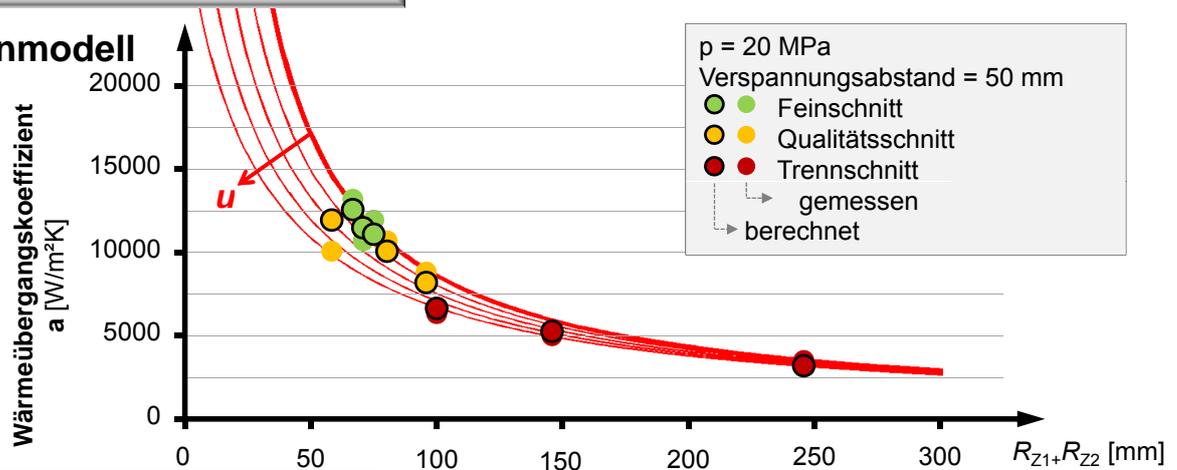
Varierte Parameter

- Gestalt Fugenoberflächen
- Höhe und Verteilung der Flächenpressung
- Härte und Leitfähigkeit Aluminiumplatten



Stationärer Versuchsaufbau

Fugenmodell



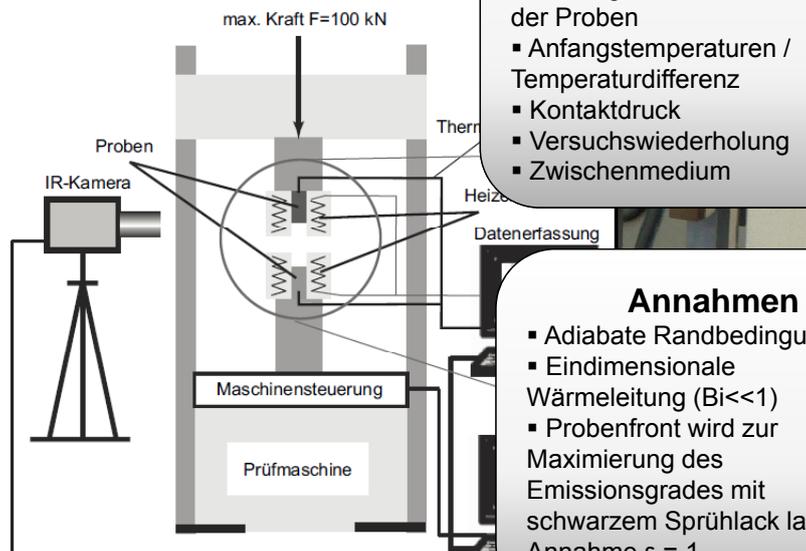
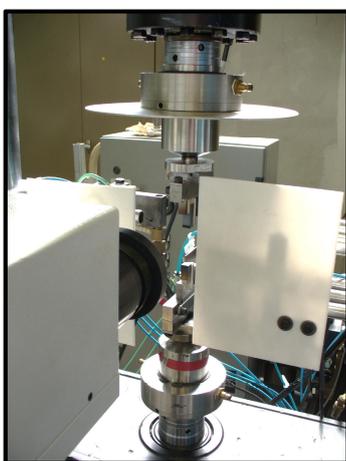
Wesentliche Einflussgrößen

- nomielle Flächenpressung  $p$  [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
- Rauheit der Kontaktpartner  $R_z$  [ $\mu\text{m}$ ]
- Schräge der Schnittflächen  $u$  [ $\mu\text{m}/\text{mm}$ ]

$$\alpha = \frac{p}{16,89 \cdot (R_{z1} + R_{z2}) + 4,94 \cdot 10^{-5} \cdot u} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$$

Instationäres Messverfahren

Versuchsaufbau



Varierte Parameter

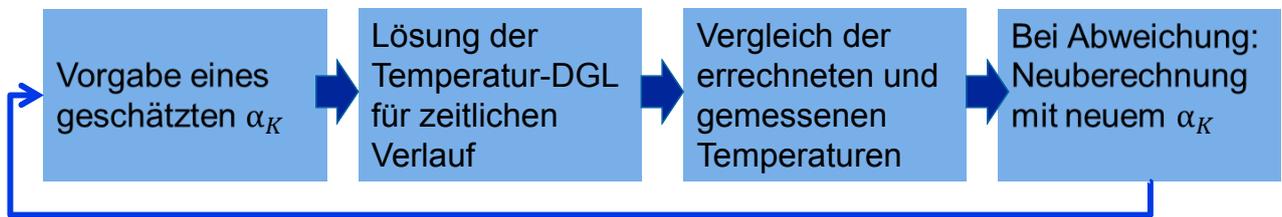
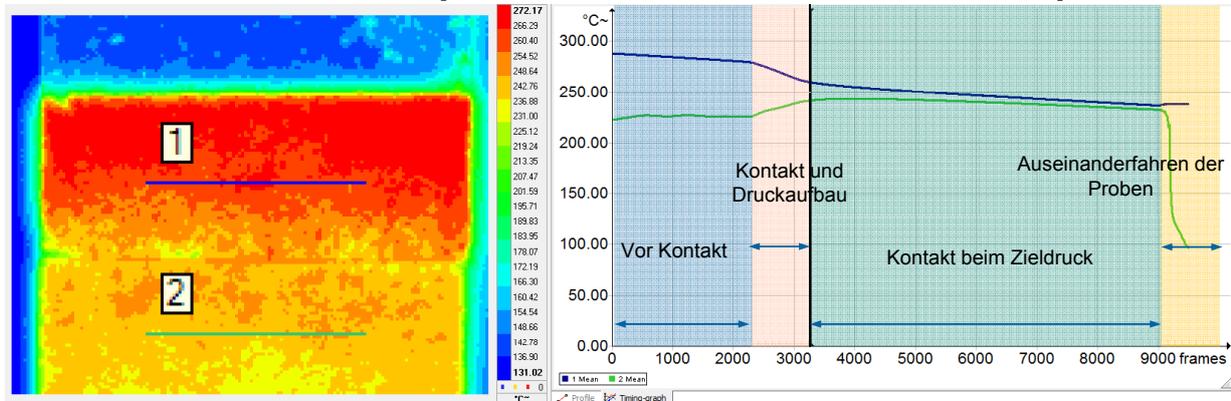
- Probenmaterial und Materialpaarung
- Jeweilige Oberflächenrauheit der Proben
- Anfangstemperaturen / Temperaturdifferenz
- Kontaktdruck
- Versuchswiederholung
- Zwischenmedium

Annahmen

- Adiabate Randbedingung
- Eindimensionale Wärmeleitung ( $Bi \ll 1$ )
- Probenfront wird zur Maximierung des Emissionsgrades mit schwarzem Sprühlack lackiert
- Annahme  $\epsilon = 1$

Auswertung der IR-Messungen

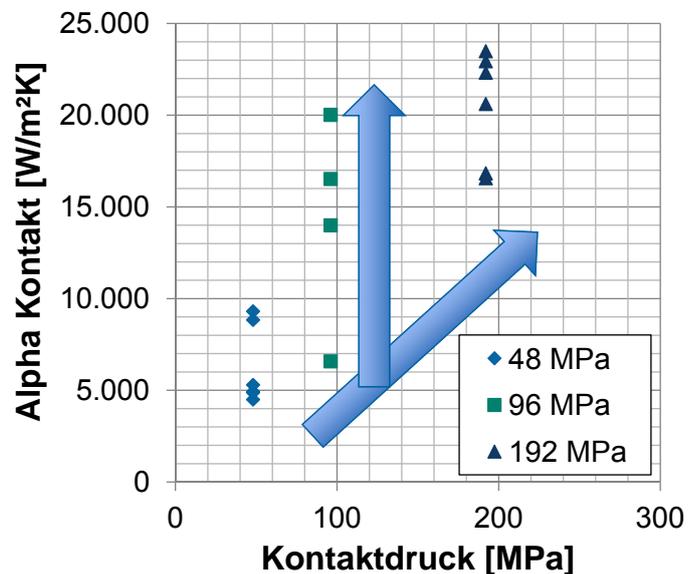
Mittlerer zeitlicher Temperaturverlauf in beiden Probenkörpern



Auswertung der IR-Messungen

Ergebnisse der instationären Messmethode

- Wärmeübergangskoeffizient nimmt mit steigendem Kontaktdruck zu.
- Die Messungen zeigen tendenziell eine Zunahme des Wärmeübergangskoeffizienten mit steigender Zahl an Wiederholungen.



## Zusammenfassung

- Fugen können einen signifikanten Einfluss auf das thermische Verhalten von Werkzeugmaschinen besitzen.
- Für die Beschreibung des thermischen Maschinenverhaltens sind deshalb thermische Fugenmodelle notwendig.
- Vorhandene Fugenmodelle sind nicht im gesamten Bereich der Einflussgrößen gültig, hängen zum Teil von schwer bestimmbar Parametern ab und sind teilweise mit großen Unsicherheiten behaftet.
- Dies macht experimentelle Untersuchungen der Fugeneigenschaften notwendig.
- Hierbei kann zwischen stationären und instationären Untersuchungsmethoden unterschieden werden.
- Anhand von zwei Beispielen wurden beide Methoden vorgestellt.
- Je nach Problemlage ist zu entscheiden, welche Methode effizienter einzusetzen ist.

Diese Arbeiten werden mit Mitteln der  
Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert,  
wofür gedankt wird.

SFB/TR 96, Teilprojekt B02, B04 und C06



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

---

# **Fluidische Kühlung von Motorspindeln und Werkzeugen**

Prof. Dr.-Ing. J. Weber; Dipl.-Ing. Jul. Weber  
TU Dresden, IFD

Dr.-Ing. G. Schmidt; Dr. rer. nat. U. Semmler  
Fraunhofer IWU, Chemnitz

# FLUIDISCHE KÜHLUNG VON MOTORSPINDELN UND WERKZEUGEN

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Weber, Dipl.-Ing. Juliane Weber;  
Dr.-Ing. Gerhard Schmidt, Dr. rer. nat. Ulrich Semmler

## 1 Einleitung

Neben Antriebsaufgaben für Vorschubbewegungen und neben Werkzeug- bzw. Werkstückspannung erfüllen fluidtechnische Systeme in Werkzeugmaschinen vor allem die Funktion der Temperierung. Sie ermöglichen die Kühlung oder Vorwärmung sowohl einzelner Komponenten als auch gesamter Baugruppen, beispielsweise von Gestellbauteilen und -strukturen, Antriebsmotoren, Arbeitsspindeln und Werkzeugen. Folglich bilden Fluidsysteme ein wichtiges Stellelement zur Steuerung und Beherrschung des thermo-elastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen. Unter dem Fokus der Genauigkeit in Verbindung mit einer energieeffizienten Fertigung sind fluidtechnische Systeme als integraler Bestandteil von Beginn an in die Untersuchungen zur Gestaltung von Werkzeugmaschinen einzubeziehen.

Die zunehmende Komplexität und Leistungsfähigkeit fluidtechnischer Systeme hat einen erhöhten Hilfsenergiebedarf zur Folge und ist deshalb sowohl aus betriebswirtschaftlicher als auch aus ökologischer Sicht kritisch zu hinterfragen. Angesichts komplexer Systemstrukturen und fehlender Grundsatzuntersuchungen sowie Auslegungskriterien ergibt sich ein Optimierungsproblem, welches heute nicht zufriedenstellend gelöst werden kann. Aus diesem Grund werden innerhalb des SFB Transregio 96 zur „Thermo-energetischen Gestaltung von Werkzeugmaschinen“ Modellierungsgrundlagen und Berechnungsmethoden für eine wissenschaftlich begründete Auslegung speziell mit dem Schwerpunkt eines optimalen thermischen Verhaltens bei minimalem Hilfsenergieeinsatz entwickelt. Das Teilprojekt „Thermofluidtechnik“ untersucht hierbei fluidische Systeme, deren Systemgrenze durch die umgebende Bauteilwandung bzw. die Austrittsebene des Fluids in die Umgebung definiert ist.

Die ständig steigenden Anforderungen an die Zerspanung in Richtung höherer Zeitspanvolumina sowie neuer und häufig schwer zerspanbarer Werkstoffe ziehen hohe Temperaturen in der Zerspanungszone nach sich. Diese thermischen Belastungen erhöhen den Verschleiß der Werkzeuge und wirken durch die daraus resultierenden thermischen Verlagerungen negativ auf die Bearbeitungsgenauigkeit. Um den Verschleiß gering und die Genauigkeit und das Zeitspanvolumen hoch zu halten, ist eine fluidische Kühlung oft nicht zu vermeiden. Die traditionelle Kühlung erfolgt durch wässrige Kühlschmierstoffe (Emulsionen) und hat neben Verschleiß- und Temperaturreduktion außerdem die Aufgabe des Spänetransports aus der Bearbeitungszone. Traditionelle Kühlschmierstoffe (KSS) belasten die Umwelt, erfordern zusätzlichen Energieaufwand für die Aggregate und ziehen meist eine wiederum Ressourcen verbrauchende Reinigung der Bauteile nach sich. Aus ökonomischen und ökologischen Gründen ist deshalb eine Reduktion des Verbrauchs durch gezielte Einbringung der KSS unmittelbar in die Bearbeitungszone, besser aber noch eine Substitution durch umweltverträgliche KSS anzustreben.

Die Effektivierung der Wirkung der KSS ist in erster Linie durch ihre Zuführung über Werkzeug-Innenkanäle möglich. Dadurch werden neben der Bearbeitungszone auch Werkzeug und Spannfutter gekühlt. Über die KSS-Durchführung erfolgt eine zusätzliche Innenkühlung der Spindel, deren thermischer Zustand mit Einfluss auf die Bearbeitungsgenauigkeit gemeinsam mit den oben genannten fluidischen Systemen der Spindel in Transregio 96 betrachtet wird (siehe Bild 1).

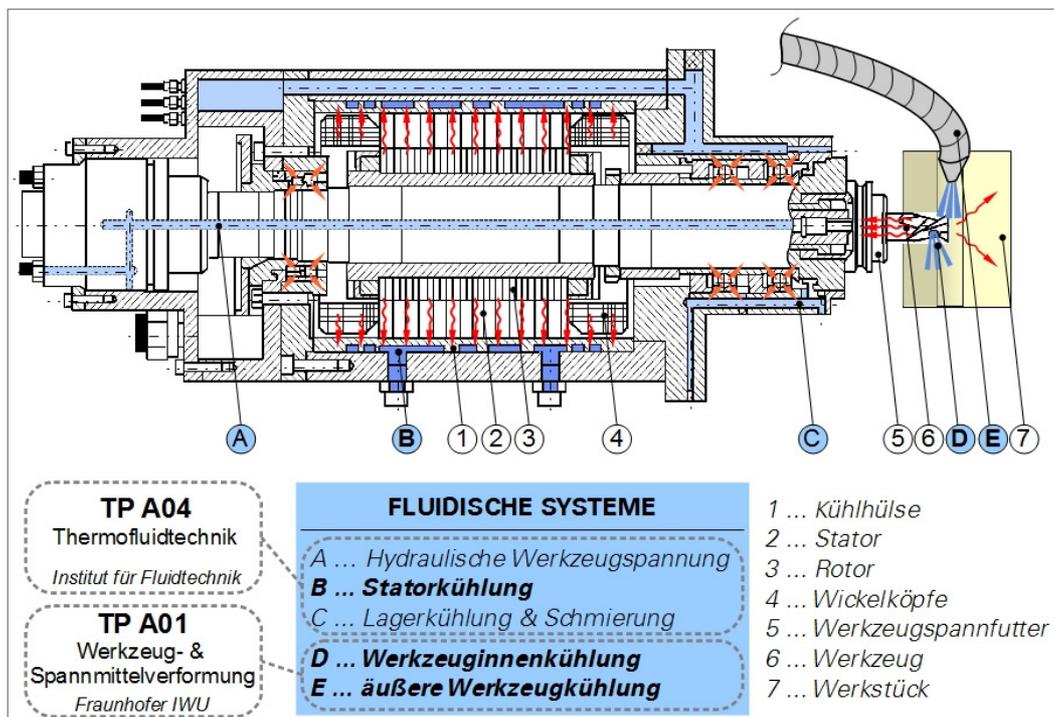


Bild 1: Fluidische Systeme in Werkzeugspindeln mit Werkzeug und Werkzeugaufnahme

## 2 Fluidische Kühlung von Motorspindeln

Die Arbeitsgenauigkeit spanender Werkzeugmaschinen ist maßgeblich von einer genauen Umsetzung der Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug abhängig. Maschinenseitige Störeinflüsse wie die in den Vorschubeinheiten und der Arbeitsspindel auftretenden Temperaturgradienten spiegeln sich dabei in der Maßhaltigkeit und der Oberflächengüte des bearbeiteten Werkstücks wider. So führen Wärmeverluste in den Lagern und dem Motor der Arbeitsspindel zu einer verringerten Lagersteifigkeit und thermischen Verformungen, welche eine Verlagerung des Tool Center Points (TCP) bedingen und folglich die Fertigungsqualität negativ beeinflussen. Die Kenntnis der Verlustquellen, der Wärmestrompfade und der resultierenden Temperaturverteilung in Motorspindeln und Vorschubeinheiten stellt demzufolge eine wichtige Grundlage zur Charakterisierung des thermischen Verhaltens dieser Hauptkomponenten dar, gezielt auf die Verbesserung der Prozess- und Fertigungsqualität sowie des erforderlichen Energiebedarfs.

Da es sich bei spanenden Werkzeugmaschinen um hochpräzise Anlagen handelt, ist auch bei der thermo-energetischen Berechnung ihrer fluidtechnischen Systeme eine hohe Genauigkeit erforderlich. Die Weiterentwicklung netzwerkbasierter Simulationsmodelle für fluidtechnische Komponenten wie beispielsweise der Motorspindel bildet einen wesentlichen Schwerpunkt der Arbeiten, da die auftretenden transienten, dreidimensionalen, bauteilübergreifenden Austauschvorgänge von Energie bisher theoretisch nicht umfassend betrachtet werden konnten.

### 2.1 Konstruktive Gestaltung von Motorspindeln

Motorspindeln werden speziell in HSC-Fräsmaschinen eingesetzt. Hierbei ist der Motor direkt im Spindelgehäuse integriert, da aufgrund der schnellen Werkzeugrotation hohe Fliehkräfte auftreten und somit ein Antrieb über Riemen oder Zahnräder nicht möglich ist. In Bild 1 ist der prinzipielle Aufbau einer Motorspindel dargestellt. Weiterhin sind die wesentlichen fluidischen Systeme hervorgehoben. Das hydraulische System dient der Werkzeugspannung. Das Kühlsystem kann hinsichtlich der zu kühlenden Komponenten in die Stator-, die Lager- und die Werkzeugkühlung unterteilt werden.

Gegenstand derzeitiger Untersuchungen ist die Kühlung des Motors über die Statorkühlhülse. Diese ist in den Stator eingepresst und wird an ihrem Außenradius von einer Kühlflüssigkeit um- bzw. durchströmt. Die Hülse selbst besteht aus einem gut wärmeleitenden Material und kann zur Verbesserung der Wärmeabgabe an das Fluid zusätzlich am Außenradius Rippenstrukturen aufweisen [1]. Bild 2 zeigt die aus den unterschiedlichen konstruktiven Ausführungen der Kühlhülse resultierenden Strömungsführungen. Die einfach bzw. doppelt gewendelte Kanalstruktur (Varianten d und h) sind zurzeit am weitesten verbreitet [2]. Derzeitiger Untersuchungsschwerpunkt ist die einfach gewendelte Ausführungsvariante d.

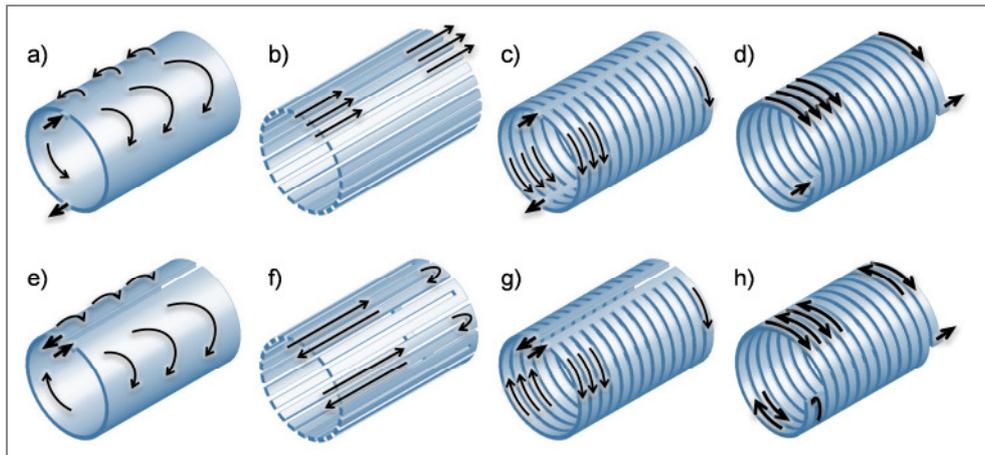


Bild 2: Typische Strömungsführungen in Statorkühlhülsen

## 2.2 Modellierung und Simulation der einfach gewendelten Statorkühlhülse

Der angestrebte Informationsfluss in einem fluidtechnischen Komponentenmodell ist in Bild 3 veranschaulicht. Im Zentrum stehen die netzwerkbasierende Berechnungsmodelle. Eingangsgrößen sind beispielweise der Volumenstrom und die Wandtemperatur. Zu definierende Parameter können direkt aus Konstruktions- und Stoffdaten ermittelt, mit Hilfe von CFD-Simulationen berechnet oder aus den Messdaten experimenteller Untersuchungen extrahiert werden. Sie charakterisieren sowohl das thermische Verhalten als auch die Durchströmung. Ergebnisse sind der übertragene Wärmestrom, die Fluidtemperatur und der Hilfsenergiebedarf für den Antrieb der Strömung.

Für die einfach gewendelte Statorkühlhülse werden im Vortrag die Vorgehensweise zur Modellerstellung und erste Ergebnisse vorgestellt.

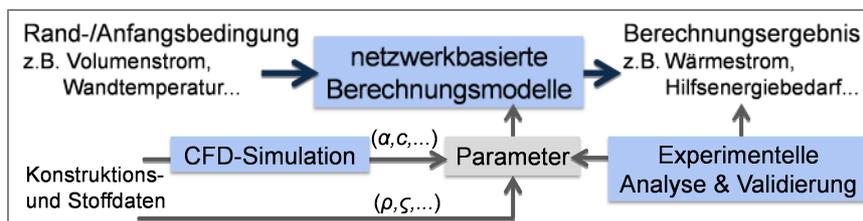


Bild 3: Informationsfluss in einem fluidtechnischen Komponentenmodell

## 2.3 Experimentelle Untersuchungen

Es wurde ein Versuchsstand entwickelt, der es ermöglicht, unter definierten Randbedingungen sowohl das Fluid als auch Wandtemperaturen in Statorkühlhülsen zu messen. Parallel können der ein- und ausgangsseitige Druck sowie der über eine Drossel eingestellte Volumenstrom messtechnisch erfasst werden. Der modulare Aufbau des Versuchsstandes gestattet eine einfache Austauschbarkeit der Kühlhülse, so dass unterschiedliche Strömungsführungen untersucht werden können. Der Ener-

gieeintrag in die Statorkühlhülse erfolgt über zwei zentrisch in einen Aluminiumzylinder eingebrachte Heizpatronen, deren Leistung separat geregelt werden kann.

In Abhängigkeit der am Heizelement eingestellten Wandtemperatur und des Volumenstroms wird die lokale Temperatur in definierten Abständen in axialer Richtung im Fluid, an der Innenwand der Kühlhülse und an der Gehäusewand gemessen. Vorgesehen ist außerdem der Einsatz einer Thermografiekamera zur überblicksmäßigen Erfassung der Temperatur an der Gehäuseoberfläche und zur Charakterisierung der Temperaturverteilung.

### 3 Fluidische Kühlung von Werkzeugen

#### 3.1 Versuchsstand zum thermo-energetischen Verhalten von Werkzeugen und Werkzeugspannsystemen

In einem klimatisierten Raum wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP) der TU Chemnitz ein mit umfangreicher Messtechnik ausgestatteter Versuchstand aufgebaut. In diesem Versuchsstand lässt sich eine Motorspindel sowohl waagrecht als auch senkrecht einbauen. Mittels Temperatursensoren und Thermografie lässt sich für verschiedene Spannfutter auf SK40-Basis das Temperaturverhalten des Systems Werkzeug-Spannfutter-Spindel bei gezielt im Schneidenbereich erwärmter Werkzeuge einschließlich der Rückwirkung auf die Gesamtmaschine messen. Die Messung der thermisch bedingten Deformationen kann hochgenau durch induktive Wegmessung für stehende Werkzeuge bzw. durch Wirbelstromsensoren für rotierende Werkzeuge erfolgen. Für die Untersuchung der Kühlung mit KSS und deren Auswirkungen auf das thermo-energetische Verhalten und die Bearbeitungsgenauigkeit sind sowohl äußere als auch innere KSS-Zuführungen vorgesehen.

#### 3.2 Werkzeuge mit neuartiger KSS-Zufuhr

In einem anderem, vom BMWi (ZIM) geförderten Projekt wurden Werkzeuge, für die keine innere KSS-Zuführung durch Spannfutter und Spindel möglich ist, dahingehend weiterentwickelt und optimiert, dass das KSS von außen in Öffnungen, Rillen oder Kavernen eingespritzt werden kann. Durch die Kinetik der Werkzeuge und die Gestaltung der Einspritzöffnungen wird der KSS über Innenkanäle nah an die Bearbeitungszone gebracht, Bild 4. Ziel der Untersuchungen war u.a., maximale Austrittsgeschwindigkeiten des KSS an den Düsen zu erzielen. Zur Optimierung der Geometrie der Eintrittsöffnungen und der Kanäle kamen numerische Simulationen unter Einsatz von CFD-Programmen zur Anwendung [3].

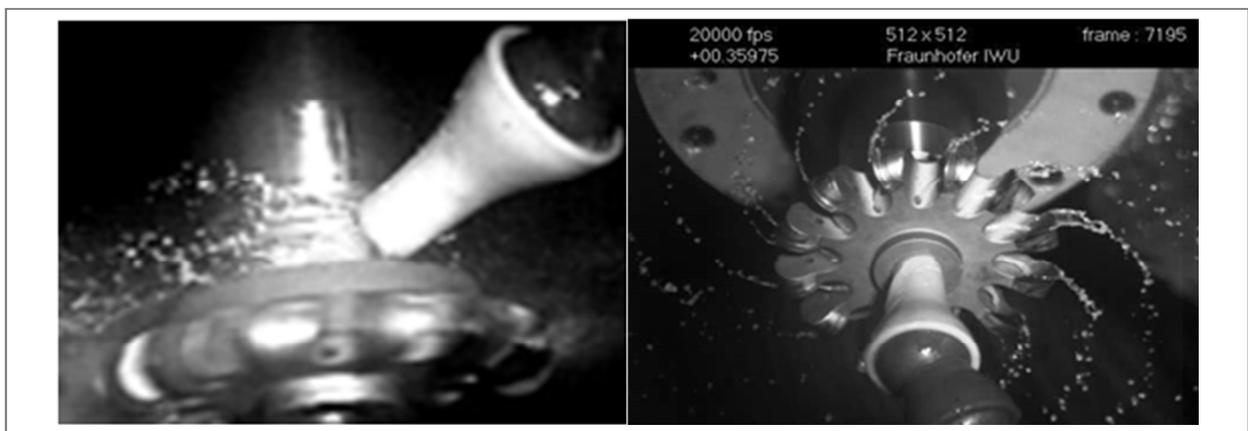
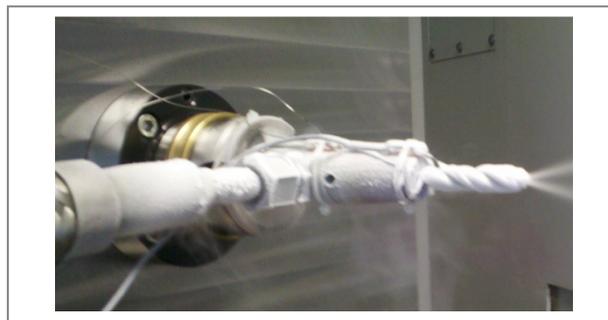


Bild 4: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der KSS-Bewegung eines rotierenden Fräasers für das Einspritzen in eine umlaufende Rille (links) bzw. von unten in eine Kaverne (rechts)

### 3.3 Werkzeugkühlung durch kryogene Fluide

Die eingangs erwähnten hohen Ansprüche an Effektivität und Ökologie der Zerspanungsprozesse erfordern völlig neue Kühl-Schmier-Konzepte. Ein solches Konzept ist die Kühlung mit kryogenen Fluiden, der in den letzten Jahren große Aufmerksamkeit in der Forschung gewidmet wird. Erste industriellen Lösungen sind entstanden. Untersucht werden am Fraunhofer-Institut IWU und am IWP der TU Chemnitz sowohl die Kühlung mit flüssigem Stickstoff (LN2-Prozess) als auch mit komprimiertem Kohlendioxid. Beide Medien sind nicht toxisch und verflüchtigen sich, wobei eine Absaugung erfolgen sollte, um den Sauerstoffanteil der Luft nicht zu gefährden. Wegen der sehr niedrigen Temperaturen von  $-196\text{ °C}$  des flüssigen Stickstoffs sind dabei besonders große Kühlleistungen sowohl für das Werkzeug als auch für den Zerspanungsprozess zu erwarten. Andererseits sind viele Fragestellungen noch offen und bedürfen tieferer Untersuchungen, z.B. wie eine evtl. notwendige Schmierung des Prozesses erreicht werden kann, wie der Wärmeübergang zum Fluid in den Kanälen der Werkzeuge und der Spindel erfolgt und welche Auswirkungen diese Innenkühlung auf Spindel, Werkzeugsysteme und Bearbeitungsgenauigkeit hat. Auch die Konsequenzen der sehr großen zeitlichen und räumlichen Temperaturgradienten sind bisher wenig untersucht.

Die Bestimmung der Wärmeübergangparameter in mit LN2 durchströmten Bohrer-Innenkanälen und die Kühlwirkung beim Hochleistungsbohren war Gegenstand umfangreicher Untersuchungen [4]. Dafür wurde ein Versuchsstand mit feststehendem Bohrer aufgebaut, bei dem die Temperaturentwicklung an Bohrer und Spannfutter erfasst werden kann, Bild 5. Parallel wurden FEM-Modelle zur Abbildung dieses thermischen Prozesses entwickelt. Im Abgleich von Simulationen mit den Messungen konnten sehr gute Wärmeübergangparameter für den LN2-Prozess gefunden und die Effizienz des Verfahrens nachgewiesen werden.



*Bild 5: LN2-durchströmter Bohrer mit äußerer Vereisung*

#### Literatur

- [1] Walter, R.: Mit direkter Kühlung zu mehr Genauigkeit. Werkstatt und Betrieb, Jahrgang 139 (2006), S. 129-130
- [2] Gebert, K.: Ein Beitrag zur thermischen Modellbildung von schnell-drehenden Motorspindeln. Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung, Shaker Verlag, Aachen, 1997
- [3] Schmidt, Gerhard: Integrierte wirkstellennahe Kühlschmierstoffzufuhr. wt Werkstatttechnik Online, Jahrgang 103 (2013) H. 1/2, S. 81-82
- [4] Dix, Martin: Ressourceneffizientes Hochleistungsbohren mit Spiralbohrern – Analyse und Prozessgestaltung. Dissertation, TU Chemnitz, Fachbereich Maschinenbau, 2013 (eingereicht)

16. Dresdner WZM-Fachseminar  
**Tradition und Gegenwart bei der Analyse des thermischen  
Verhaltens spanender Werkzeugmaschinen**

am 21. / 22. 03. 2013 in Dresden

# Fluidische Kühlung von Motorspindeln und Werkzeugen

Bericht aus dem SFB/Transregio 96 „Thermomechanische Gestaltung von WZM“

Teilprojekt A04 „Thermofluidtechnik“

Teilprojekt A01 „Werkzeug- und Spannmittelverformung“

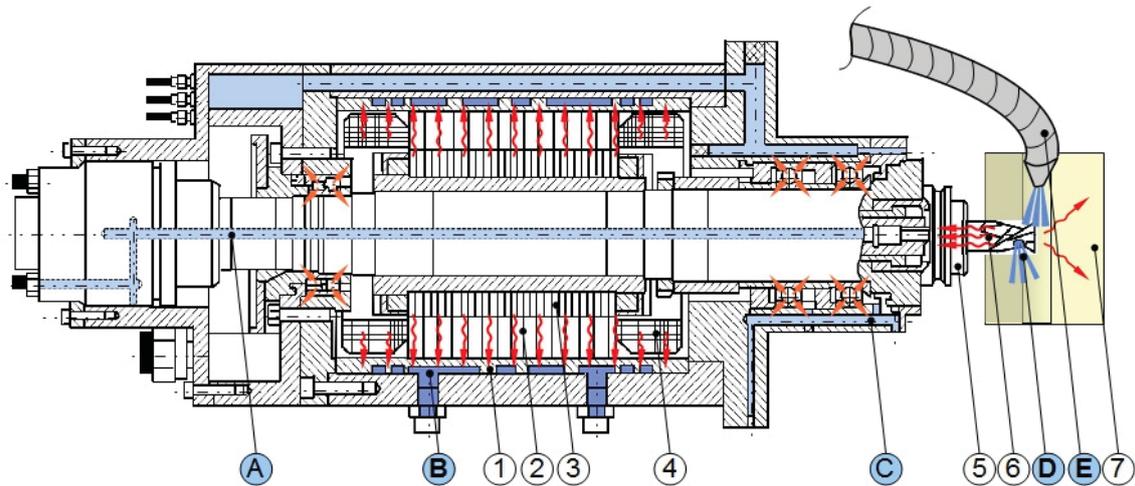
 Institut für Fluidtechnik, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Weber, Dipl.-Ing. Juliane Weber

 Fraunhofer IWU, Dr.-Ing. Gerhard Schmidt, Dr. rer. nat. Ulrich Semmler

---

## Inhalt

- **Einleitung**
- **Fluidische Kühlung der Motorspindel**
  - Versuchsstand „Stator Kühnhülse“
  - Modellbildung für die einfach gewendelte Kanalstruktur
  - Parameteridentifikation
  - Simulationsergebnisse und messtechnische Untersuchung im Vergleich
- **Fluidische Kühlung von Werkzeugen**
  - Ziele, Prinzipien und Merkmale der Kühlung von Werkzeugen
  - Versuchsstand IWP
  - CFD-Simulation innerer und äußerer Strömungen in und an Werkzeugen
  - Werkzeugkühlung durch kryogene Fluide
- **Zusammenfassung und Ausblick**



**TP A04**  
Thermofluidtechnik  
Institut für Fluidtechnik

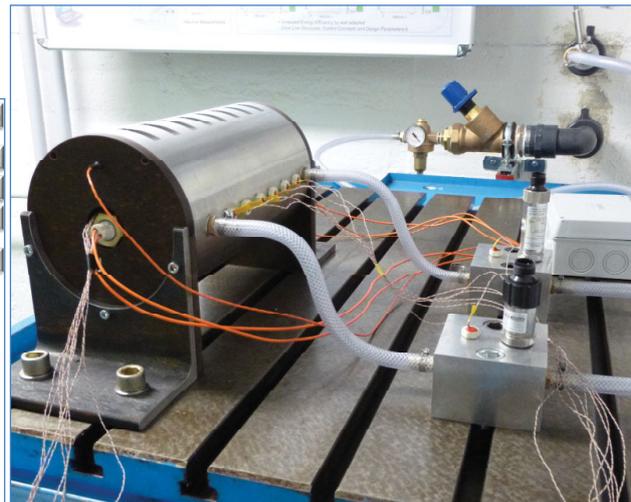
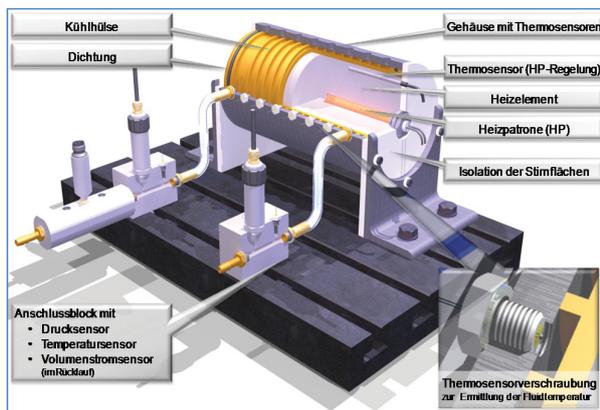
**TP A01**  
Werkzeug- & Spannmittelverformung  
Fraunhofer IWU

**FLUIDISCHE SYSTEME**

A ... Hydraulische Werkzeugspannung  
B ... **Stator Kühlung**  
C ... Lagerkühlung & Schmierung  
D ... **Werkzeuginnenkühlung**  
E ... **äußere Werkzeugkühlung**

- 1 ... Kühlhülse
- 2 ... Stator
- 3 ... Rotor
- 4 ... Wickelköpfe
- 5 ... Werkzeugspannfutter
- 6 ... Werkzeug
- 7 ... Werkstück

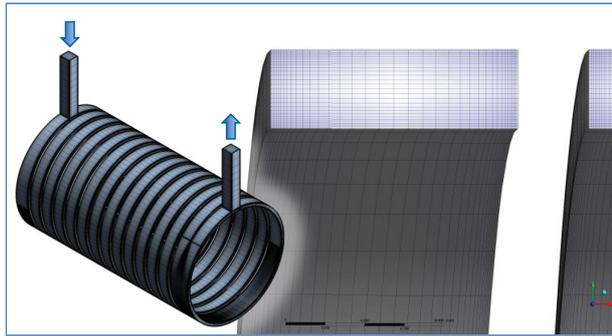
Versuchsstand



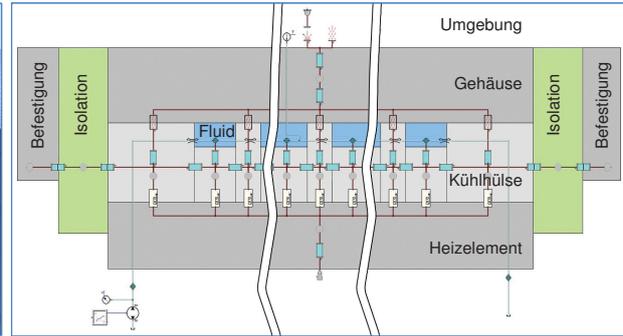
Versuchsstand für die Untersuchung des thermischen Verhaltens von Statorkühlhülsen in Motorspindeln für SFB TR96 am IFD (TUD)

- Merkmale und Möglichkeiten für Untersuchungen:
- Modularer Aufbau ⇒ verschiedene Kühlhülseengeometrien
  - horizontale und vertikale Kühlhülsepositionierung
  - Regelung der Heiztemperatur und des Volumenstroms
  - Erfassung der Fluid-, Kühlhülse- und Gehäusetemperatur über Thermolemente
  - optional thermografische Messung der Gehäusetemperatur

## Modellbildung für die einfach gewendelte Statorkühlhülse



numerische Simulation



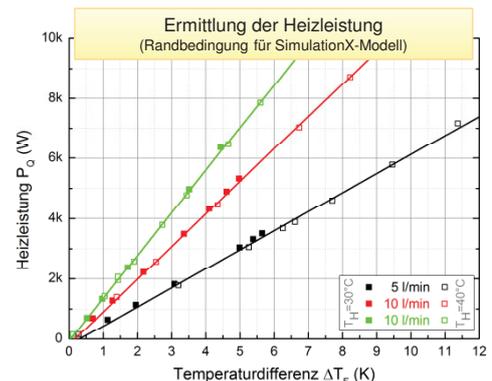
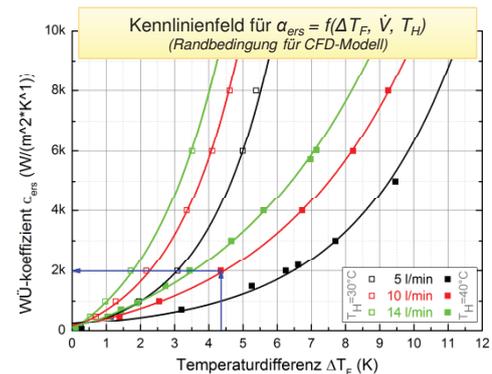
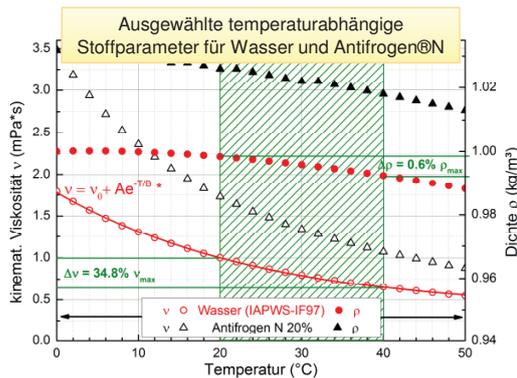
konzentrierte Parametersimulation

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ lange Berechnungszeiten</li> <li>▪ hoch aufgelöstes, räumliches Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld der Strömung für das Fluid (stationär)</li> <li>▪ SST-Modell für Turbulenzmodellierung</li> <li>▪ Energietransportgleichung (ohne viskose Erwärmung) für Wärmeübertragung im Fluid</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ kurze Berechnungszeiten</li> <li>▪ abstrahiertes Knotenpunktmodell: Unterteilung in ringförmige Fluid- und Festkörpervolumina (Vernachlässigung der Steigung und Strömung innerhalb der Wendel)</li> <li>▪ Modifikation der Einzelringbreite für identische Wärmeübertragungsflächen (Wendel <math>\Rightarrow</math> Ring)</li> </ul> |
|---|---|

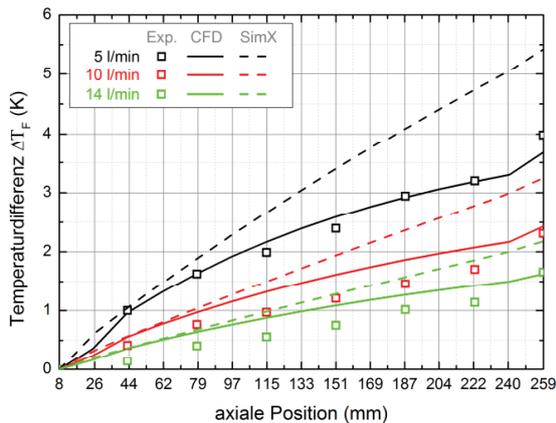
## Parameteridentifikation

- temperaturabhängige Dichteänderung vernachlässigbar
- Berücksichtigung der temperaturabhängigen Viskosität derzeit nur in CFD Simulation
- Ersatzwärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{ers}$  beschreibt zusammengesetzten Wärmeübergang vom Heizelement zum Fluid

(Randbedingung für aktuelle CFD-Simulation)



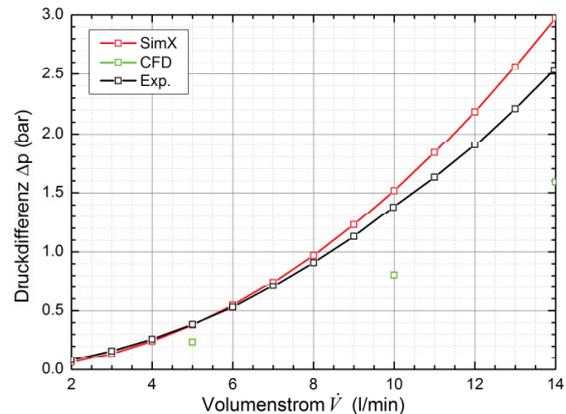
## Simulation und Experiment im Vergleich



### Fluidtemperaturen

- gute Übereinstimmung der CFD-Simulation mit experimentellen Daten (speziell 5 l/min)
- Abweichungen des Knotenpunktmodells (SimX) nicht zu vernachlässigen  $\Rightarrow$  weitere Untersuchungen erforderlich!

*mgl. Ursache: Flächenpressung/Wärmeübergang zwischen Heizelement und Kühlmantel ???*



### Druckverlustkennlinie

- gute Übereinstimmung zwischen Knotenpunktmodell (SimX) und experimentellen Daten
- Druckverluste im numerischen Modell geringer, aufgrund der vernachlässigten Zuleitungen am Ein- und Auslauf

## Kühlschmierstoffe (KSS) in Werkzeugmaschinen

KSS (i.d.R. wässrige Emulsionen) haben die **Aufgabe**

- Werkzeuge, Spanbildung und Werkstück zu kühlen
- Reibung im Zerspanungsprozess zu senken
- Späne abzutransportieren

mit den **Zielen**

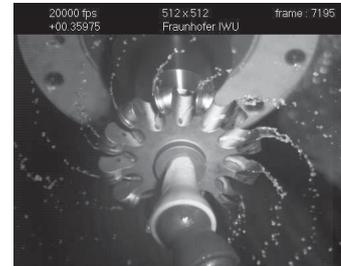
- Verschleiß zu mindern
- Zeitspannvolumen zu vergrößern (Vergrößerung von Schnitttiefe u./o. Schnittgeschwindigkeit u./o. Vorschub)
- Zerspanung schwer zerspanbarer Werkstoffe zu ermöglichen

mit z.T. **negativen Konsequenzen** hinsichtlich

- hoher Energie- und Ressourcenverbrauch und hohen Maschinenkosten (bis zu 30% der gesamten Fertigungskosten)
- erforderlicher Schutzmaßnahmen für WZW und Werkzeuge (Dichtung und Verträglichkeit gegen KSS, Schutzanstriche, ...)
- Umweltschutz: gesundheitsgefährdender KSS-Nebel ( $\rightarrow$  Absaugung erforderlich), KSS-Entsorgung, Kosten und -verbrauch für Reinigung der Bauteile

## Entwicklungstendenzen

- Optimierung der fluidischen Kühlung auf die Thermo-Mechanik von WZ und Spannsystem (SFB TR 96)
- Reduktion des KSS-Verbrauchs und Optimierung der Wirkung
  - Optimierte KSS-Zuführung: innere oder gezielte (und gelenkte) äußere anstelle Überflutungskühlung
- Trockenbearbeitung
  - Probleme: Späneabführung (→ Druckluft)
  - Hohe Temperaturen (→ kalte Luft)
  - Fehlende Schmierung (→ MMS)
- Minimalmengenschmierung (quasi trocken)
- Alternative Konzepte durch nicht toxische, sich verflüchtigende kryogene Kühlmittel (LN<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>)
- Optimierung der KSS unter Gesichtspunkten
  - Arbeitssicherheit
  - Funktionalität
  - Ökonomie
  - Ökologie



## Versuchstand

Kühlmittel-Schmierstoffanlage

Umhausung

Schaltschrank



Instrumentierter Versuchsstand für die Untersuchung des thermischen Verhaltens von Werkzeugen und Spannmitteln (für SFB TR96 am IWP der TUC gemeinsam mit IWU)

Merkmale und Möglichkeiten für Untersuchungen:

- Spindelpositionierung waagrecht und senkrecht
- klimatisierter Raum
- stehendes und rotierendes Werkzeug
- **Werkzeuginnen- und -außenkühlung**

## Versuchsstand

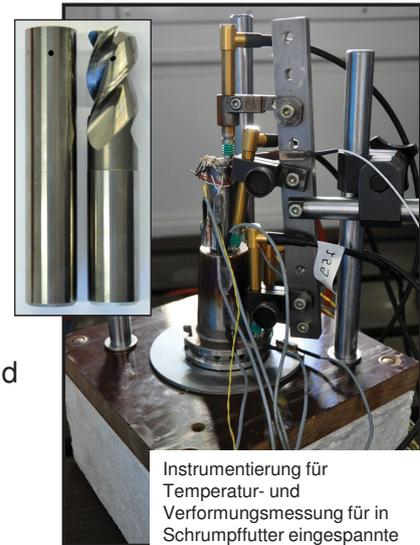
### Messtechnik:

- Temperatursensorik, z.B. Pt100
- Verlagerungsmessung
- Strömungsmessung
- Thermografiekamera
- Zurzeit für unbewegte Werkzeuge, später auch für rotierende (Funk- oder Ringübertragung)

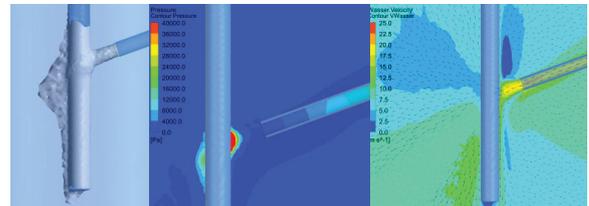
### Ziele:

- Identifizierung der Wärmeströme in WZ, Spannfutter und Spindel
- Bestimmung der Verlagerung der WZ-Schneide (→ **Genauigkeit der Bearbeitung**) in Abhängigkeit von Schnittstellen und Umgebung (u.a. **innere/äußere WZ-Kühlung**)

Entwicklung **numerischer Simulationsmodelle** auf Basis von **FEM** und **CFD** für die Thermomechanik von WZ, Spannfutter, Spindel und Umgebungsraum



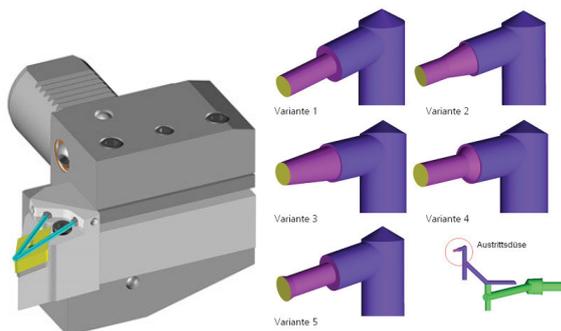
Instrumentierung für Temperatur- und Verformungsmessung für in Schrumpffutter eingespannte HM-Fräser



## Wirkstellennahe KSS-Zufuhr

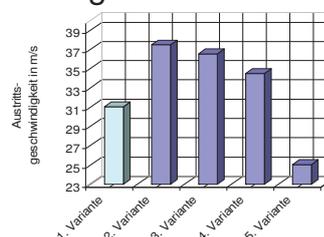
Projekt „**Numerische Simulation und experimentelle Untersuchungen für Werkzeuge mit neuartiger KSS-Zufuhr**“

Für Werkzeuge ohne innere KSS-Zuführung über Spindel und Spannfutter



## Stehende WZ für Revolverdrehmaschinen

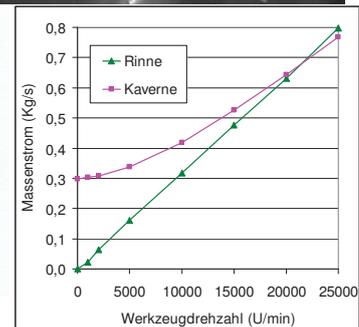
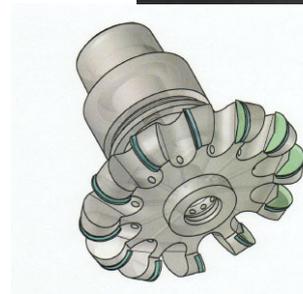
- **Bisher:** Kugelspritzdüsen mit großem Düsenabstand zur Wirkstelle und Behinderungen durch Schläuche
- **Neue Lösung:** Innere KSS-Zuführung durch WZ-Grundkörper mit Austrittsdüsen in Schneidennähe
- **Ziel:** max. Geschwindigkeit des KSS-Stroms an Düsen durch geometrische Veränderungen
- Optimierung unter Nutzung der CFD-Programme CFX und FLUENT



## Wirkstellennahe KSS-Zufuhr

### Rotierende WZ ohne innere KSS-Zuführung durch Spindel

- **Bisher:** äußere Überflutungskühlung
- **Neue Lösung:** Durchleitung äußerer KSS-Strahlen durch WZ in unmittelbare Schneidennähe
- **Ziel:** max. Geschwindigkeit und KSS-Strom durch geometrische Variationen, z.B. Position und Form der Einspritzkammern
- Optimierung unter Nutzung der CFD-Programme CFX und FLUENT



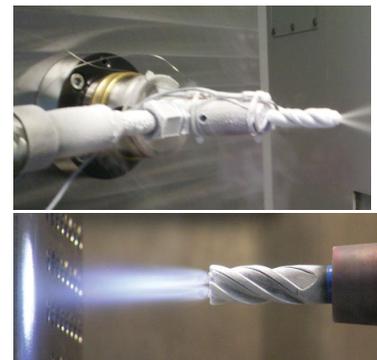
## Werkzeugkühlung durch kryogene Fluide

In den letzten Jahren sehr starke Entwicklung  
 2 Verfahren: Flüssiger Stickstoff (LN2, T=-196 °C)  
 Komprimiertes, flüssiges Kohlendioxid (LCO2, T=-78,5 °C)

Technische Anwendungen erst in Anfängen  
 (erste industrielle Lösungen für LN2)

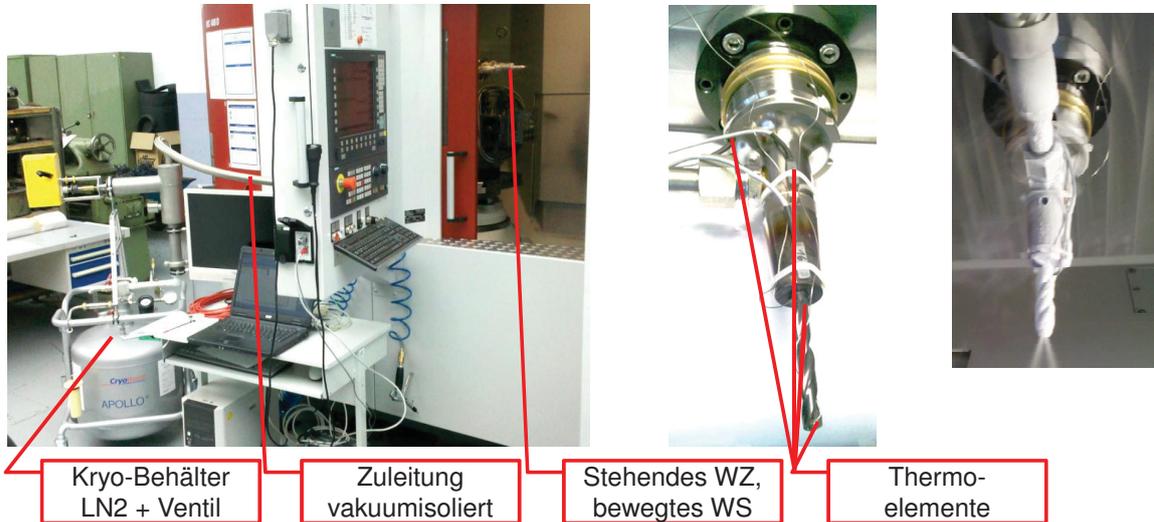
Vielzahl offener Fragen und ungelöster technischer Probleme:

- Transport der Medien an die Wirkungsstelle (Isolation, Spindeldurchführung, Strömungsaufbau und -stabilisierung, ...)
- Form und Parameter der Strömung in der Zuführung und des Wärmeübergangs in Zuführung und an Wirkungsstelle
- Schmierwirkung, evtl. in Kombination mit MMS
- Vereisung
- Temperaturgradienten mit ihrer Auswirkung auf den Schneidstoff, die Bearbeitungsgenauigkeit und die Spannsysteme
- Konsequenzen aus kaltem Werkstoff und Unterkühlung der Spindel



## Werkzeugkühlung durch kryogene Fluide

- Aufbau Versuchstand mit Kühlung mit flüssigem Stickstoff LN2
- Parameterbestimmung des Wärmeübergangs für LN2-Rohrströmung und -Austritt



21.03.2013

16. Dresdner WZM-Fachseminar

15

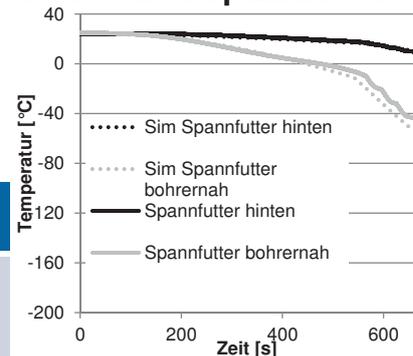
## Werkzeugkühlung durch kryogene Fluide

**Wärmeübergangszahlen** als wesentlicher Parameter für die Simulation des thermischen Verhaltens des Werkzeuges

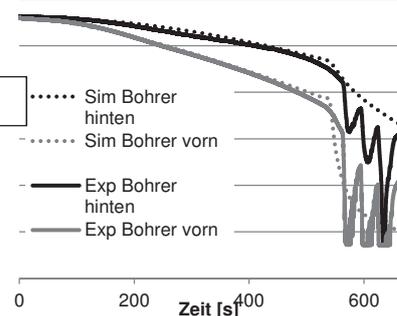
Wärmeübergang bei	Temp.-bereich	Formel zur Berechnung $\alpha_{LN2}$
Rohrström. Blasen-sieden	-196 °C ... -176 °C	$\alpha = f(\Delta T) = 850 \dots 550 \text{ W/m}^2\text{K}$
Rohrström. Filmsieden	größer -136 °C	Quelle: Fastowski: Kryotechnik $\alpha = 0,14 \frac{\lambda_m}{d_k} \left( \frac{a_k^2 q_m (e_{fl} - e_m) g}{\eta^2} Pr_m \frac{l_d}{c_{p,m} \Delta T} (1 + 0,4 \frac{c_{p,m} \Delta T}{l_d})^2 \right)^{0,25}$
Freistrah	-180 °C ... 650 °C	$\alpha = f(\Delta T) = 23270 \dots 46750 \text{ W/m}^2\text{K}$ Quelle: Hong et al (ist kritisch zu bewerten!)

- Gute Übereinstimmung von Simulation und Experiment
- Physikalisches Modell der kryogenen Kühlung beschreibt Wärmeübergang realitätsnah

### Messstellen Spannfutter



### Messstellen Bohrer



21.03.2013

16. Dresdner WZM-Fachseminar

16

## Zusammenfassung und Ausblick

- Untersuchung einer einfach gewendelten Kühlhülse zur Stator-kühlung einer Motorspindel
- Modularer Prüfstands-aufbau bietet Untersuchungsmöglichkeit für weitere Konstruktions-varianten
- Modellierung der Stator-kühlhülse mit konzentrierten (SimulationX) und verteilten (Fluent/CFX) Parametern
- Weitere Untersuchungen der Temp.- Abweichungen zwischen Knotenpunktmodell und Experiment erforderlich (z.B. Fugenkontakt Hezelement – Kühlhülse)
- Untersuchung der Wirkung der KSS für das thermo-energetische Verhalten von WZ und Spannmitteln
- Instrumentierter Versuchstand
- Große Potenzen auch in der Optimierung der KSS durch gezielte innere und durch das WZ gelenkte äußere KSS-Strahlen
- Deutliche Effektivitätssteigerung durch kryogene KSS erreichbar, noch viele ungelöste Fragen
- Kombination Experiment und Simulation mit FEM (DEFORM, MSC.MARC) und CFD (CFX)

Diese Arbeiten wurden und werden mit Mitteln des BMBF (DFG) und des BMWi (ZIM) gefördert, wofür gedankt wird.

## Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Dipl.-Ing.

**Juliane Weber**

Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Telefon: 0351 463-31964

Telefax: 0351 463-32136

[www.tu-dresden.de/mwifd](http://www.tu-dresden.de/mwifd)[juweber@ifd.mw.tu-dresden.de](mailto:juweber@ifd.mw.tu-dresden.de)

Dr. rer. nat.

**Ulrich Semmler**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Telefon: 0371 53 97 1866

Telefax: 0371 53 97 6 1866

[www.iwu.fraunhofer.de](http://www.iwu.fraunhofer.de)[ulrich.semmler@iwu.fraunhofer.de](mailto:ulrich.semmler@iwu.fraunhofer.de)

# **Modellierung des Wärmeaustauschs Maschine-Umgebung**

Priv.-Doz. Dr.-Ing. W.-G. Drossel; Dr.-Ing. St. Ihlenfeldt;  
Dipl.-Ing. C. Zwingenberger  
Fraunhofer IWU, Chemnitz

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann; Dipl.-Ing. St. Schroeder  
TU Dresden, IWM

# MODELLIERUNG DES WÄRMEAUSTAUSCHS MASCHINE-UMGEBUNG

Priv.-Doz. Dr.-Ing. W.-G. Drossel; Dr.-Ing. St. Ihlenfeldt; Dipl.-Ing. C. Zwingenberger  
Fraunhofer IWU Chemnitz  
Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann; Dipl.-Ing. St. Schroeder  
TU Dresden, IWM

Thermisch bedingte Verformungen an Werkzeugmaschinen begrenzen die erreichbare Fertigungsgenauigkeit. Bei der Produktion gewinnt dabei die Wechselwirkung von Maschine und Umgebung an Bedeutung. Das trifft insbesondere für Maschinen mit großen thermischen Dehnlängen zu. Bei der modellbasierten Korrektur thermisch bedingter Wirkpunktabweichungen bereitet die Erfassung und Berücksichtigung veränderlicher Umgebungsbedingungen zusätzliche Probleme. In diesem Vortrag wird über die Abbildung des Umgebungseinflusses bei der thermischen Simulation berichtet.

## 1 Einführung

Der Wärmeaustausch der Maschine mit ihrer Umgebung wird dabei durch freie und erzwungene Konvektion sowie Wärmestrahlung realisiert. Die treibende Kraft des Wärmeaustausches ist die Temperaturdifferenz zwischen der Bauteiloberfläche der Werkzeugmaschine und den Umgebungstemperaturen der Luft und den Oberflächen der Umgebung. Folie 3 zeigt eine typische Verteilung der Umgebungstemperaturen in einer Werkhalle, deren ortsabhängige Schwankungen mehrere Kelvin betragen können [Wec06]. Der dargestellte tages- und jahreszeitliche Temperaturverlauf in einer Werkhalle zeigt typische Tagesschwankungen im Bereich von etwa 4-6 Kelvin und jahreszeitliche Unterschiede bis 10 Kelvin [Nes11].

Die Temperaturverteilungen und –schwankungen der Umgebung können signifikante Auswirkungen auf das thermoelastische Maschinenverhalten haben. Insbesondere Großmaschinen werden aufgrund der Bauteilgröße von Änderungen der Temperaturschichtung in der Umgebung beeinflusst. Dies führt zu merklichen Temperaturunterschieden in den Bauteilen und so zu thermischen Verformungen. Mit den großen Verfahrenswegen kann es dabei zu beträchtlichen positionsabhängigen Wirkpunktabweichungen über dem Arbeitsraum kommen [Wie67].

Die entstehenden Größenordnungen sollen an einem Beispiel verdeutlicht werden. Folie 4 zeigt schematisch eine Horizontal-Bohr- und Fräsmaschine in einer Umgebung mit Temperaturgefälle. Neben Temperaturschichtungen interessieren die Temperaturverteilungen in der Horizontalen. Besonders vom Arbeitsraum der Maschine ausgehend können durch die Werkstückwärmung und die Späne größere Temperaturgradienten auftreten.

Unterschiedliche Temperaturen in der Umgebung beidseits eines Bauteils führen durch Wärmeübergang an der Oberfläche und Wärmeleitung im Innern zu einem Temperaturprofil. Die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  im Bauteil bestimmt dessen thermische Verformung. Für einen Ständer mit der Höhe 4 m und der Breite 1 m ergeben sich bei einem Temperaturgefälle von  $\Delta T = 0,1$  K über dem Querschnitt durch thermische Biegung eine Neigung des Ständerhauptes um  $5 \mu\text{m/m}$  und eine Verschiebung von  $10 \mu\text{m}$ . Diese Größenordnung ist fertigungstechnisch relevant.

## 2 Klassische Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang

Der Wärmeaustausch an freien Oberflächen von Werkzeugmaschinen wird mit einem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  oder  $h$  beschrieben. Die thermische Energie wird dabei durch Wärmestrahlung sowie freie und erzwungene Konvektion übertragen. Die einzelnen Anteile haben folgende Größenordnung (Folie 5):

- Wärmestrahlung

$$\alpha \approx 4 \text{ W/m}^2\text{K (für } \Delta T = 1 \text{ K)}$$

- erzwungene Konvektion  
 $\alpha \approx 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  (für  $v = 0,1 \text{ m/s}$ )
- freie Konvektion  
 $\alpha \approx 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  (für  $\Delta T = 1 \text{ K}$ ).

## 2.1 Wärmestrahlung

Zwischen Flächen unterschiedlicher Temperatur findet über ein diathermes Medium wie Luft hinweg ein Wärmeaustausch durch Strahlung statt (Folie 7). In Strahlungsrechnungen müssen Flächen unterschiedlicher Temperatur und unterschiedlicher Emissionsverhältnisse getrennt behandelt werden. Für diese Teil-Flächen der Strahlungsumgebung sind – abhängig vom jeweiligen Winkelverhältnis – die Wärmeübergangskoeffizienten für Wärmestrahlung und somit die Teil-Wärmeströme einzeln zu bestimmen. Die Modellierung des Strahlungsaustausches einer Fläche mit allen in Sichtkontakt stehenden Flächen ist deshalb sehr aufwändig. Kommerzielle Systeme können die Winkelverhältnisse und Überdeckungen der Sichtbarkeit automatisiert berücksichtigen. Bei einer komplexen Geometrie mit vielen gegenseitig sichtbaren Teilflächen, wie beispielsweise in einem stark verrippten Ständer, können diese Systeme jedoch aufgrund der Vielzahl der zu berücksichtigenden Verbindungen an ihre Grenzen stoßen.

## 2.2 Erzwungene Konvektion

In der Umgebung von Werkzeugmaschinen finden Luftströmungen durch Klima- und Lüftungsanlagen, durch großräumige Luftumwälzungen aufgrund von Temperaturunterschieden in der Werkhalle, durch Abluft benachbarter Anlagen, Zugscheinungen bei geöffneten Fenstern und Hallentoren sowie durch Bewegungen in der Halle und infolge von Bauteilbewegungen an der Maschine selbst statt. Die Wärmeübertragung zwischen einer Oberfläche und einem Fluid aufgrund einer von außen aufgeprägten Relativbewegung wird als erzwungene Konvektion bezeichnet. In der Literatur werden jeweils für bestimmte geometrische Wandkonstellationen sowie abhängig von geometrischen, stofflichen und kinematischen Größen Wärmeübergangskoeffizienten angegeben (Folie 9). Die Beziehungen sind meist nach den Gesetzen der Ähnlichkeit verallgemeinert.

## 2.3 Freie Konvektion

Freie Konvektion findet in Auftriebsströmungen bei Temperaturunterschieden zwischen der festen Oberfläche und einem Fluid wie der umgebenden Luft statt. Ansätze für Wärmeübergangskoeffizienten können für bestimmte geometrische Oberflächenformen und deren Ausrichtung zur Gravitationskraft aus der Literatur entnommen werden [Inc06] (Folie 8).

## 2.4 Ausführliche Beschreibung des Wärmeübergangs

Ein Modell, mit dem sich diese Wärmeübergänge ausführlich beschreiben lassen, zeigt Folie 10. Die dargestellten Teil-Wärmeströme, die durch Strahlung sowie freie und erzwungene Konvektion hervorgerufen werden, addieren sich zu einem Gesamtwärmestrom an der Oberfläche. Die Vorgehensweise und die Daten zur Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten können der Grundlagenliteratur der Wärmeübertragung, Tabellenwerken und Handbüchern wie [VDI06] sowie spezieller Literatur für die Verhältnisse an Werkzeugmaschinen wie [Jun10] entnommen werden.

## 3 Vereinfachte Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang

Der thermische Einfluss der Umgebung ist in der Simulation und damit auch für eine Korrektur thermischer Verformungen mittels strukturbasierter thermischer Modelle beschreibbar. Die praktische Umsetzung wird durch folgende Umstände erschwert:

- Die Umgebungskonstellation ist je nach den Einsatzbedingungen der Maschinen verschieden.

- Die Umgebungsbedingungen werden durch jahres- und tageszeitliche, sowie witterungsabhängige Faktoren und durch den Produktionsbetrieb in Maschinennähe beeinflusst.

Jede Einsatzbedingung würde ein eigenes Umgebungsmodell erfordern, verbunden mit erheblichem Messaufwand zur Ermittlung aktueller Eingangswerte für das Umgebungsmodell. Neben den Lufttemperaturen müssen auch die Strömungsgeschwindigkeiten mittels Anemometer in Bauteilnähe gemessen werden. Der Mess- und Modellierungsaufwand verstärkt sich für die Darstellung der Strahlungsumgebung. Die Oberflächentemperaturen potenzieller Strahler, wie z. B. Heizflächen, benachbarte Maschinen und Anlagen, sowie Hallenwände und Fenster, sind zu bestimmen. Bei ortsveränderlichen Strahlern wären auch die Winkelkoeffizienten nachzuführen.

In der Praxis arbeitet man deshalb gewöhnlich mit einer vereinfachten Beschreibung auf Basis pauschalisierter Umgebungsbedingungen nach [Jun10] (Folie 12), wobei auch die unterschiedlichen Umgebungstemperaturen um die Maschine ausgewertet und als Teil-Umgebungen verarbeitet werden können. Die Annahmen der Vereinfachungen sind so gewählt, dass ein Großteil der typischen Umgebungslasten hinreichend genau abgebildet werden kann.

Es ist offensichtlich, dass in der vereinfachten Beschreibung der Umgebungseinfluss nur in einem eingeschränkten Parameterbereich gültig ist. Dies zeigt der Vergleich des ausführlichen und vereinfachten Ansatzes auf Folie 13. Die Temperaturabhängigkeit ist noch gut erfassbar, da die Lufttemperatur als Bezugstemperatur berücksichtigt wird. Allerdings bleibt der Wechsel von laminarer zu turbulenter Luftströmung unberücksichtigt, was insbesondere bei kleinen Wandhöhen größere Abweichungen bewirkt. Folie 14 zeigt, dass bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten der erzwungenen Konvektion ebenfalls hohe Abweichungen zu verzeichnen sind. Erhöhte Abweichungen ergeben sich, wenn die Temperatur der Strahlungsumgebung und der Umgebungsluft voneinander abweichen. Ursache dafür ist der gegenüber der Konvektion höhere Einfluss der Wärmestrahlung.

#### **4 Messtechnischer Nachweis**

Mit Hilfe experimenteller Untersuchungen wird die Umgebungsbeschreibung bei der thermischen Simulation des Ständerbauteils einer Werkzeugmaschine in einer bekannten thermischen Maschinenumgebung getestet. Der Maschinenständer wird mit typischen Umgebungslasten einer unklimateierten Werkhalle in Form von freier Konvektion und Wärmestrahlung beaufschlagt (Folie 16). Die Auswertung der Versuche erfolgt über die Simulation des thermischen Verhaltens des Ständers bei unterschiedlicher Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen. Die simulativ ermittelten Ständertemperaturen werden anschließend mit gemessenen Ständertemperaturen verglichen. Dieser Vergleich erlaubt eine abschließende Bewertung der bei der Simulation genutzten Varianten zur Beschreibung des Wärmeaustauschs mit der Umgebung.

Die Temperaturen des Maschinenständers, der umgebenden Luft sowie des Strahlungshintergrundes werden für die Randbedingungen der Simulationsmodelle kontinuierlich aufgenommen. Zusätzlich wird die Lufttemperatur im Inneren des Ständers aufgezeichnet. Als Vergleichsgrößen für die Bewertung der Simulationsergebnisse dienen die gemessenen Temperaturen der vorderen Ständerwand. Die Messgrößen am Ständer sind Mittelwerte von über der Fläche verteilten Messwerten.

Folie 17 zeigt den Vergleich der Simulationen des thermischen Verhaltens des Maschinenständers mit den Messwerten. Der Wärmeaustausch mit der Umgebung wird dabei mit dem ausführlichen sowie mit dem vereinfachten Modell beschrieben. Bei dem ausführlichen Modell wird der Wärmeaustausch aller Flächen mit freier Konvektion zur Umgebungsluft und Strahlungsaustausch zu den im Sichtbereich der jeweiligen Ständerfläche stehenden Flächen berücksichtigt. Dies schließt den Strahlungsaustausch der inneren Ständerflächen untereinander mit ein. Bei Anwendung des vereinfachten Modellierungsansatzes wird als repräsentative Randtemperatur des Modells die gemessene Lufttemperatur vor der jeweiligen Ständeroberfläche verwendet.

Beim Vergleich der berechneten und gemessenen Ständertemperaturen zeigen die Werte des vereinfachten Modells deutliche Abweichungen über dem Zeitbereich der anliegenden Strahlerlast. Die Abweichungen resultieren aus der lediglich pauschalisierten Berücksichtigung der Strahlung. Das Modell mit ausführlichen Temperaturrandbedingungen bildet die hohe Strahlungslast deutlich besser ab. Im restlichen Zeitverlauf, bei abgeschaltetem Strahler, wirken die tageszeitlichen Schwankungen von Temperaturen der Luft und der Strahlungsumgebung. Hier besitzt das Modell mit vereinfachten Temperaturrandbedingungen durch geringe Differenzen zwischen Lufttemperaturen und Temperaturen des Strahlungshintergrunds wieder Gültigkeit und zeigt sogar vielfach geringere Abweichungen. D.h. bei niedrigen thermischen Umgebungslasten ist das vereinfachte Modell zur Umgebungsbeschreibung gültig und der ausführlichen Beschreibungsform ebenbürtig oder sogar überlegen. Bei hohen Umgebungslasten wie Strahlungseinflüssen mit zur Lufttemperatur abweichenden Temperaturen können die Fehler jedoch erheblich sein und der Ansatz verliert seine Gültigkeit.

## 5 Wärmeübergangsbeschreibung mittels CFD

Neben der Möglichkeit Temperaturfelder in einer Maschinenstruktur auf Basis strukturmechanischer FEM-Modelle zu berechnen, lassen sich diese auch mit Hilfe strömungsmechanischer Modelle (Computational Fluid Dynamics, CFD) ermitteln. Hierbei besteht nicht nur die Möglichkeit das Temperaturfeld in der Struktur und dem ebenfalls im Modell enthaltenen Fluid zu analysieren, der auf dem Rand zwischen Struktur und Fluid fließende Wärmestrom lässt außerdem eine Auswertung des Wärmeübergangskoeffizienten zu. Damit ist diese Form der numerischen Analyse geeignet, vergleichende Betrachtungen zu den empirisch ermittelten Randbedingungen zu nutzen, um vorhandene Defizite bei der Beschreibung der Konvektion zu erkennen.

Am Beispiel einer quadratischen, horizontalen Platte mit 1 m Kantenlänge ist in Folie 20 der in Folie 8 beschriebene Sachverhalt für freie Konvektion dargestellt. In den Abbildungen sind die an der Oberfläche der horizontalen Platte wirksamen Wärmeströme veranschaulicht. Das Luftvolumen wurde für die Ergebnisdarstellung ausgeblendet. Aufgrund von Ablöseerscheinungen der laminaren Grenzschicht bei Abkühlung auf der Oberseite einer horizontalen Platte ergeben sich entsprechend schwankende Wärmeströme, die an der Grenzschicht übertragen werden. Die Unterseite hingegen ist nicht von Strömungsabriss betroffen, was sich in einem gleichmäßig verteilten Verlustwärmestrom auswirkt, der nur zu den Rändern hin zunimmt.

Der in Folie 21 dargestellte Vergleich von analytisch und simulativ ermittelten Verlustwärmeströmen offenbart den Handlungsbedarf bei der Beschreibung von freier Konvektion, da bereits für einfache geometrische Problemstellungen signifikante Abweichungen festgestellt werden können.

Ursächlich für die Abweichungen sind unter anderem die notwendigen Vereinfachungen der empirisch ermittelten Berechnungsgleichungen auf Grundlage der Ähnlichkeitstheorie. Die bereichsweise gültigen Berechnungsvorschriften führen zu Unstetigkeiten bei der Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs (Folie 22) und die Geometrie beschreibende Parameter, wie die Überströmlänge lassen eine Anwendung nur unter Einhaltung gewisser Grenzen zu (vgl. Folie 23). Auch wenn zunächst davon ausgegangen werden kann, dass das „höherwertige“ CFD-Simulationsmodell eine genauere Beschreibung des Wärmeübergangs an den Grenzflächen zwischen Maschine und Umgebung zulässt, sind für eine exakte Beschreibung zusätzliche Materialkennwerte, Umgebungsbedingungen und Modellannahmen (z.B. Turbulenzmodelle, Netzdichte usw.) festzulegen, die häufig nur unzureichend bekannt sind und zu deren Ermittlung häufig der Vergleich mit Messwerten erforderlich ist.

Die Strömungssimulation hilft jedoch unabhängig von quantitativen Betrachtungen auch beim Verständnis der thermischen Übertragungsvorgänge, wie die Darstellungen in Folie 24 zeigen. Häufig besitzen weitere Randbedingungen maßgeblichen Einfluss auf die Wechselwirkung

zwischen Maschine und Umgebung, die bei einfachen Modellierungsansätzen und Anwendung empirischer Berechnungsmöglichkeiten nicht adäquat berücksichtigt werden können.

Mit welcher Genauigkeit die Parameter zur Beschreibung der Wechselwirkung von Maschinenoberfläche und Umgebung erforderlich sind und ob fehlerbehaftete Annahmen signifikante Abweichungen in den Berechnungsergebnissen nach sich ziehen, ist unter anderem auch von der Intensität der thermischen Lasten abhängig, wie die in Folie 26 skizzierten Untersuchungsergebnisse an einem Bearbeitungszentrum zeigen.

## 6 Zusammenfassung

Eine Beschreibung des Wärmeaustauschs zwischen Maschinenstruktur und Umgebung ist durch verschiedene Modellierungsansätze möglich. Die analytische Beschreibung basiert auf experimentellen Untersuchungen, die mit Hilfe von dimensionslosen Proportionalitätsfaktoren nach der Ähnlichkeitstheorie an Vereinfachungen geknüpft ist, die im Einzelfall nicht immer oder z. T. unzureichend erfüllt werden. Eine alternative Möglichkeit zur Beschreibung des Wärmeübergangs stellen CFD-Simulationen dar, die gleichzeitig die Möglichkeit zur Analysen beliebiger Geometrien bieten. Diese Strömungssimulationen sind jedoch an eine Vielzahl weiterer Parameter gebunden (Strömungsgeschwindigkeiten, Materialparameter, Turbulenzmodelle, Netzdichte usw.), die häufig nur mit erhöhtem Mess- und Simulationsaufwand bestimmt werden können. Die vereinfachten Modellierungsansätze liefern bei Einhaltung der Gültigkeitsbedingungen hinreichend genaue Ergebnisse bei vertretbarem Berechnungsaufwand. Bei der für Werkzeugmaschinen erforderlichen Vorhersagegenauigkeit thermisch bedingter Verlagerungen ist jedoch eine Erweiterung der vorhandenen, allgemeinen Beschreibungsmöglichkeiten des Wärmeaustauschs zwischen Umgebung und Maschinenstruktur notwendig. Der Einsatz von Strömungssimulationen in Verbindung mit Messungen zur Verifizierung stellt hierfür einen sinnvollen Ansatz zur Anpassung bekannter empirischer Modelle dar.

## 7 Literatur

- [Boe06] Böckh, P.v.: Wärmeübertragung Grundlagen und Praxis. Springer-Verlag 2006
- [Inc06] Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.; Bergman, T. L.; Adrienne, S.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons 2006
- [Jun10] Jungnickel, G.: Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen. Modellierung und Parametrierung. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen, TU Dresden 2010
- [Nes11] Nestmann, S.; Richter, C.; Schädlich, K.: Thermische Untersuchung von Werkzeugmaschinen unter definierten Belastungs- und Umgebungsbedingungen. Tagungsband zum 1. Kolloquium zum SFB/TR-96 Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen 28./29.11.2011 in Dresden
- [VDI06] VDI-Wärmeatlas. 10. bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer –Verlag, Berlin, Heidelberg 2006
- [Wec06] Weck, M., Brecher, C.: Werkzeugmaschinen 5. Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006
- [Wie67] Viele, H.; Klaeger, S.: Untersuchung der thermischen bedingten Verformung eines Großwälzfräsmaschinenständers. Maschinenbautechnik 16 (1967) 11, S. 569-574

# Modellierung des Wärmeaustauschs Maschine-Umgebung

W.-G. Drossel; St. Ihlenfeldt; C. Zwingenberger  
Fraunhofer IWU Chemnitz

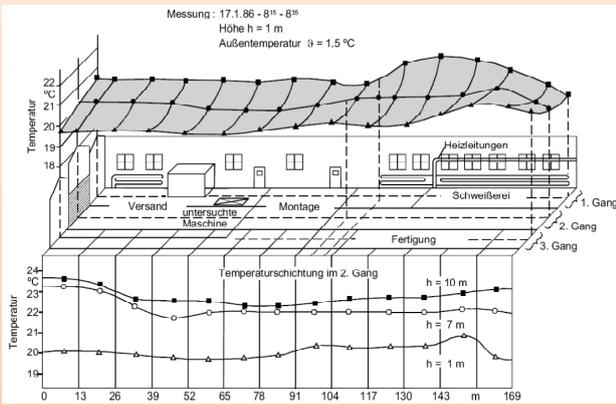
K. Großmann; St. Schroeder IWM  
TU Dresden

## Inhalt

1. Einführung
2. Klassische Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang
3. Vereinfachte Ähnlichkeitsmodelle für den Wärmeübergang
4. Messtechnischer Nachweis
5. Wärmeübergangsbeschreibung mittels CFD

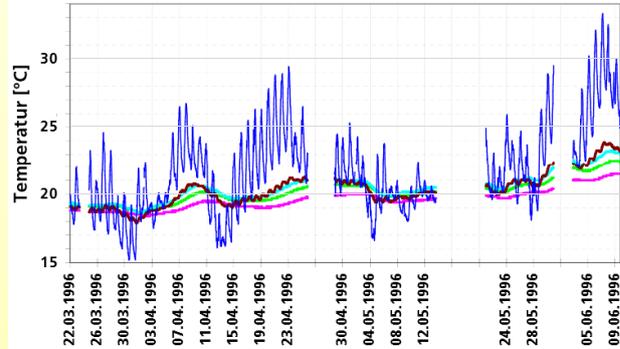
Thermisches Verhalten der Maschinenumgebung

Verteilung Lufttemperaturen



[Wec06]

Tages- und jahreszeitlicher Temperaturverlauf

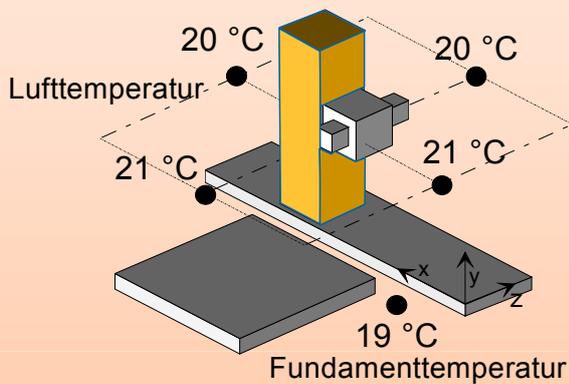


- Bodentemperatur in 1,0 m Tiefe
- Bodentemperatur in 0,5 m Tiefe
- Bodentemperatur in 0,75 m Tiefe
- Bodentemperatur in 0,2 m Tiefe
- Werkhallentemperatur

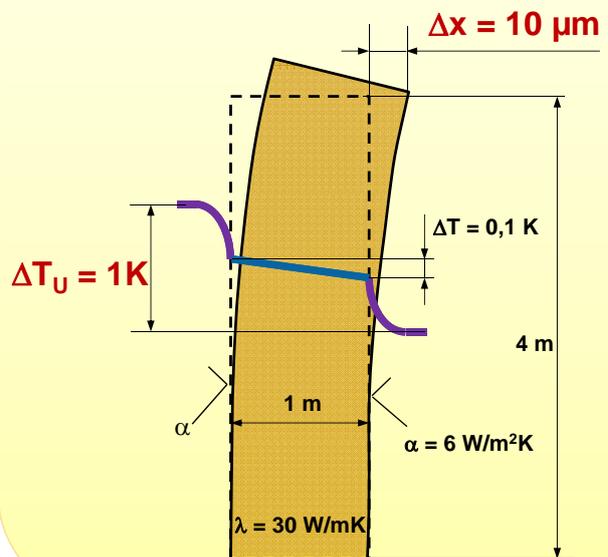
[Nes11]

Beispiel Maschinenständer bei Umgebungslast

Umgebungstemperaturfeld Werkzeugmaschine  $\Delta T_U = 1K$

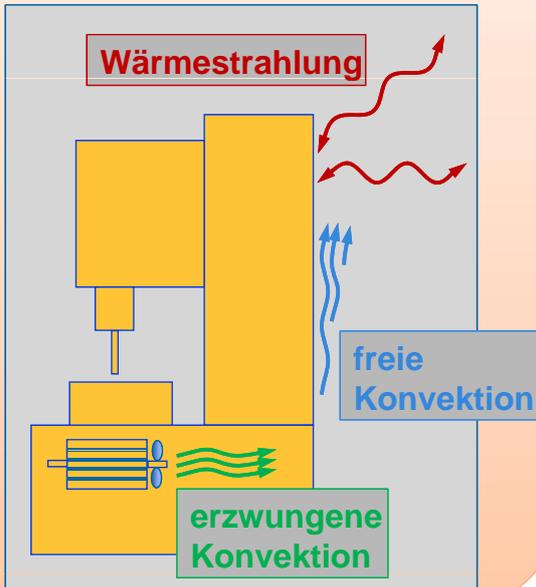


Resultierende Verformung



Wärmeübertragungsmechanismen zur Umgebung

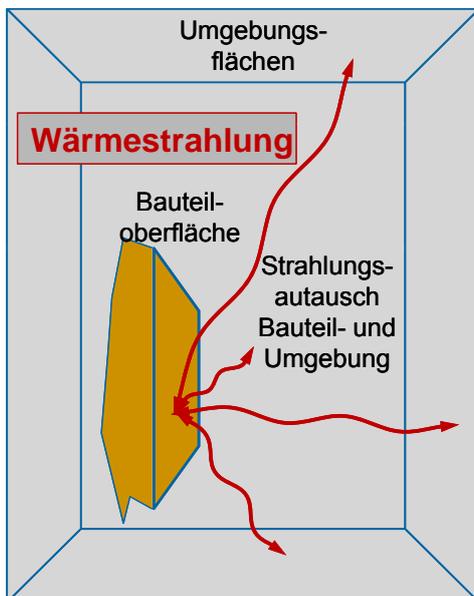
Wärmeübertragungsmechanismen



Größenordnung anhand Wärmeübergangskoeffizient:

- **Wärmestrahlung**  
 $\alpha \approx 4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  (für  $\Delta T=1 \text{ K}$ )
- **freie Konvektion**  
 $\alpha \approx 1,5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  (für  $\Delta T=1 \text{ K}$ ,  $l = 1 \text{ m}$ )
- **erzwungene Konvektion**  
 $\alpha \approx 1,5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  (für  $\Delta T=1 \text{ K}$ ,  $v = 0,1 \text{ m/s}$ )

Wärmestrahlung

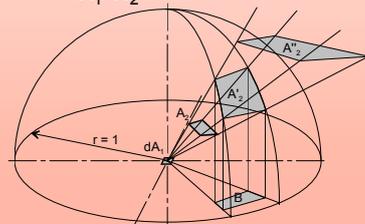


Modellierung nach Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$\alpha_{s,1-2} = \varphi_{1-2} \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot C_s \cdot g$$

- $C_s$  - Strahlungszahl des Schwarzen Strahlers
- mittleres Winkelverhältnis

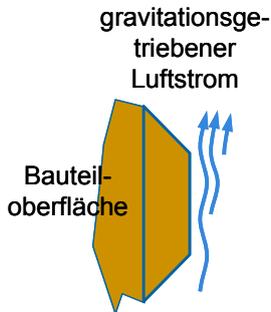
$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2)}{r^2} \cdot dA_1 \cdot dA_2$$



- $\varepsilon_{1-2}$  – resultierendes Emissionsverhältnis
- $g = \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}$  Temperaturfunktion mit absoluten Temperaturen der Oberflächen

Ähnlichkeitsmodelle für Konvektion

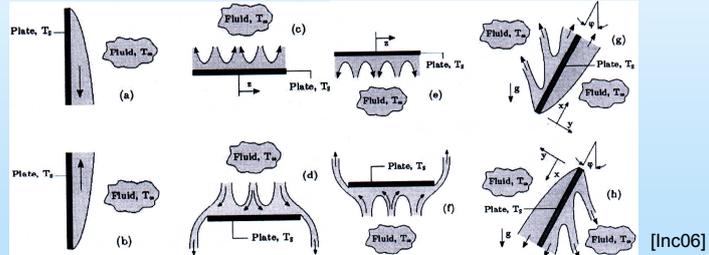
freie Konvektion



Modellierung mit Ähnlichkeitszahlen in der Form:

$$\alpha_{\text{frei}} = f \{ \text{Nu}(\text{geom. Anordnung, Gr, Pr}), l, \lambda \}$$

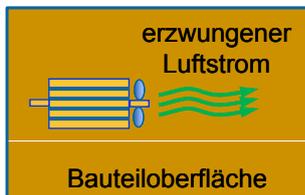
- Ansatz je nach geometrischer Anordnung



- Nu - Verhältnis Wärmeübertragung/Wärmeleitung
- Gr - Verhältnis Auftriebskraft/Viskositätskraft
- Re - Verhältnis Trägheitskraft/Zähigkeitskraft
- l - Charakteristische Größe wie Überströmlänge
- $\lambda$  - Wärmeleitfähigkeit

Ähnlichkeitsmodelle für Konvektion

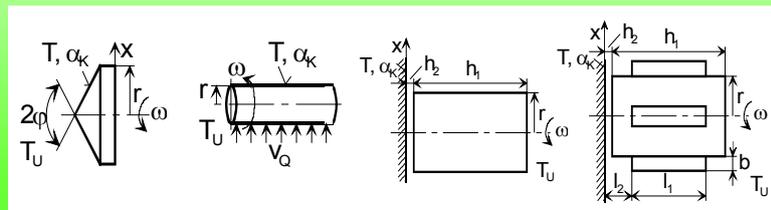
erzwungene Konvektion



Modellierung mit Ähnlichkeitszahlen in der Form:

$$\alpha_{\text{erzw}} = f \{ \text{Nu}(\text{geom. Anordnung, Re}(v), \text{Pr}), l, \lambda \}$$

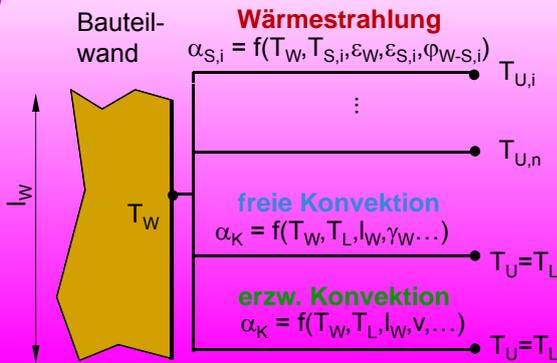
- Ansatz je nach geometrischer Anordnung



- Nu - Verhältnis Wärmeübertragung/Wärmeleitung
- Re - Verhältnis Trägheitskraft/Zähigkeitskraft
- Pr - Viskosität/Temperaturleitfähigkeit des Fluids
- l - Charakteristische Größe wie Überströmlänge
- $\lambda$  - Wärmeleitfähigkeit

Ausführlicher Ansatz der Umgebungsbeschreibung

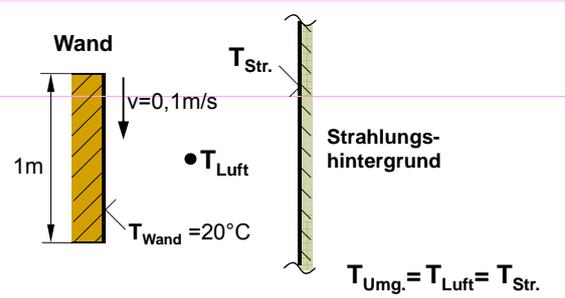
Vorgehen Modellierung:



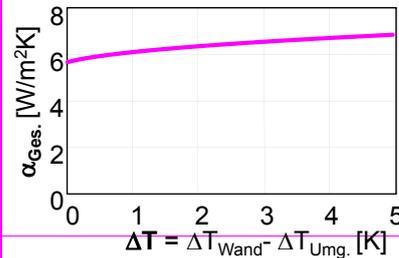
Veränderliche Eingangsgrößen:

- $T_W$  – Wandtemperatur
- $T_{U,i}$  – Temperatur Umgebungsflächen
- $T_L$  – Lufttemperatur
- $v_{Luft}$  – Strömungsgeschw. Luft

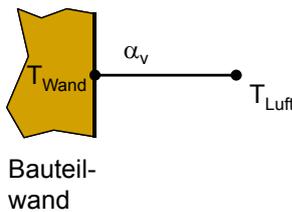
Beispiel senkrechte Platte:



Gesamtwärmeübergang



Vereinfachte Beschreibung des thermischen Umgebungseinflusses



typische Maschinenflächen und Umgebungslast:

- Flächenabmessung > 25cm
- Geringe Temperaturdifferenzen zur Umgebung
- Temperatur Umgebungsluft gleicht Temp. Strahlungsumgebung
- Leichte erzwungene Luftströmung < 0,2 m/s

Wärmestrahlung

- Temperaturfunktion konstant  $\vartheta = 10^8 \text{ K}^3$  gültig für geringe Temperaturunterschiede
- Emissionskoeffizient der Umgebung  $\epsilon_U = 0,8$
- mittleres Winkelverhältnis  $\varphi = 1$

$\alpha = 4,5 \cdot \epsilon_W [\text{W/m}^2\text{K}]$

Freie und erzwungene Konvektion

- Ansatz freie Konvektion im turbulenten Bereich  $\alpha = 1,7 \cdot |T_W - T_L|^{0,33}$  gültig für größere Flächen
- erzwungenen Konvektion: Erhöhung der freien Konvektion um 30%

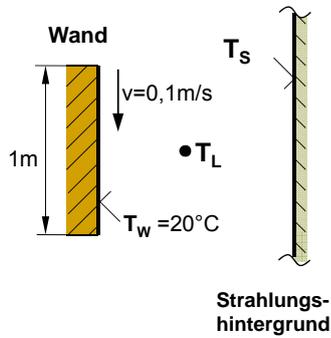
$\alpha = 2,2 \cdot |T_W - T_L|^{0,33} [\text{W/m}^2\text{K}]$

Lufttemperatur = Temperatur Strahlungsumgebung

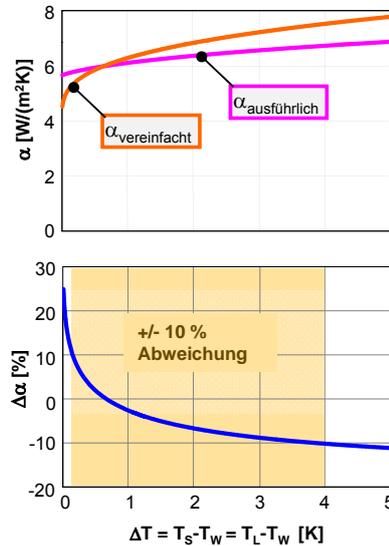
$\alpha_v = 4,5 \cdot \epsilon_W + 2,2 \cdot |T_W - T_L|^{0,33} [\text{W/m}^2\text{K}]$  [Jun10]

Abschätzung des Fehlers der vereinfachten Beschreibung

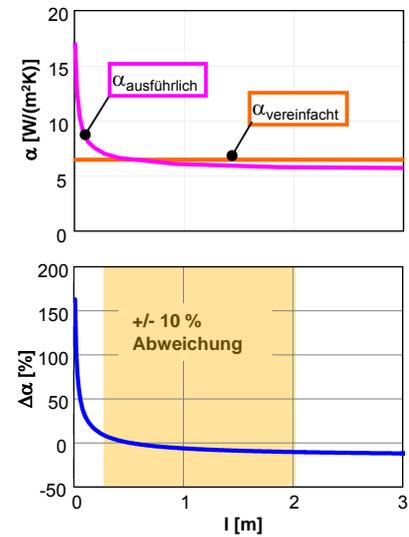
Fehlerabschätzung anhand Modell vertikaler Wand



Veränderung Temperaturdifferenz

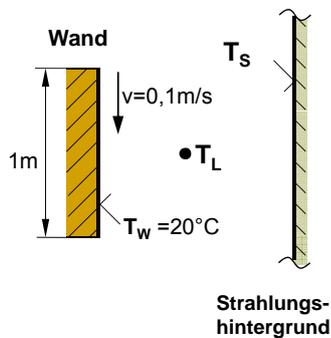


Veränderung Wandhöhe

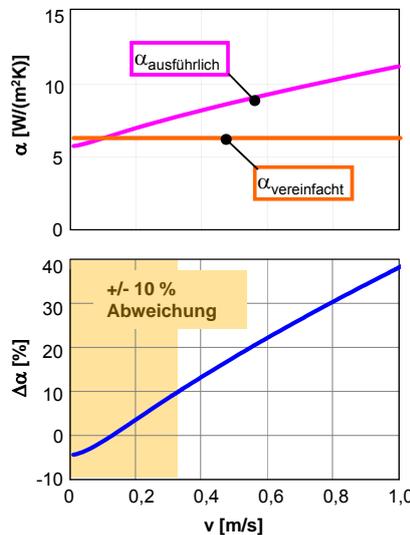


Abschätzung des Fehlers der vereinfachten Beschreibung

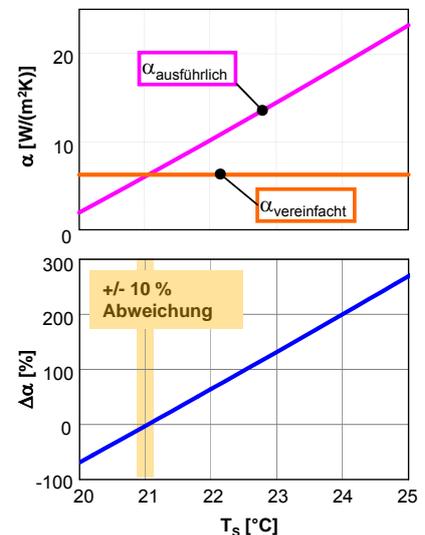
Fehlerabschätzung anhand Modell vertikaler Wand



Variation der Luftgeschwindigkeit

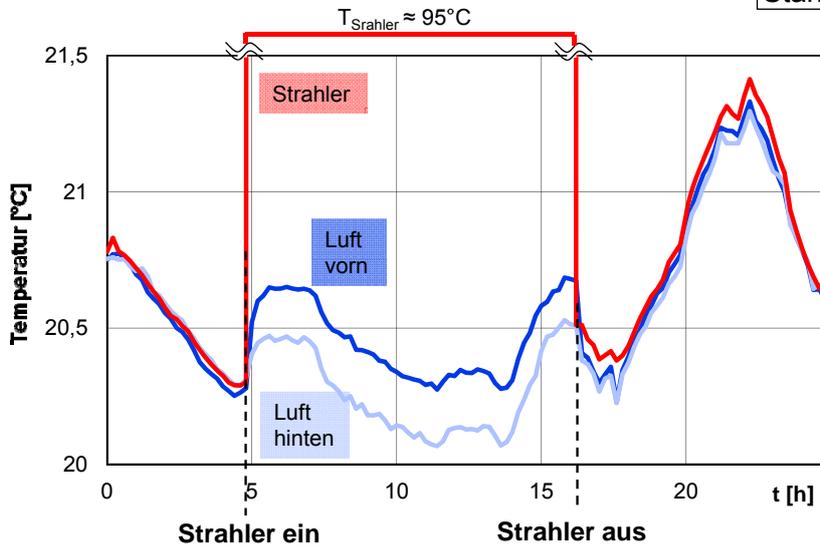


Variation der Temperatur der Strahlungsumgebung

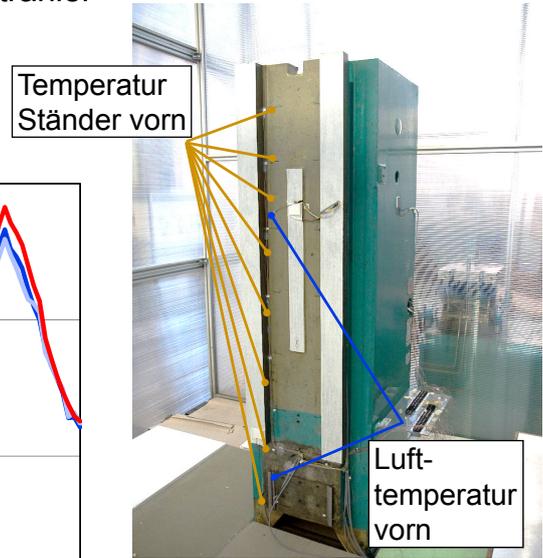


Versuch zur Validierung der Umgebungsmodelle

Temperaturverläufe Umgebungsluft und Wärmestrahler



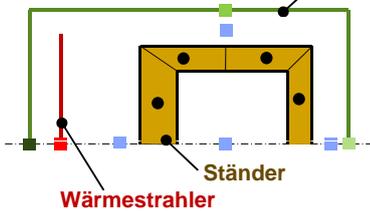
Sensoren Ständervorderseite



Vergleich Messung mit Modellen

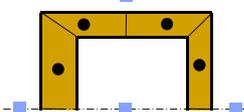
ausführlich mit Temperaturrandbedingungen

Strahlungshintergrund

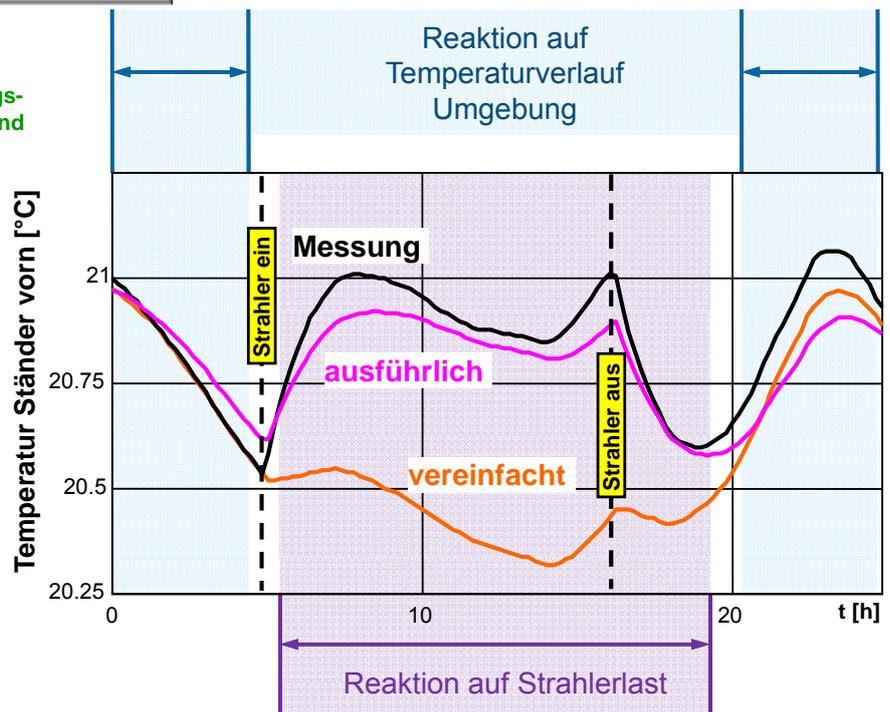


vereinfacht mit Temperaturrandbedingungen

Umgebungs-luft



■ Temperaturrandbedingung



Grenzen der Ähnlichkeitsmodelle

Begrenzte Gültigkeitsbereiche der konvektiven Ähnlichkeitsmodelle insbesondere bei:

- Flächengeometrien, Randflächen
- Flächenneigung bezüglich Gravitationskraft
- Temperaturverteilung der Flächen
- Strömungsrichtung bei erzwungener Konvektion

Messtechnische Untersuchung

Numerische Strömungsberechnung

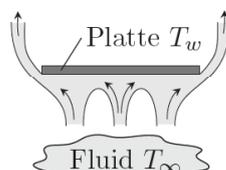
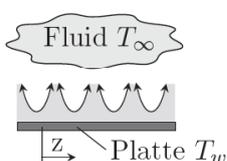
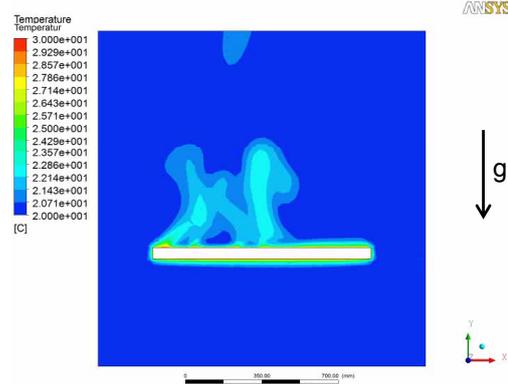
CFD-Simulation – freie Konvektion an horizontaler Platte

- Unterscheidung der Orientierung von Oberflächen zur Gravitation erforderlich
- Ablöseerscheinungen beeinflussen den Wärmestrom (Erhöhung des Wärmestroms)
- Ähnlichkeitsmodelle beinhalten ebenfalls Fallunterscheidung mit bereichsweise gültigen Berechnungsvorschriften

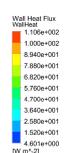
$T_w = 30^\circ\text{C}$     $T_\infty = 20^\circ\text{C}$

Plattenabmessungen: 1m x 1m

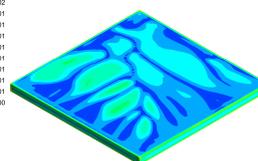
Boussinesq-Approximation (CFD-Simulation)



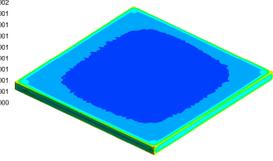
nach [Inc06]



Oberseite

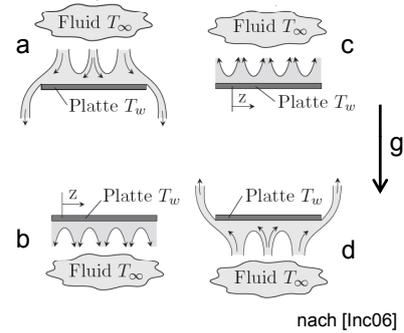


Unterseite



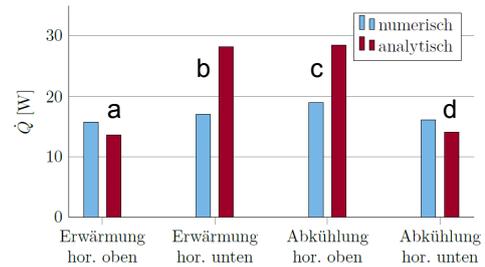
Vergleich CFD-Simulation  $\leftrightarrow$  analytische Berechnung (horizontale Platte)

- Abweichungen zwischen analytischer Berechnung und CFD-Simulation bis zu 40% für horizontale, ebene Platte (bezogen auf Gesamtwärmestrom einer Platte von 1m x 1m)
- Randbereiche werden bei analytischer Betrachtung nicht adäquat berücksichtigt
- Strömungssimulation beinhaltet Turbulenzmodell SST („Shear Stress Transport“)



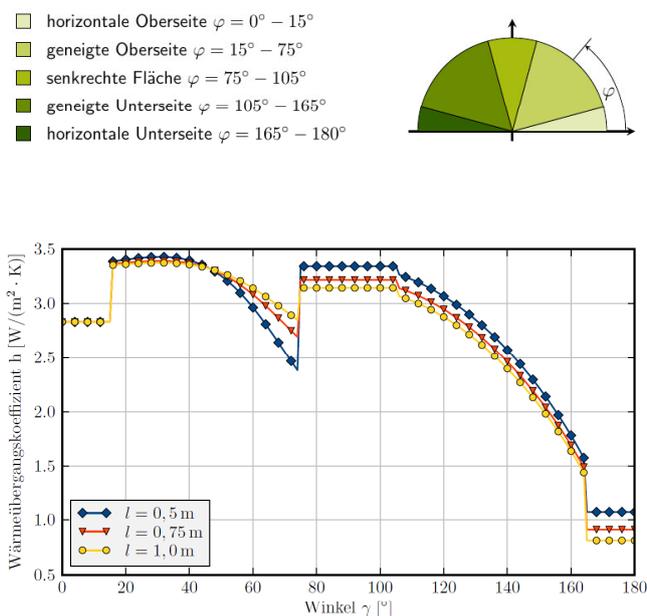
**Randbedingungen bei Abkühlung:**  
 $T_w = 30^\circ\text{C}$   $T_\infty = 20^\circ\text{C}$   
 Plattenabmessungen: 1m x 1m  
 Boussinesq-Approximation (CFD-Simulation)

**Randbedingungen bei Erwärmung:**  
 $T_w = 20^\circ\text{C}$   $T_\infty = 30^\circ\text{C}$   
 Plattenabmessungen: 1m x 1m  
 Boussinesq-Approximation (CFD-Simulation)



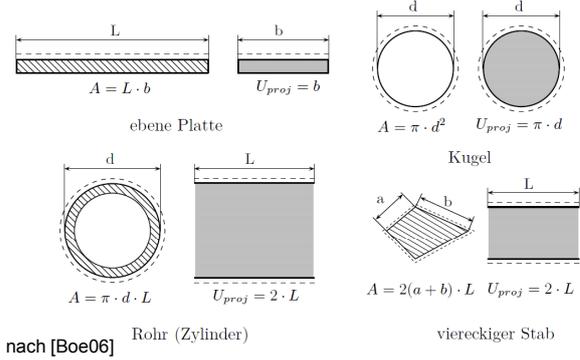
Vereinfachungen der Ähnlichkeitsmodelle

- Fallunterscheidung nach Ausrichtung der Oberflächen zur Gravitation
- Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene Orientierungen ermittelbar auf Grundlage empirisch bestimmter Berechnungsvorschriften
- Bereichsweise Gültigkeit  $\rightarrow$  führt zu Unstetigkeiten (Wechsel von winkelabhängigen und winkelunabhängigen Berechnungsgleichungen)
- Größe der sprunghaften Änderungen sind von der Überströmlänge abhängig
- In der Realität sind sprunghafte Änderungen des Wärmestroms von der Wand zum Fluid ebenfalls feststellbar  $\rightarrow$  Übergang von laminarer in turbulente Strömung



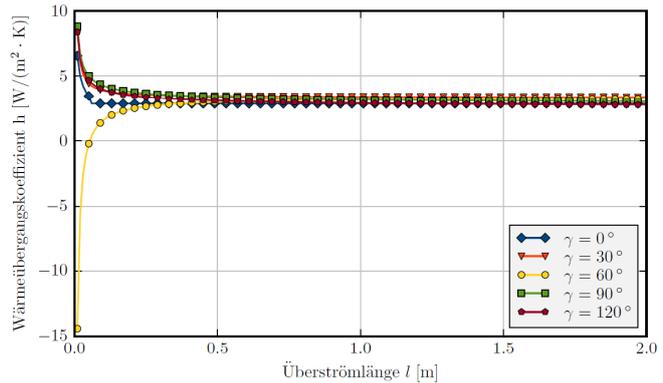
Vereinfachungen der Ähnlichkeitsmodelle

- Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene Überströmlängen und Neigungswinkel zur Gravitation (Diagramm)
- Anwendbarkeit für kleine Werte nicht bzw. nur eingeschränkt gegeben
- Empirische Berechnungsgleichungen für große Flächen ermittelt



$$l = \frac{A}{U_{proj}}$$

l – Überströmlänge  
 A – Wärmeübertragungsfläche  
 U<sub>proj</sub> – Umfang der Projektionsfläche in Strömungsrichtung

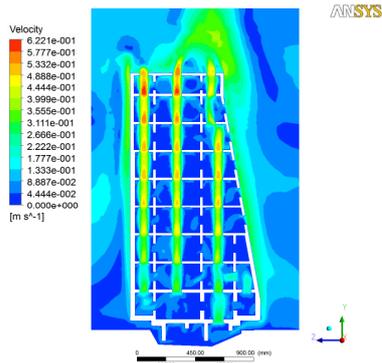


CFD-Simulation freier Konvektion

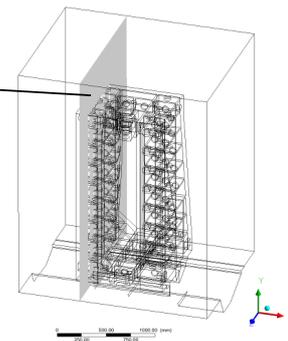
- Auswirkung der Geometrie auf die Strömungsgeschwindigkeiten
- Beeinflussung des Wärmeaustauschs durch Konvektion in Gestellinnenräumen
- Beispiel: Übereinanderliegende Bohrungen → Kamineffekt

$T_W = 30^\circ C$   $T_\infty = 20^\circ C$   
 Boussinesq-Approximation (CFD-Simulation)

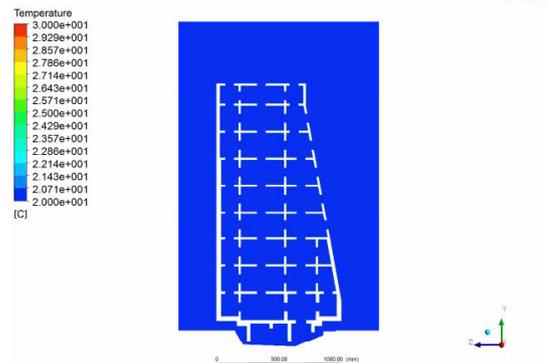
Transiente Simulation - Strömungsgeschwindigkeiten



Schnittebene der Auswertung

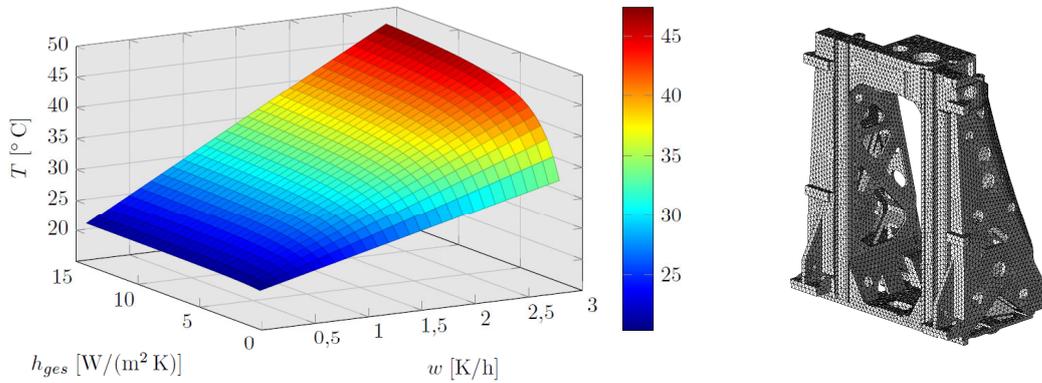


Transiente Simulation – Temperaturverteilung (8min)



Einfluss der Intensität thermischer Umgebungslasten

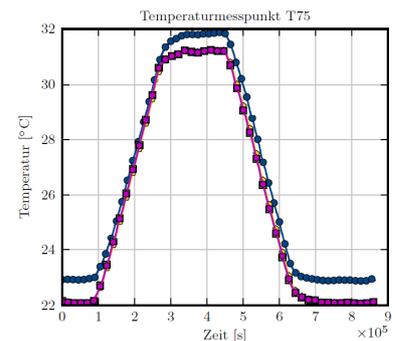
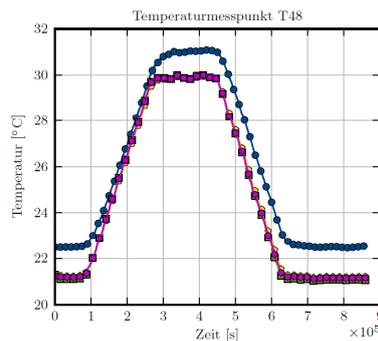
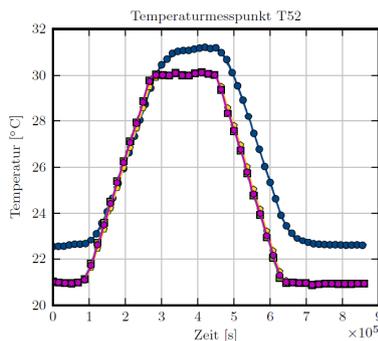
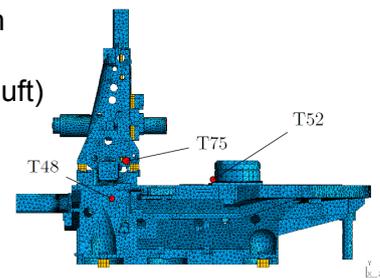
- Einfluss der Genauigkeit von Randbedingungen zur Definition des Wärmeaustausch mit der Umgebung steigt mit der Intensität der thermischen Umgebungslasten
- Zeitlich geringe Änderungen der Umgebungsbedingungen führen zu Steigerung der Fehlertoleranz (Beachtung Biot-Zahl)



Abhängigkeit der Endtemperatur (nach 10 Stunden) von Erwärmungsgeschwindigkeit und Wärmeübergangskoeffizient bei instationärer Wärmeleitung mit linearem Temperaturanstieg für einen Maschinenständer

Einfluss der Intensität thermischer Umgebungslasten

- Variation der Wärmeübergangskoeffizienten ohne signifikanten Einfluss auf den Temperaturverlauf bei geringer Umgebungslast (0,2K/h Temperaturänderung der Umgebungsluft)
- Fehlende Maschinenverkleidung im Simulationsmodell ist ursächlich für Abweichungen beim Temperaturniveau und zeitliche Abweichungen der Simulation gegenüber Messung (Basis der thermischen Simulation ist strukturmechanisches FEM-Modell)



Legend for T52: Messung (blue circle), Sim  $h_2 = 5 W/(m^2 K)$  (yellow circle), Sim  $h_3 = 10 W/(m^2 K)$  (green square), Sim trans KRB new (purple square).

Legend for T48: Messung (blue circle), Sim  $h_2 = 5 W/(m^2 K)$  (yellow circle), Sim  $h_3 = 10 W/(m^2 K)$  (green square), Sim trans KRB (purple square).

Legend for T75: Messung (blue circle), Sim  $h_1 = 5 W/(m^2 K)$  (yellow circle), Sim hges (purple square).

## Zusammenfassung

- Beschreibung des Wärmeaustauschs zwischen Maschinenstruktur und Umgebung durch verschiedene Modellierungsansätze möglich
- Analytische Beschreibung basiert auf experimentellen Untersuchungen mit Hilfe von dimensionslosen Proportionalitätsfaktoren nach der Ähnlichkeitstheorie → an Vereinfachungen geknüpft, die im Einzelfall nicht oder unzureichend erfüllt sind
- CFD-Simulationen bieten die Möglichkeit der Analysen beliebiger Geometrien, sind jedoch an eine Vielzahl weiterer Parameter gebunden (Strömungsgeschwindigkeiten, Materialparameter, Turbulenzmodelle usw.)
- Vereinfachte Modellierungsansätze liefern bei Einhaltung der Gültigkeitsbedingungen hinreichend genaue Ergebnisse bei vertretbarem Berechnungsaufwand
- Für Werkzeugmaschinen erforderliche Vorhersagegenauigkeit erfordert eine Erweiterung der vorhandenen, allgemeinen Beschreibungsmöglichkeiten des Wärmeaustauschs zwischen Umgebung und Maschinenstruktur
- Einsatz von Strömungssimulationen in Verbindung mit Messungen zur Verifizierung stellt sinnvollen Ansatz zur Erweiterung bekannter empirischer Modelle dar

## Literatur

- [Boe06] Böckh, P.v.: Wärmeübertragung Grundlagen und Praxis. Springer-Verlag 2006
- [Inc06] Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.; Bergman, T. L.; Adrienne, S.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons 2006
- [Jun10] Jungnickel, G.: Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen. Modellierung und Parametrierung. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen, TU Dresden 2010
- [Nes11] Nestmann, S.; Richter, C.; Schädlich, K.: Thermische Untersuchung von Werkzeugmaschinen unter definierten Belastungs- und Umgebungsbedingungen. Tagungsband zum 1. Kolloquium zum SFB/TR-96 Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen 28./29.11.2011 in Dresden
- [VDI06] VDI-Wärmeatlas. 10. bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer –Verlag, Berlin, Heidelberg 2006
- [Wec06] Weck, M., Brecher, C.: Werkzeugmaschinen 5. Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006
- [Wie67] Wiele, H.; Klaeger, S.: Untersuchung der thermischen bedingten Verformung eines Großwälzfräsmaschinenständers. Maschinenbautechnik 16 (1967) 11, S. 569-574

Dank

Diese Arbeiten werden mit Mitteln der  
Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert,  
wofür gedankt wird.

SFB/TR 96, Teilprojekt B01, A05 und B07



**DFG**

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.**

# **Strukturveränderlichkeit in FEM und Blocksimulation bei der Berechnung von Temperaturfeldern**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann; Dipl.-Math. A. Galant  
TU Dresden, IWM

Prof. Dr.-Ing. M. Beitelschmidt; Dipl.-Ing. M. Partzsch  
TU Dresden, IFKM

# STRUKTURVERÄNDERLICHKEIT IN FEM UND BLOCKSIMULATION BEI DER BERECHNUNG VON TEMPERATURFELDERN

Großmann, K.; Galant, A.; IWM TU Dresden; Beitel Schmidt, M.; Partzsch, M.; IFKM TU Dresden

## 1 Einführung

Die Bahn des Tool Center Point wird in Werkzeugmaschinen (WZM) durch geführte, relativ zueinander bewegte Gestellstrukturbauteile erzeugt. Die innerhalb und außerhalb der WZM liegenden thermischen Lasten führen zu Verformungen dieser Strukturbauteile, woraus sich Bahnfehler ergeben.

Für die Gestaltung von Kompensationslösungen, die Bewertung des thermo-elastischen Verhaltens und für die Korrektur thermo-elastischer Fehler im Betrieb werden Berechnungsmodelle der gesamten WZM mit Berücksichtigung der durch Relativbewegungen hervorgerufenen Strukturvariabilität benötigt.

Für die Bewertung der zielgerichteten Gestaltung des thermo-elastischen Verhaltens in der konstruktiven Entwicklungsphase sind visualisierte Temperatur- und Verformungsfelder in der Auflösung der gestalteten Geometrie notwendig. Hier hat sich die Finite-Elemente-Methode (FEM) als Werkzeug für thermo-elastische Berechnungen durchgesetzt und ist weitgehend in den CAD-Prozess eingebettet. Sofern in der Entwicklungsphase keine umfangreichen Variantenrechnungen erforderlich sind, werden lange Simulationszeiten für die Berechnung großer FE-Modelle mit vielen tausenden Freiheitsgraden zumeist noch akzeptiert.

Für die Analyse eines breiten Spektrums thermischer Last- und Randbedingungen (Variantenrechnungen) und für die steuerungintegrierte Korrektur thermo-elastischer Fehler treten Forderungen nach Minimierung der Rechenzeit in den Vordergrund. Für diese Anwendungen ist die Anzahl der Freiheitsgrade des originalen FE-Modells i.d.R. zu groß. Ein Lösungsweg bieten Verfahren der sog. Modell-Ordnungs-Reduktion (MOR). Diese Methoden ermöglichen die Erstellung von kleindimensionalen thermischen Modellen direkt aus dem originalen FE-Modell für jedes Gestellbauteil. Die einzelnen kompakten Modelle werden dann zu einem rechenzeiteffizienten Netzwerkmodell der gesamten WZM mit Berücksichtigungen großer Relativbewegungen verbunden.

Im ersten Teil des Vortrags wird der konventionelle Lösungsweg der thermischen Modellierung der WZM unter Berücksichtigung großer Relativbewegungen von Gestellstrukturbauteilen in dem kommerziellen FE-Programm ANSYS dargelegt. Im zweiten Teil wird die traditionelle Vorgehensweise erweitert: Die FE-Modelle der WZM-Baugruppen werden mit Hilfe von MOR-Methoden auf kompakte Modelle reduziert und zu einem rechenzeitsparenden Simulink-Modell der gesamten WZM verbunden. Im abschließenden Teil werden Ergebnisse von Beispielrechnungen dargestellt und miteinander verglichen.

## 2 Theoretische Grundlage und Testproblem

Bei rein thermo-elastischen Berechnungen brauchen nur Effekte der statischen Verformung berücksichtigt werden, da die Eigenfrequenzen der Strukturmechanik durch relativ langsame thermische Prozesse i.d.R. nicht angeregt werden. Das Problem-beschreibende DGL-System hat nach der Diskretisierung mittels FEM folgende Form:

$$[K]\{u\} = \{F\} - \overbrace{[K_{uT}]\{T\}}^{-\{F_T\}} = \{F\} + \{F_T\} \quad (1a)$$

$$[C_T]\{\dot{T}\} + [K_T]\{T\} = \{\dot{Q}\} \quad (1b)$$

Dabei sind  $[K]$ ,  $[K_{uT}]$ ,  $[C_T]$  und  $[K_T]$  entsprechende Steifigkeits-, thermische Steifigkeits-, Kapazitäts- und Leitwertmatrizen,  $\{u\}$  und  $\{T\}$  sind die zeitabhängigen Verformungs- und Temperaturvektoren und  $\{F\}$  bzw.  $\{\dot{Q}\}$  sind die ebenfalls zeitabhängigen mechanischen bzw. thermischen Lastvektoren.

Wir gehen davon aus, dass die beiden Gleichungen (1a) und (1b) getrennt aufgelöst werden können (sog. schwache Kopplung). D.h. es wird im ersten Schritt die transiente Aufgabe (1b) gelöst. Anschließend wird auf i.d.R. wesentlich gröber diskretisierter Zeitskala mit (1a) der Verformungsvektor  $\{u\}$  bestimmt.

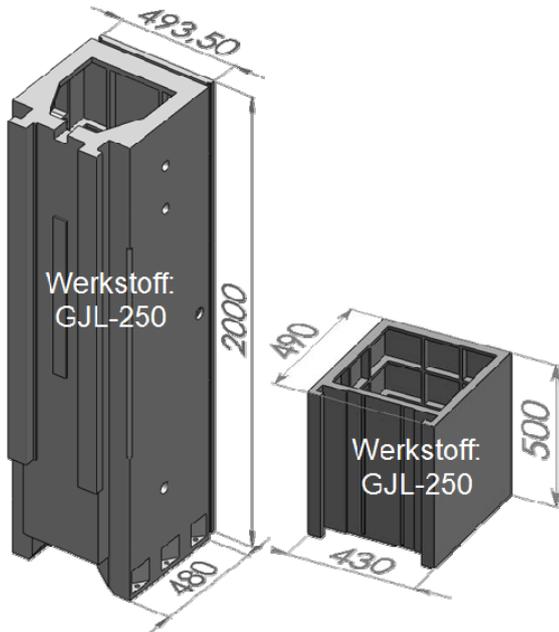


Bild 1: CAD-Modell der Ständer-Spindelstock-Teilstruktur

Zur Demonstration der Ergebnisse wird eine vereinfachte WZM-Teilstruktur, bestehend aus einem Fräsmaschinen-Ständer mit integrierten Führungsschienen und Spindelstock gewählt (s. Bild 1). Der Spindelstock kann sich entlang der z-Achse relativ zum Ständer bewegen.

### 3 Traditionelle Modellierung im FEM

#### 3.1 Modellierung ohne Strukturvariabilität

Es wird zunächst davon ausgegangen, dass die Berechnung für eine stationäre Konfiguration von Gestellstrukturbauteilen stattfindet, also unter Vernachlässigung der Relativbewegungen.

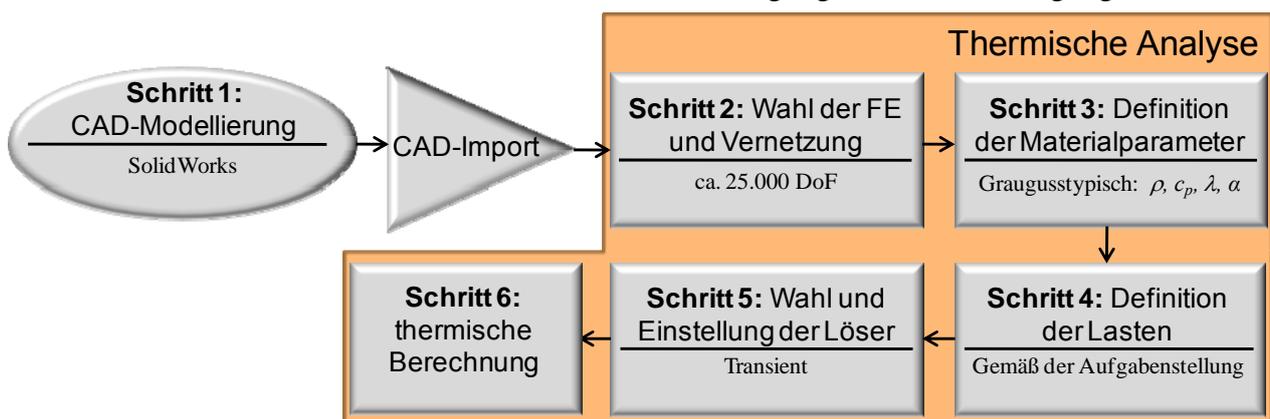


Bild 2: Schema der konventionellen thermischen Simulation in ANSYS

Der konventionelle Lösungsweg im FEM bspw. mit ANSYS beinhaltet die im Bild 2 dargestellten Modellierungs- und Lösungsschritte, wobei unter den Strichen in den einzelnen Blöcken die konkret für das vorliegende Testproblem gewählten Charakteristiken notiert sind.

### 3.2 Modellierung mit Strukturvariabilität

Zur Abbildung der großen Relativbewegungen zwischen Ständer und Spindelstock im FE-Modell benötigt man zur jeder Zeit die Kenntnis über die Relativposition der Gestellstrukturbauteile untereinander (also eine Bewegungssteuerung) und eine besondere Behandlung der im Kontakt stehenden Oberflächenbereiche.

Die zwei Baugruppen, die sich zueinander bewegen, werden an den Oberflächen, wo ein thermischer Kontakt stattfinden kann, mit speziellen FE-Elementen (sog. CONTACT- und TARGET-Elemente) überzogen. (vgl. Bild 3)

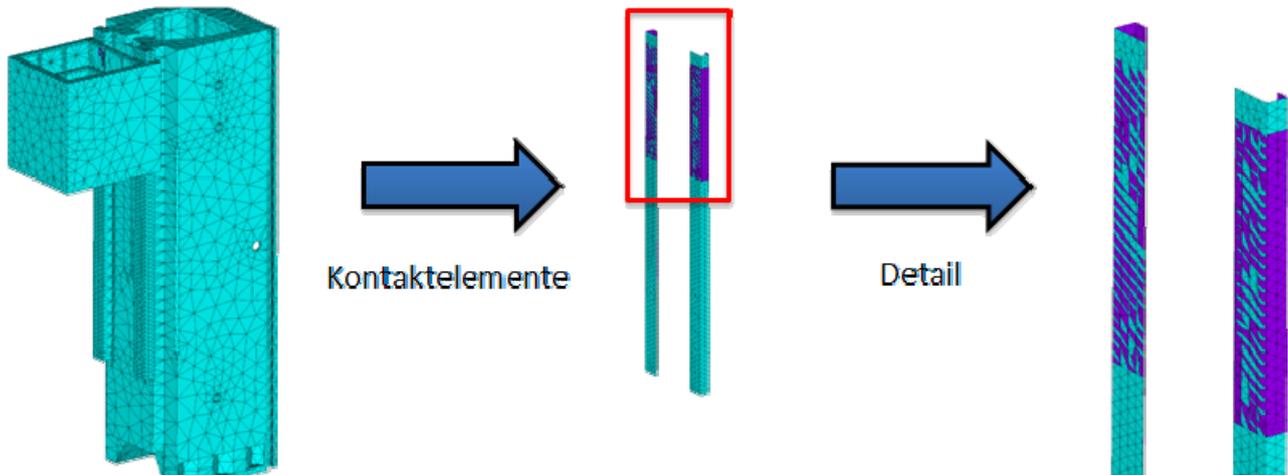


Bild 3: Vernetzung der Kontaktoberflächen mit Target-FE (Ständer) und Contact-FE (Spindelstock)

Während der Bewegung beobachten die TARGET-Elemente die dazugehörigen CONTACT-Elemente und ermitteln automatisch die „Berührungszone“ zu jedem aktuellen Zeitpunkt. Über diese dynamisch identifizierte Zone findet automatisch Wärmeleitung statt, dessen Höhe von der definierten Kontakt-Wärmeübergangszahl und der Differenztemperatur abhängt.

Die Bewegungssteuerung wird dadurch organisiert, dass zu jedem Integrationszeitschritt die globale Position der Baugruppen im Raum aktualisiert wird. Dies benötigt die Existenz von Strukturfreiheitsgraden im Modell. Es sind also sowohl thermische (zur Temperaturfeldberechnung) als auch mechanische (zur Lagedefinition) Freiheitsgrade notwendig, was die Verwendung von Coupled-Field-FE (also thermal-strukturelle FE) erfordert.

## 4 Erweiterung der FEM-Modellierung

### 4.1 Modell-Ordnungs-Reduktion

Die MOR-Verfahren bieten eine effiziente Möglichkeit zur Erstellung kompakter rechenzeitsparender Modelle mit guten Approximationseigenschaften direkt aus originalen FE-Modellen.

Die Problemdarstellung im FEM gemäß (1b) wird zunächst in eine Zustandsraumdarstellung umformuliert:

$$\{u_1(t), \dots, u_k(t)\}^T \rightarrow \begin{cases} \dot{\{T(t)\}} + [A]\{T(t)\} = [B]\{u(t)\} \\ \{y(t)\} = [C]^T \{T(t)\} \end{cases} \rightarrow \{y_1(t), \dots, y_k(t)\}^T \quad (2)$$

mit  $[A]$ ,  $[B]$ ,  $[C]$  als System-, Steuer- und Messmatrizen sowie  $\{u\}$ ,  $\{y\}$  als Ein- und Ausgangssignalvektoren.

Durch geschickte Berechnung einer Projektionsmatrix  $[V_n]$  wird die Aufgabe (2) in einen Bildbereich (3) transformiert:

$$\{u_1(t), \dots, u_k(t)\}^T \rightarrow \begin{cases} \dot{\{\hat{T}(t)\}} + [\hat{A}]\{\hat{T}(t)\} = [\hat{B}]\{u(t)\} \\ \{\hat{y}(t)\} = [\hat{C}]^T \{\hat{T}(t)\} \end{cases} \rightarrow \{\hat{y}_1(t), \dots, \hat{y}_k(t)\}^T \quad (3)$$

mit  $[\hat{A}] = [V_n]^T \cdot [A] \cdot [V_n]$ ;  $[\hat{B}] = [V_n]^T \cdot [B]$ ;  $[\hat{C}] = [V_n]^T \cdot [C]$  als reduzierte System-, Steuer- und Messmatrizen und  $\{\hat{y}\}$  als Ausgangssignalvektor im reduzierten Bildbereich. Die Gleichung  $\{T\} = [V_n] \{\hat{T}\}$  liefert die Vorschrift zur Rücktransformation der reduzierten Temperaturen  $\{\hat{T}\}$  in die Knotentemperaturen  $\{T\}$  des originalen FE-Modells.

Die Struktur der originalen Gleichung (2) bleibt mit den reduzierten Gleichung (3) erhalten. Das reduzierte Modell hat allerdings im Vergleich mit dem unreduzierten Ausgangssystem eine wesentlich kleinere Dimension. Die Qualität des reduzierten Modells wird dadurch bestimmt, wie genau das System (3) im Kontext des gestellten Problems die Ausgangsinformation des Originalsystems erhält.

Die detaillierte Darstellung zur mathematischen Umformung des Problems (1b) und zu den von uns für die Bestimmung der Projektionsmatrix  $[V_n]$  verwendeten Krylov-MOR-Methoden findet man in [1].

## 4.2 Modellierung ohne Strukturvariabilität

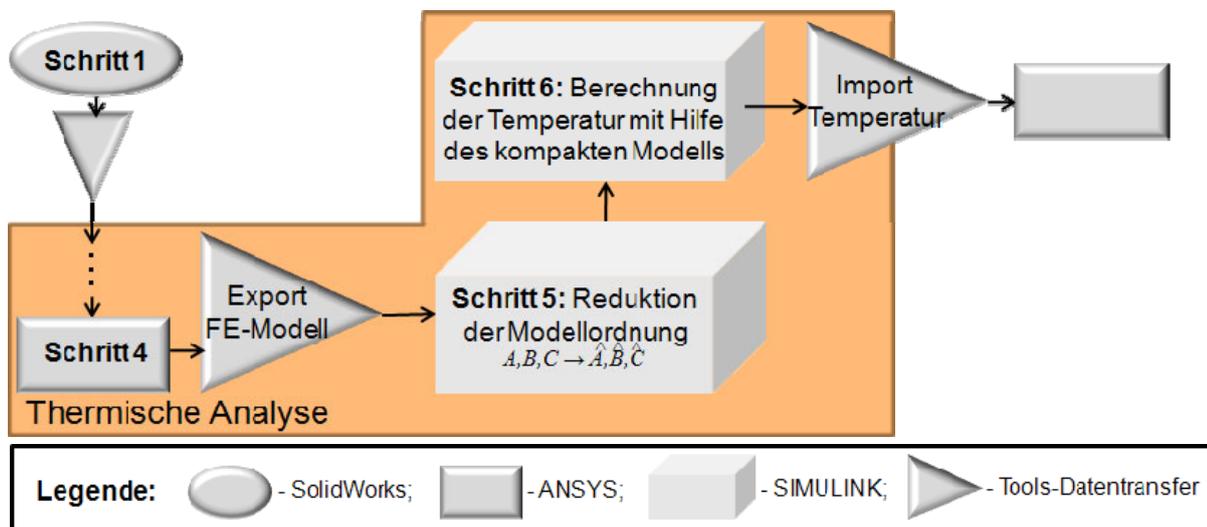


Bild 4: Schema der thermischen Simulation unter Einbeziehung der MOR

In Bild 4 ist in Analogie und Ergänzung zum Schema der konventionellen thermischen Simulation in ANSYS (Bild 2) der erweiterte Lösungsweg unter Einbeziehung der MOR dargestellt. Die ersten Schritte 1-4 beider Schemata sind identisch und werden daher in Bild 4 nur verknüpft dargestellt.

Für den Datentransfer zwischen ANSYS und SIMULINK wurde eine Datenschnittstelle entwickelt. Diese Schnittstelle erlaubt den Export der in ANSYS erstellten Systemmatrizen des thermischen FE-Modells nach SIMULINK und den Import der in SIMULINK berechneten Temperaturfelder zurück nach ANSYS, um dort geometriebezogenen Visualisierungen und weitere – bspw. thermoelastische – Analysen vornehmen zu können.

## 4.3 Modellierung mit Strukturvariabilität

Wie bei der konventionellen Modellierung in ANSYS fordert die Behandlung der Strukturvariabilität auch in Netzwerkmodellen unter Simulink einen besonderen Umgang bei der Steuerung der Bewegung und Kontaktparametrierung. Zur Berücksichtigung dieser Besonderheiten wurden in Simulink selbst definierte Blöcke entwickelt und zu einer eigenständigen Bibliothek „MOR\_WZM\_THM“ zusammengefasst.

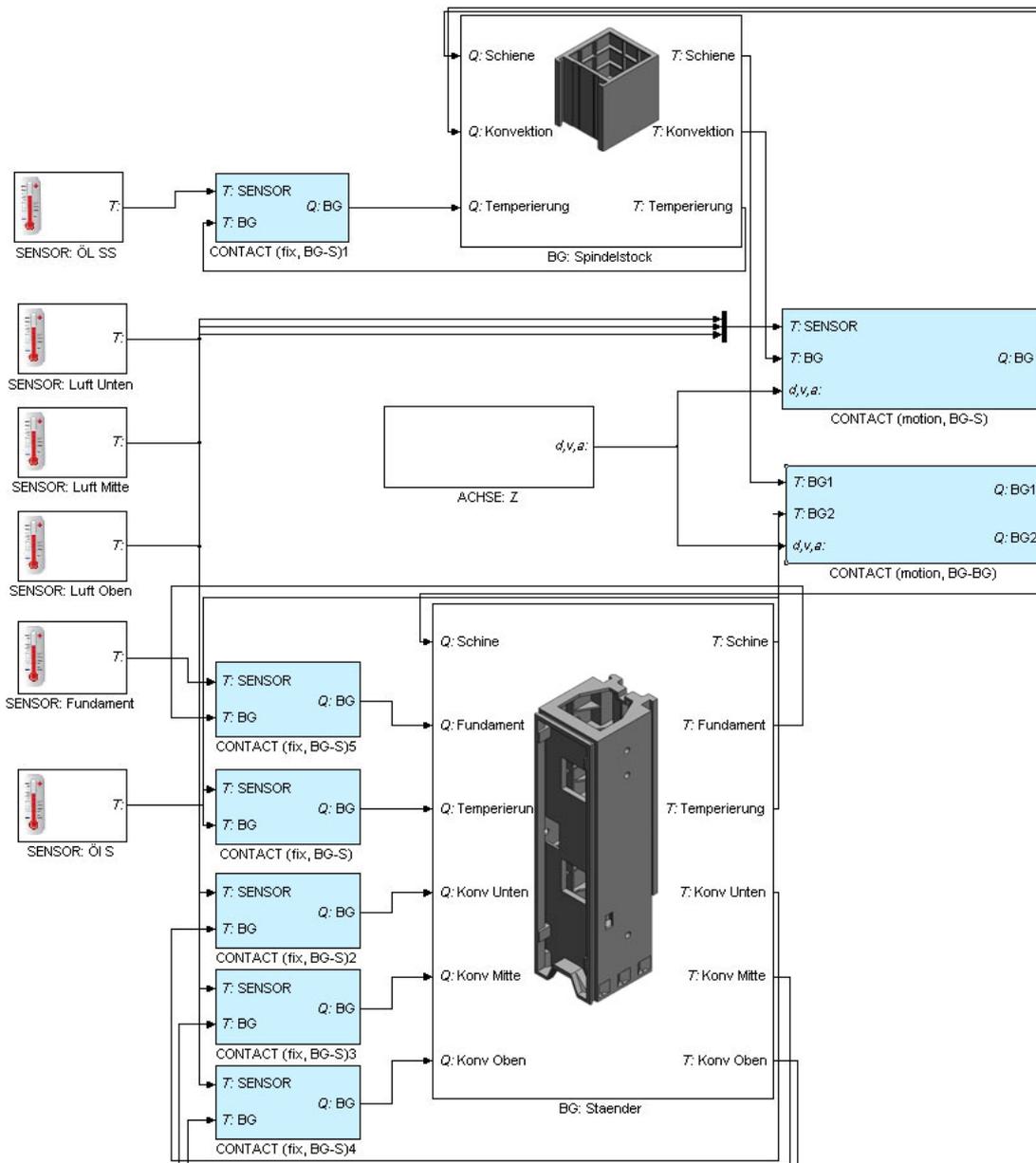


Bild 5: Simulink-Modell der strukturvariablen Ständer-Spindelstock-Teilstruktur

Die Bewegung wird mittels der Blöcke „ACHSE“ gesteuert. Dieser Block gibt zu jeder Zeit  $t$  die aktuellen Werte der Position  $d$ , der Geschwindigkeit  $v$  und der Beschleunigung  $a$  der mit diesem Block assoziierten WZM-Achse aus (vgl. Bild 5).

Die Baugruppen-(BG)-Blöcke, die sich im (beweglichen) Kontakt miteinander befinden, werden über CONTACT-Blöcke miteinander verbunden (vgl. Bild 5). Wie auch im traditionellen ANSYS-Fall wird die aktive Kontaktzone (überdeckte Signale) über die aktuelle geometrische Lage automatisch ermittelt. Auch die Wärmeleitung über den Kontakt erfolgt automatisch (vorausgesetzt der Kontakt-Wärmeübergangsfaktor ist mit  $\alpha > 0$  definiert).

## 5 Verifikation der Ergebnisse

Die Ständer-Teilstruktur mit bewegter Wärmequelle wurde mit Hilfe von ANSYS- und SIMULINK-Modellen thermisch simuliert. Die Belastungsprofile wurden über eine Zeitspanne von 16,5 Std. sowohl örtlich als auch zeitlich sehr variabel gestaltet. Die genaue Beschreibung dieser Profile ist in [2] dokumentiert.

In Bild 6 ist der Temperaturverlauf an 3 Strukturpunkten des Ständers dargestellt.

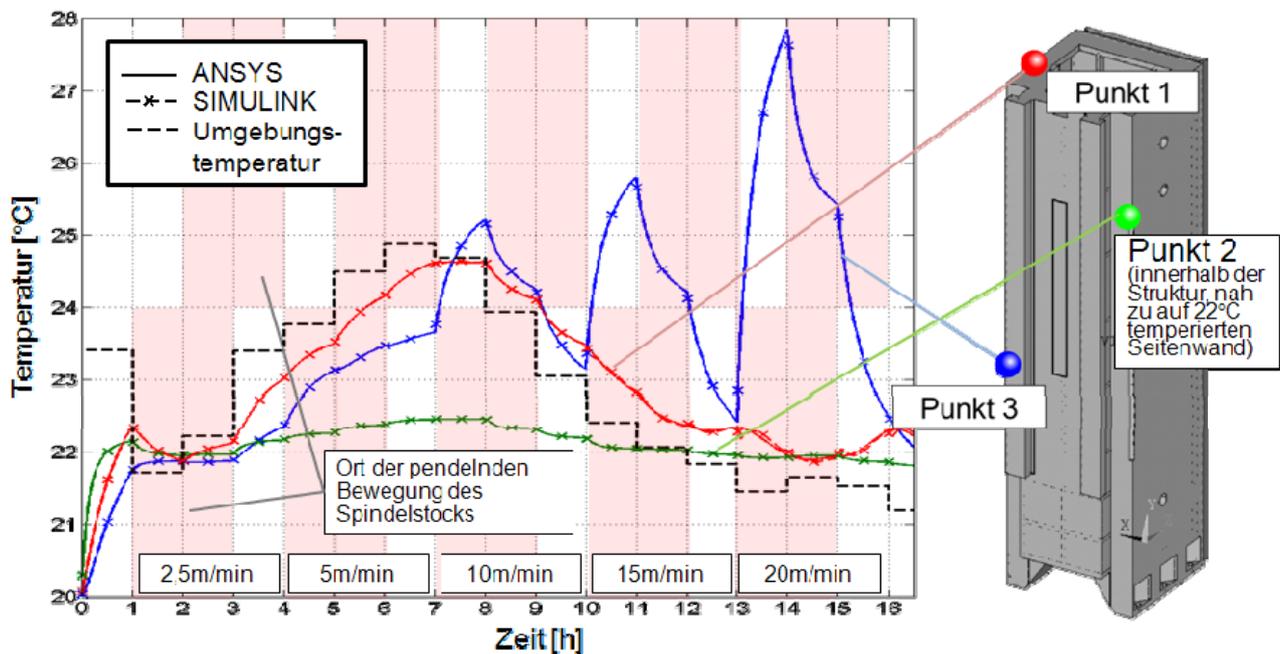


Bild 6: Darstellung und Auswertung des Modellvergleichs

Wie man dem Bild entnehmen kann, unterscheiden sich die Berechnungsergebnisse beider Modelle kaum voneinander.

Die Anzahl der Freiheitsgrade für das ANSYS-Modell liegt bei ca. 25.000 und die Simulationszeit im Stundenbereich. Für das reduzierte Simulink-Modell liegen die Anzahl der Freiheitsgraden bei 115 und die Simulationszeit im Sekundenbereich.

Die offensichtlichen Vorteile der FE-Modellierung bspw. unter ANSYS sind die gute Akzeptanz in konstruktiven Entwicklungsabteilungen, die inzwischen breit eingeführte Anwendung, die Anbindung an CAD-Systeme und das überschaubare, geometriebezogene Postprocessing.

Der wesentliche Vorteil der reduzierten Modellierung bspw. unter Simulink ist die Echtzeitfähigkeit bei dennoch akzeptablem Genauigkeitsverlust.

## 6 Quellen

[1]: Großmann, K.; Galant, A.; Mühl, A.: Effiziente Simulation durch Modellordnungsreduktion. Thermo-elastische Berechnungen von Werkzeugmaschinen-Baugruppen. ZWF 107 (2012) 6, S.457-461

[2]: Großmann, K.; Städel, C.; Galant, A.; Mühl, A.: Berechnung von Temperaturfeldern an Werkzeugmaschinen. Vergleichende Untersuchung alternativer Berechnungsmethoden zur Erzeugung kompakter Modelle. ZWF 107 (2012) 6, S.452-456

Kontakt

A. Galant

Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, TU Dresden

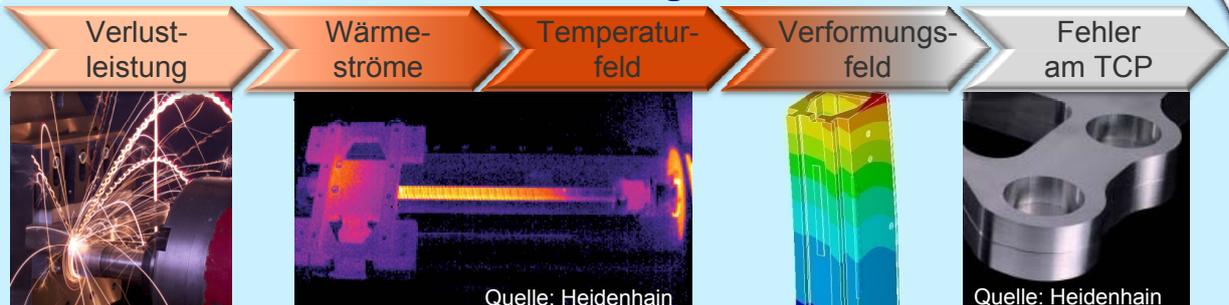
01062 Dresden, Tel.: 0351 / 463 36102, E-Mail.: galant@iwm.mw.tu-dresden.de

# Strukturveränderlichkeit in FEM und Blocksimulation bei der Berechnung von Temperaturfelder

K. Großmann, M. Beitelschmidt, A. Galant, M. Partzsch

## Motivation

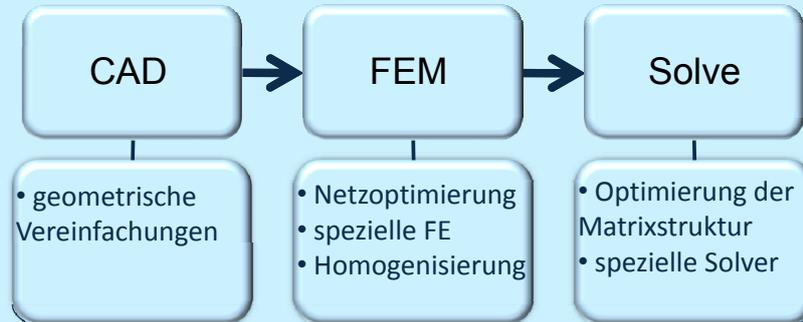
### SFB/Transregio 96



**Thermo-Energetische Gestaltung  
von Werkzeugmaschinen**  
- eine systemische Lösung des Zielkonflikts  
von Energieeinsatz, Genauigkeit und Produktivität

[www.transregio96.de](http://www.transregio96.de)

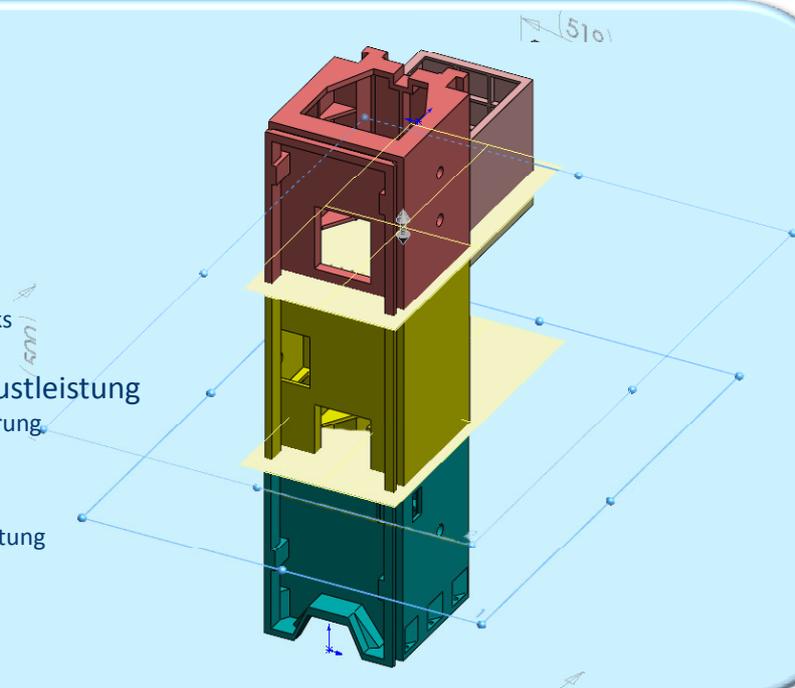
## Kette der konventionellen Modellierung mit FEM



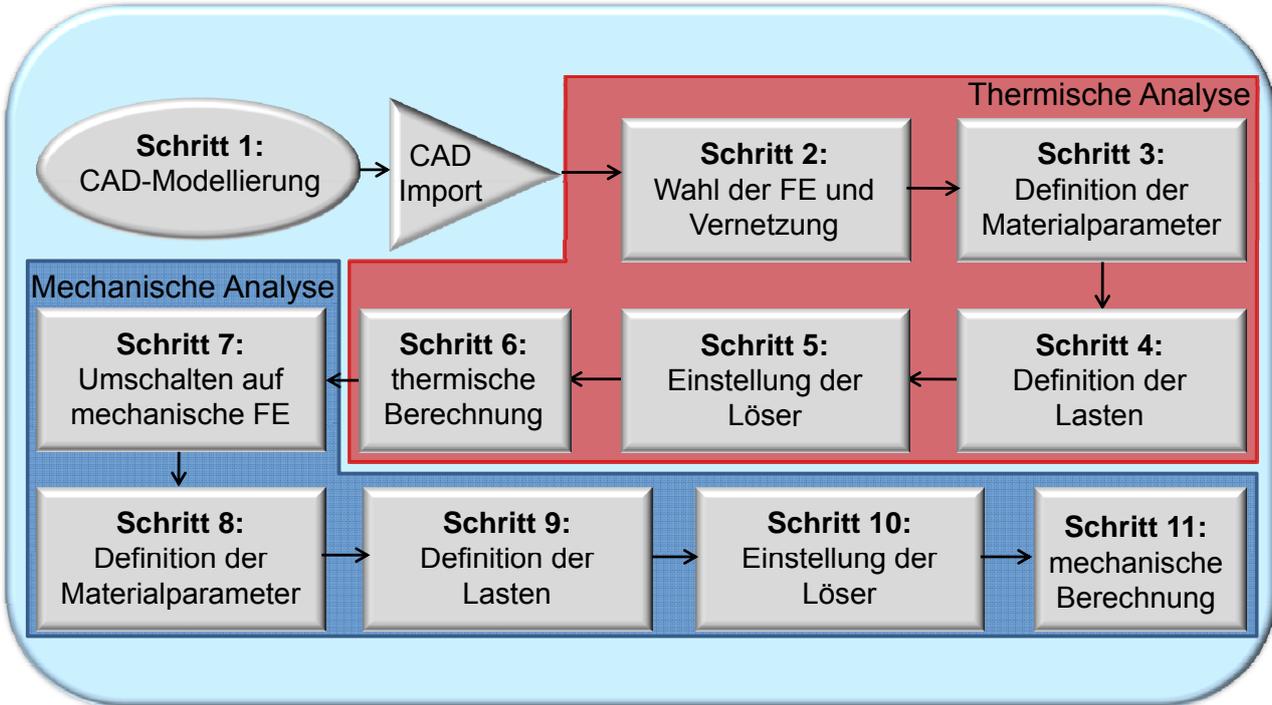
Einige Maßnahmen zu Steigerung der Simulationsgeschwindigkeit

## Test-Beispiel

- CAD und Material:
- Lasteinbringung:
  - Temperierung
    - Aufstellfläche des Ständers
    - Seitenfläche des Ständers
    - Frontfläche des Spindelstocks
  - Wärmefluss durch Verlustleistung
    - Kontaktflächen der Gleitführung
  - Konvektion
    - Modellierung der Luftschichtung

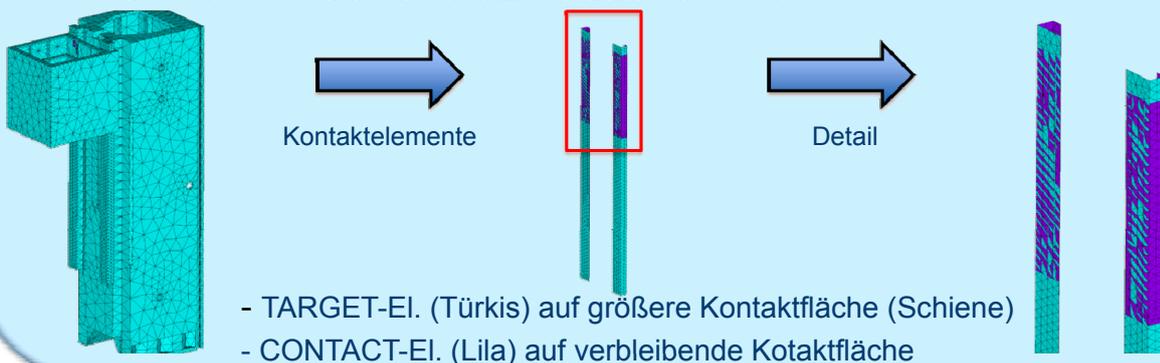


Modellierung in ANSYS ohne Berücksichtigung der Strukturvariabilität



Modellierung in ANSYS mit Berücksichtigung der Strukturvariabilität

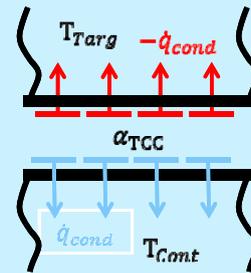
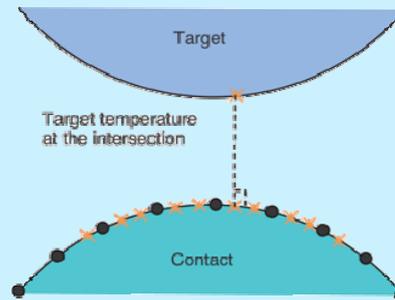
- Definition der Bewegung (Starrkörper) durch Aktualisierung der strukturellen Freiheitsgrade (X,Y,Z-Koordinaten) in jedem Integrationsschritt  
→ zur Berechnung von Temperaturfelder sind thermostrukturelle FE (also Coupled-Field-Elementen) notwendig
- Definition des Kontaktes durch zusätzliche Vernetzung der Kontakt-Oberflächen mit CONTACT- und TARGET-Elementen  
→ dadurch wird die Kontakt-Zone automatisch ermittelt



## Arbeitsweise des ANSYS-Algorithmus für thermischen Kontakt

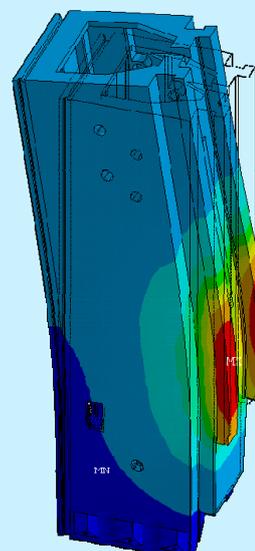
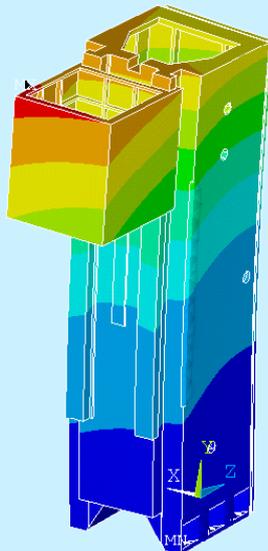
- Unterscheidung der Kontaktflächen  
 → TARGET-Fläche (bzw. Master-Fläche)  
 bringt kontinuierliche Flächengeometrie in Berechnung ein  
 → CONTACT-Fläche (bzw. Slave-Fläche)  
 bringt diskrete Lageinformationen der Integrationspunkte in Berechnung ein
- Automatischer Wärmeaustausch zwischen Kontaktpartnern  
 → Resultierende (positive und negative) Wärmestromdichten als Neumann-RB  

$$\dot{q}_{cond} = \alpha_{TCC} \cdot (T_{Targ} - T_{Cont})$$
- Betrachtung der Kontaktpartner als thermische Einzelsysteme

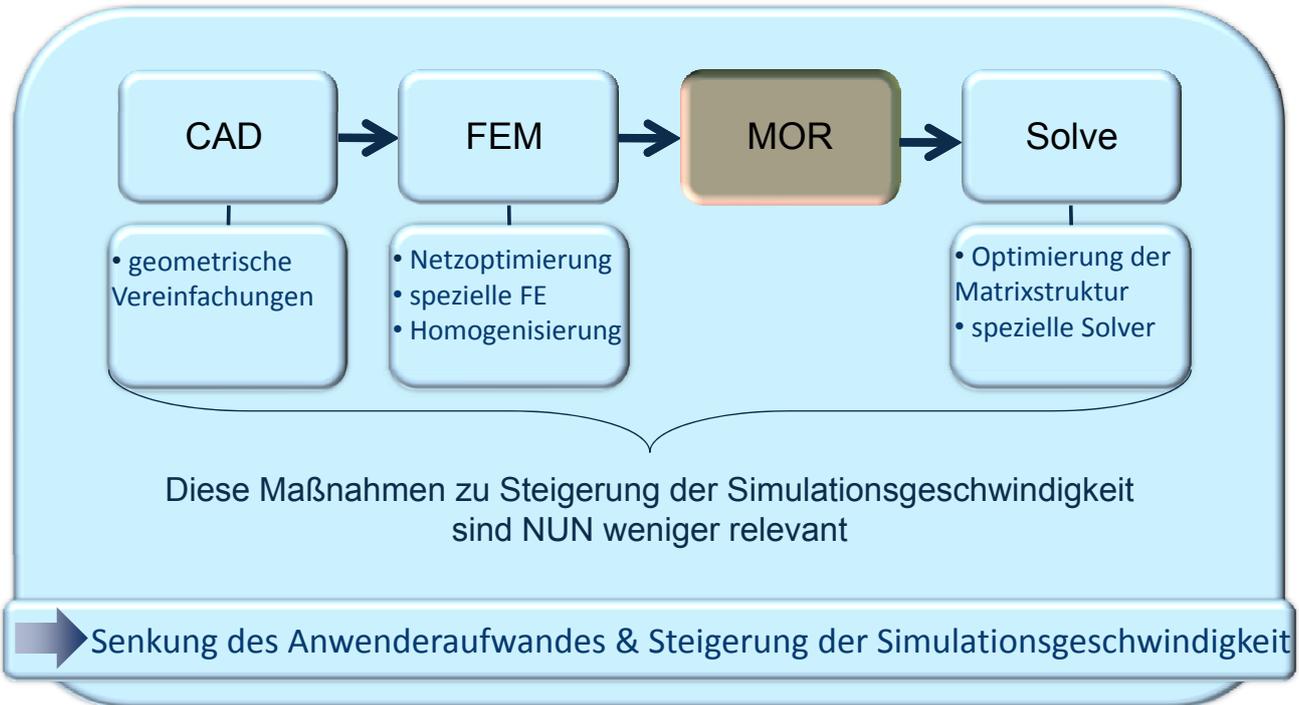


## Postprocessing und weitere Analysen

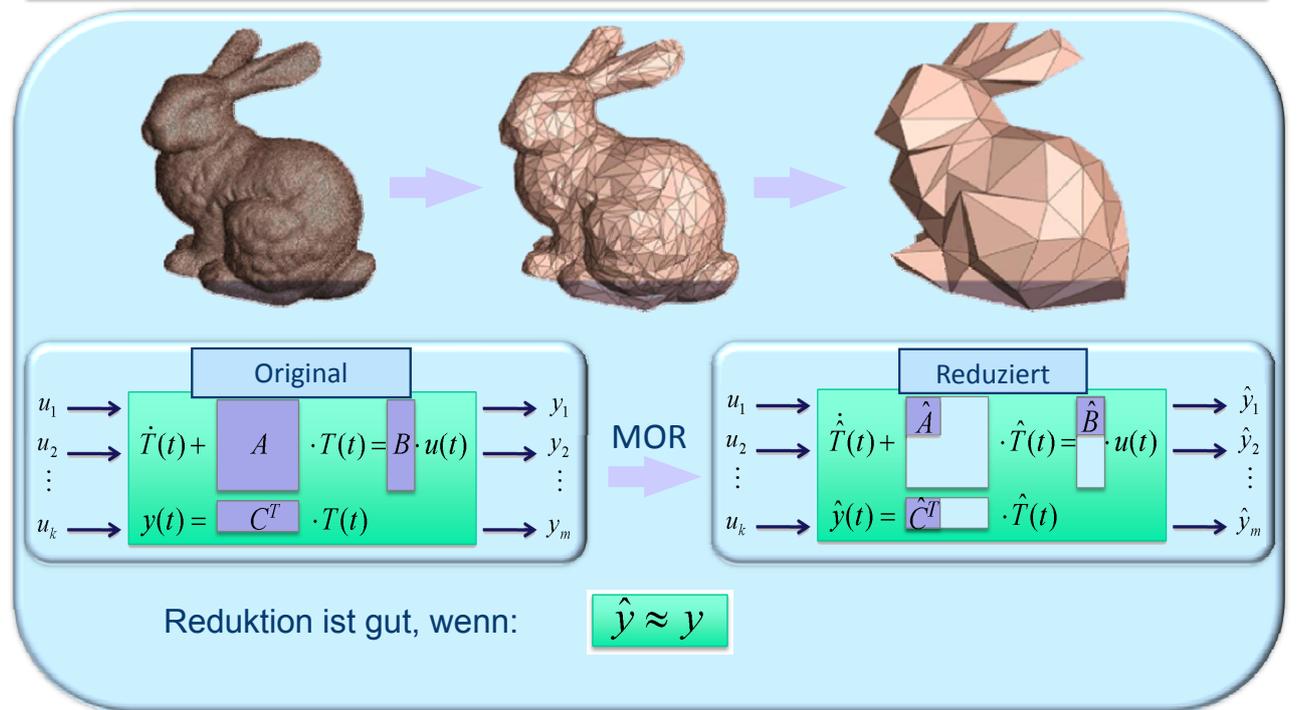
- Bequeme Visualisierung
- Anschließende weitere Untersuchungen (z.B. Strukturanalyse)



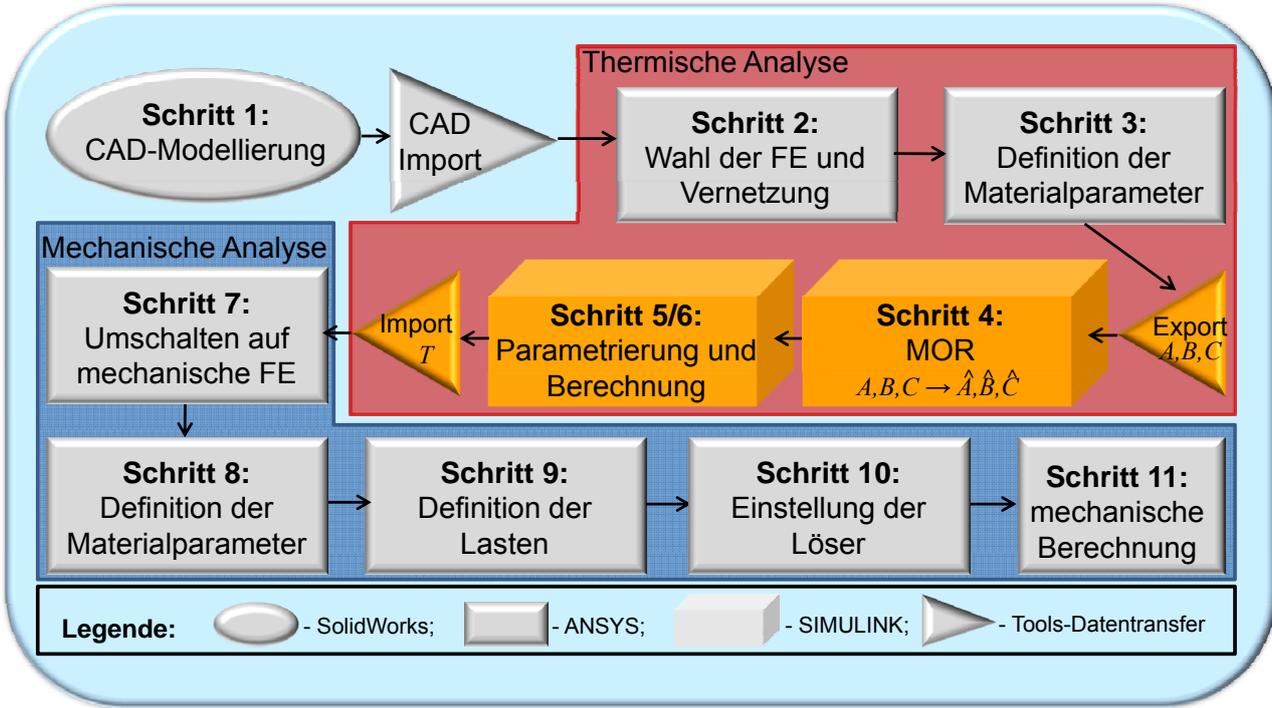
Erweiterung der Tradition durch MOR-Technologie



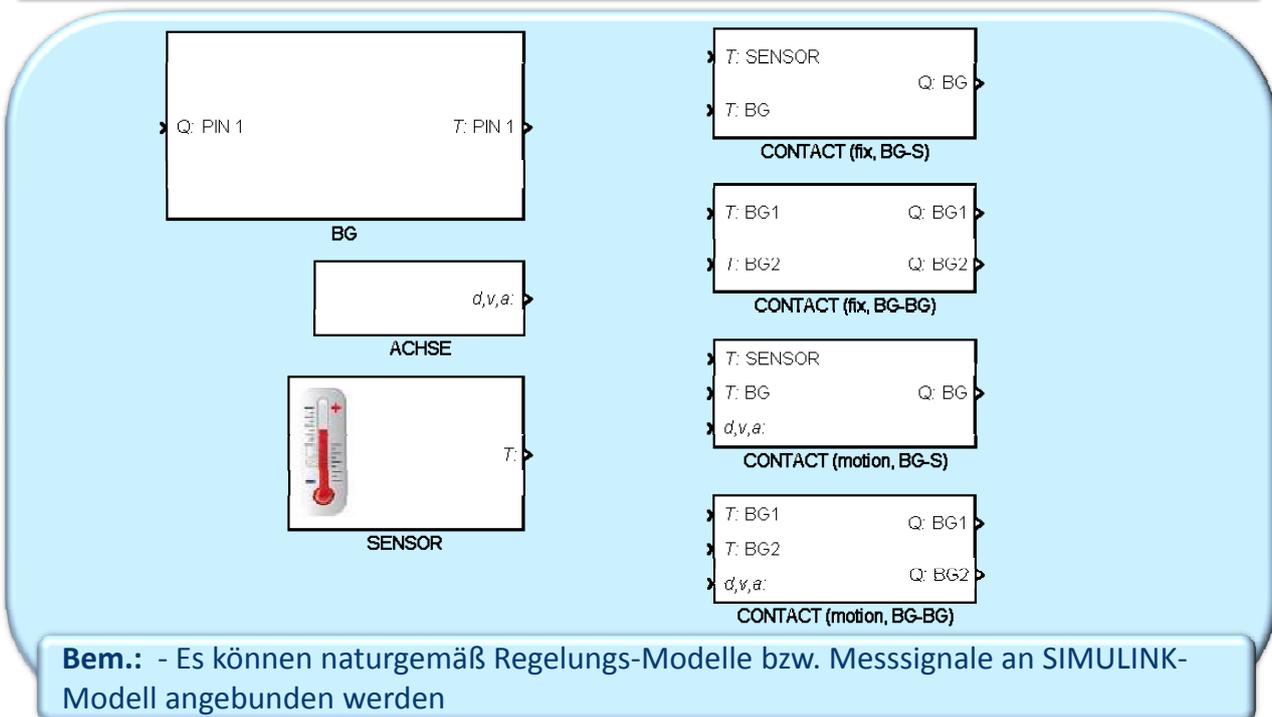
Modellordnungsreduktion-(MOR)-Technologie



Effizienz durch kompakte Modellierung mittels MOR



Eigenentwickelte Simulink-Bibliothek „MOR\_WZM\_THM“



Modellierung in SIMULINK mit Berücksichtigung der Strukturvariabilität

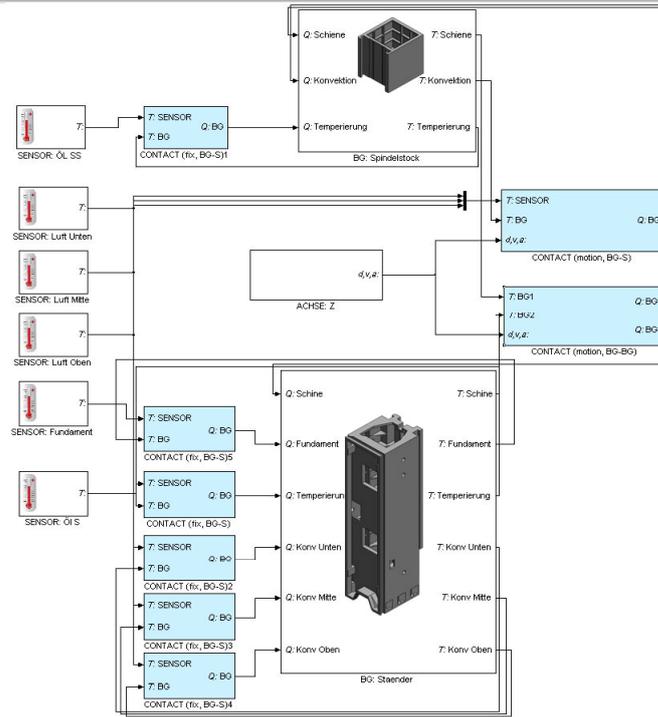
- Die Bewegung wird mittels ACHSE-Blöcke gesteuert  
→ Ausgangssignal: prozessaktuelle Position  $d(t)$ , Geschwindigkeit  $v(t)$  und Beschleunigung  $a(t)$  einer translatorischen Achse
- Die BG-Blöcke im (beweglichen) Kontakt werden über CONTACT-Blöcke miteinander Verbunden  
→ Analog zu ANSYS-Modellierung wird die Kontaktzone automatisch ermittelt  
→ Analog zu ANSYS-Modellierung wird der Wärmeaustausch automatisch organisiert
- Betrachtung der Kontaktpartner als thermische Einzelsysteme



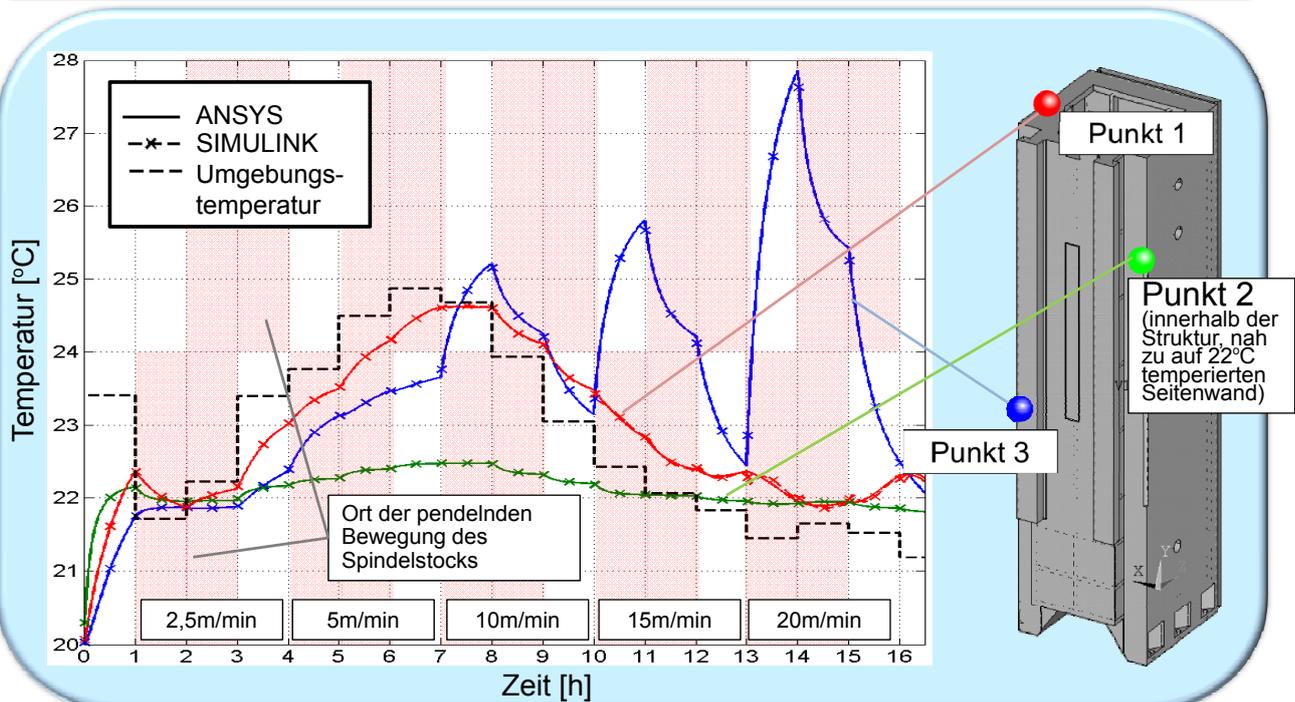
Aufwandsabschätzung der Netzwerk-Modell-Aufbau

	I. BG-Modellierung	II. Geom. Koppelung	III. Kontakte
SolidWorks	CAD CAD	CAD-Gesamt-Model	
ANSYS/WorkBench	FEM FEM	BG-Positionierung Sensor- & Achs-Positionierung	
MATLAB/Simulink	MOR	Generierung der Simulink-Objekten	Verbindung über CONTACT-Objekte in Gesamt-Signalplan
	- Vorarbeit ;	- Manuell ;	- Automatisch

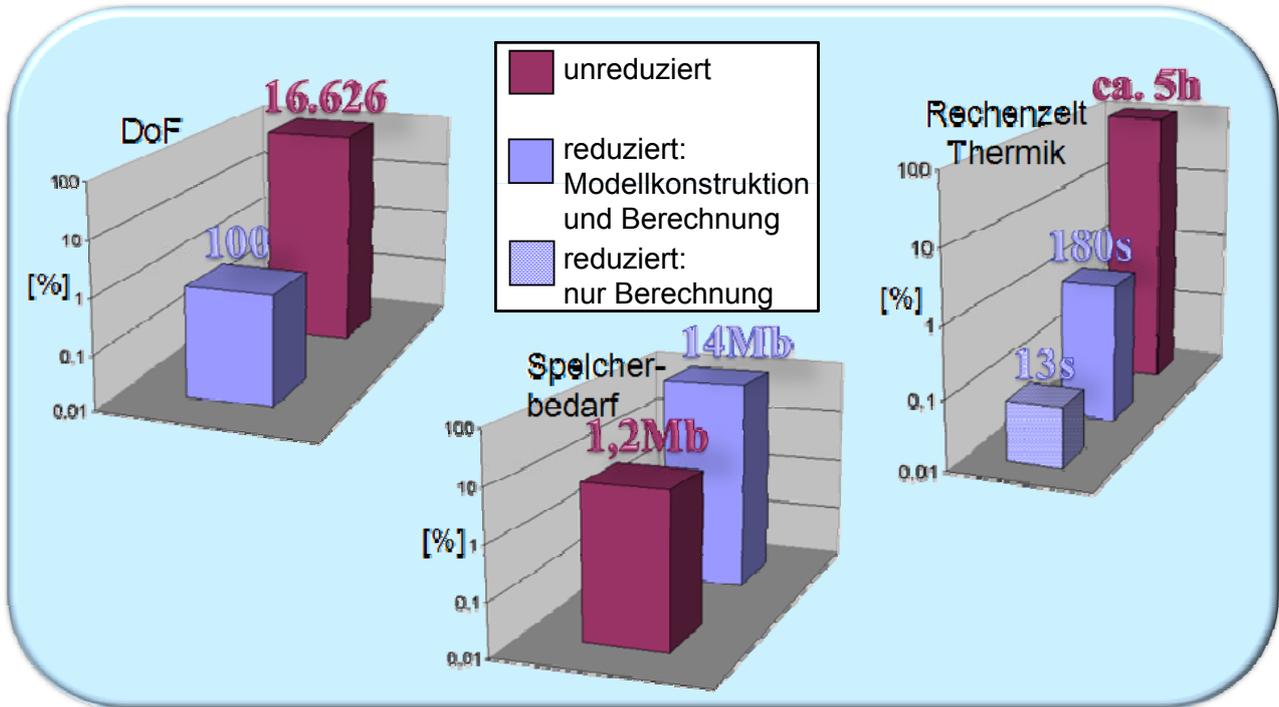
Thermisches SIMULINK-Modell des Ständer-Spindelstock-Teilstruktur



Verifikation des SIMULINK-Modells



Reduziert versus Unreduziert: Aufwandsvergleich



Diese Arbeiten werden mit Mitteln der  
Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert,  
wofür gedankt wird.

SFB/TR 96, Teilprojekt A05  
und  
Teilprojekt B07

**DFG**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

# **Thermografie und Nahbereichs-Fotogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann; Dipl.-Ing. M. Merx

TU Dresden, IWM

# THERMOGRAFIE UND NAHBEREICHS-PHOTOGRAMMETRIE ZUR ERFASSUNG VON TEMPERATUR- UND VERLAGERUNGSFELDERN

Prof. Dr.-Ing. habil. Knut Großmann

Dipl.-Ing. Marcel Merx

Dipl.-Ing. Mirko Riedel

## 1 Motivation und Zielstellung

Mit einer neuartigen Messmethodik soll die Analyse von Werkzeugmaschinen entlang ihrer thermischen Wirkungskette verbessert werden. Bestehende Defizite hinsichtlich:

- des Zeitaufwands für die Vorbereitung und Durchführung von Messungen (bspw. Anbringen und Anschließen von Temperaturfühlern, Aufbau von Messgestängen für die taktile Verlagerungsmessung),
- der begrenzten Strukturauflösung bei der Temperatur- und Verformungsmessung (geringe Anzahl an Messpunkten wegen des hohen Aufwands zur Instrumentierung) sowie
- des fehlenden oder begrenzten Bezugs zwischen steuerungsintern und -extern verfügbaren Messgrößen werden dabei beseitigt.

Im Gegensatz zu den bisher verbreiteten Verfahren zur taktilen Messung von Temperaturen und Verlagerungen bzw. Deformationen werden bei der neuartigen Messmethodik berührungslose photogrammetrische und thermografische Messverfahren genutzt. Die aus der photogrammetrischen Verlagerungs- und Deformationsmessung gewonnene Information über die räumliche Lage der an der Struktur definierten Messpunkte (z.B. aufgeklebte Papiermarken) wird in ein 3D-Modell übertragen und dient als Basis für die thermografische Temperaturmessung. Die der jeweiligen Marke zugeordneten Pixel im Thermobild werden mit dem Modell der optischen Abbildung, unter Kenntnis der relativen Lage von optischer und Thermografiekamera, bestimmt und die Temperaturen ausgelesen. Die steuerungsintern verfügbaren Daten werden ebenfalls aufgezeichnet, mit den außerhalb der Steuerung gewonnenen Messdaten synchronisiert (verteilte Messwert-erfassung) und schließlich zur Auswertung herangezogen.

Die neuartige Messmethodik soll im Rahmen des SFB/TR96 „Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“ im Teilprojekt C06 an einem spezifischen Versuchsträger in Leichtbauweise evaluiert werden. Der Versuchsträger ist mit impuls kompensierten Achsen im Kreuzschlitten (eisenlose Lineardirektantriebe für die X- und Y-Richtung) ausgerüstet und realisiert durch Parallelantriebe in Y- und Z-Richtung eine Korrekturfunktionalität (Winkelkorrekturen um  $\varphi_X$ ,  $\varphi_Y$ ,  $\varphi_Z$ ).

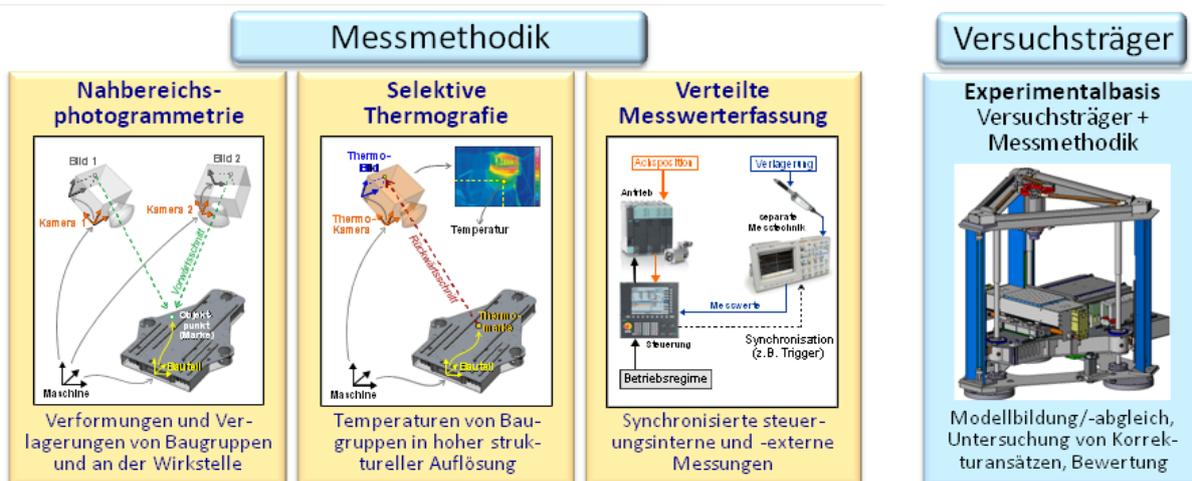


Bild 1 - Säulen der Messmethodik sowie Versuchsträger als Experimentalbasis

## 2 Grundlagen

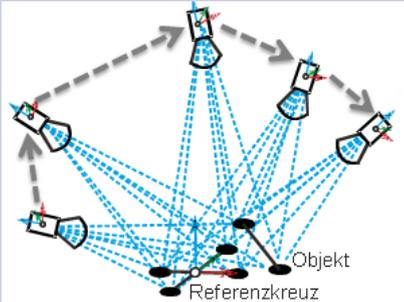
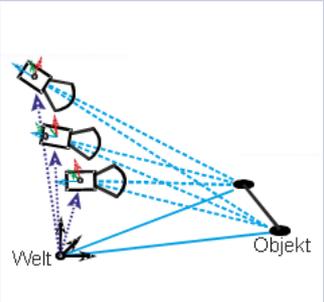
### 2.1 Nahbereichs-Photogrammetrie

Die Photogrammetrie ist ein optisches Messverfahren zur Bestimmung der räumlichen Koordinaten definierter Messpunkte. Ursprünglich gebräuchlich in der Geodäsie, findet die photogrammetrische dimensionale Messtechnik zunehmend Anwendung im Maschinenbau [Luh10].

Grundlage der photogrammetrischen Auswertung eines Bildsatzes ist die Bildmessung. Durch geeignete Operatoren werden die Messpunkte im Bild erfasst und ihre Bildkoordinaten (zweidimensional) bestimmt. Mittels eines Messmodells, welches sich auf die geometrische Optik, erweitert um den Einfluss von Abbildungsfehlern (bspw. Verzeichnung des Kameraobjektivs), zurückführen lässt, werden die räumlichen Koordinaten der Messpunkte bestimmt. Das der Berechnung der 3D-Koordinaten zu Grunde liegende Gleichungssystem ist dabei meist stark überbestimmt, was statistische Aussagen zur Messunsicherheit erlaubt.

In Tabelle 1 sind zwei typische photogrammetrische Messkonfigurationen vergleichend dargestellt. Die Stereobildauswertung wird häufig für die Analyse dynamischer Vorgänge (bspw. Crash-Tests) verwendet. Dazu ist das Kamerasystem meist vorkalibriert, d. h. die relative Lage und Orientierung (relative Orientierung) der Kameras zueinander sind bekannt. Bei der Bündeltriangulation wird i. d. R. ein einzelner, handgeführter Sensor (Kamera) verwendet, um eine Vielzahl von Einzelbildern (Bildverband) eines als unveränderlich angenommenen Objektzustandes (Epoche) aufzunehmen. Durch den Einsatz codierter Marken, die automatisch im Bild zugeordnet werden können, können die Einzelbilder „aneinander“ gereiht werden. Damit ist es, bei hinreichender Überlappung der Einzelbilder, möglich, um das Messobjekt herum zu gehen und großvolumige Teile zu erfassen. Meist wird das Bezugs-Koordinatensystem durch ein Referenzkreuz definiert und die Messung mit Maßstäben bekannter Länge skaliert. Soweit es das Messmodell erlaubt, können unterschiedliche Messkonfigurationen (bewegte und/oder stationäre Kameras oder Kameraverbunde, vorkalibrierte oder selbstkalibrierende Systeme usw.) für die photogrammetrische dimensionale Messung verwendet werden. Damit ist das Verfahren optimal auf die jeweilige Messaufgabe anpassbar.

Tabelle 1 - Photogrammetrie-Systeme (Stand der Technik; \* - Aicon; \*\* - Nikon Metris K600)

	Bündeltriangulation	Stereobildauswertung
<b>Prinzipskizze</b>		
<b>Kameraanzahl</b>	1 (meist)	2 - 3
<b>Blickfeld</b>	variabel	variabel oder fest
<b>Bilder / Epoche</b>	10 - 100	1 pro Kamera
<b>max. Anzahl d. Epochen</b>	wenige	viele
<b>Kalibrierung</b>	Selbstkalibrierung	separater Kalibrierschritt / vorkalibriert
<b>Messunsicherheit</b>	$\pm 2 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$ (RMS)* $\pm 3 \mu\text{m} + 7 \mu\text{m}/\text{m}$ (3 Sigma)*	$\pm 20 \mu\text{m}$ ( $1\text{m}^3$ , konfigurationsabhängig) * bis zu $\pm 90 \mu\text{m}$ ( $17\text{m}^3$ , Entfernung 6m) **

## 2.2 Thermografie

Die thermografische Temperaturmessung gewinnt dank der Entwicklung zunehmend hochauflösender und immer preisgünstigerer Wärmebildkameras (meist Mikrobolemeter) zunehmend an Bedeutung.

Bei der thermografischen Temperaturmessung muss beachtet werden, dass die Objekttemperatur  $T$  aus der vom Objekt ausgesandten Strahlleistungsdichte  $L$  berechnet wird. Für die temperaturabhängige Strahlleistungsdichte gilt  $L(T) \approx T^4$ , was einen stark nichtlinearen Zusammenhang darstellt. Abhängig von den Werkstoffeigenschaften und der Oberflächenbeschaffenheit weisen Körper ein spezifisches Verhalten im Bereich der Wärmestrahlung (allgemeiner im Bereich der elektromagnetischen Strahlung) auf [OPT12]. Man unterscheidet die Körper in die folgend dargestellten Kategorien.

- Der schwarze Strahler emittiert eine typische temperaturabhängige Strahlleistungsdichte, welche nach dem Planckschen Strahlungsgesetz berechnet werden kann.
- Der graue Strahler emittiert bei gleicher Temperatur weniger Strahlung als der schwarze Strahler. Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  gibt das Verhältnis der vom grauen Strahler emittierten Strahlleistungsdichte gegenüber der des schwarzen Strahlers an. Es gilt immer  $\varepsilon < 1$ .
- Der selektive Strahler emittiert eine spezifisch von der Wellenlänge abhängige Strahlleistungsdichte. Sein Emissionsgrad  $\varepsilon$  ist von der Wellenlänge abhängig ( $\varepsilon(\lambda)$ ).

Neben der vom Körper selbst emittierten Strahlung müssen auch Reflexion und Transmission berücksichtigt werden. Dabei gilt  $\varepsilon + \rho + \tau = 1$ . Der Reflexionsgrad  $\rho$  gibt an, welcher Anteil der auftreffenden Strahlung vom Körper reflektiert wird. Der Transmissionsgrad  $\tau$  gibt an, welcher Anteil der Strahlung durch den Körper hindurch gelassen wird.

Für eine korrekte thermografische Temperaturmessung müssen demnach die Eigenschaften des Körpers ebenso wie das Strahlungsverhalten der Umgebung des Körpers (Strahlungshintergrund) bekannt sein. Besonders kritisch ist die thermografische Temperaturmessung damit auf Metalloberflächen, da diese meist geringe Emissionsgrade  $\varepsilon$  und entsprechende hohe Reflexionsgrade  $\rho$  aufweisen (keine Transmission). Durch eine Beschichtung der Oberflächen kann die thermografische Temperaturmessung vereinfacht und die Messunsicherheit verringert werden. Als Beschichtung sind bspw. spezielle Lacke (meist  $\varepsilon > 0,95$ ) oder selbstklebendes Papier bzw. Kunststoff (meist  $\varepsilon > 0,90$ ) gebräuchlich. Bei großen Objekten ist die Beeinflussung durch die in einem kleinen Bereich (selektiv) aufgebraute Beschichtung vernachlässigbar. Bei hinreichend großem Emissionsgrad der Beschichtung kann der Einfluss der Hintergrundstrahlung ggf. vollständig vernachlässigt werden.

## 3 Selektive Thermografie

### 3.1 Synthese von Photogrammetrie und Thermografie in einem erweiterten Messmodell

Die thermografische Temperaturmessung an stationären Objekten mit definierten Umgebungsbedingungen ist mit der verfügbaren Messtechnik hinreichend genau realisierbar. Ggf. örtlich abweichende Emissions- und Transmissionseigenschaften können durch die Software-Systeme berücksichtigt und die Temperatureingabe entsprechend korrigiert werden. Problematisch ist weiterhin die thermografische Temperaturmessung an bewegten Objekten, da sich die am Objekt definierten Temperaturmesspunkte durch das Bild bewegen und ggf. Abschattungen und Reflexionen auftreten.

Die „Selektive Thermografie“ kombiniert die Vorteile der berührungslosen thermografischen Temperaturmessung mit der Möglichkeit, räumliche Koordinaten definierter Punkte mittels photogrammetrischer Messmethoden ermitteln zu können. Als Temperaturmesspunkte oder Bezugspunkte für die Temperaturmessung dienen fortan auf der Objekt Oberfläche applizierte und photogrammetrisch erfassbare Signalisierungen (Marken). Diese werden von einer im sichtbaren Spektralbereich arbeitenden (optischen) Kamera aufgenommen. Mittels photogrammetrischer

Methoden (vgl. 2.1) und über ein erweitertes Messmodell, welches bewegte Objekte (Körper und/oder Kameras) vorsieht, werden die Koordinaten der Messpunkte im Raum bestimmt (siehe Bild 2). Ist im erweiterten Messmodell eine Thermografiekamera mit bekannter relativer Lage im Bezug zur optischen Kamera integriert, können den Marken auf der Objektoberfläche die Pixel im Bild der Thermografiekamera zugeordnet werden. Diese Zuordnung kann auch bei bewegten Objekten oder Kameras aufrecht erhalten werden. Die Temperatur der zugeordneten Pixel wird aus dem Wärmebild ausgelesen und ggf. korrigiert. Bspw. kann die Korrektur des winkelabhängigen Emissionsverhaltens der Marke erfolgen.

Der selektiven Thermografie ähnliche Verfahren wurden auch in [STS02] vor dem Hintergrund medizinischer Anwendungen sowie in [LUH10] bspw. auch für Werkzeugmaschinen vorgestellt.

### Ablauf der Messung:

1. 3D-Koordinaten der Messpunkte bzw. Messbereiche bestimmen
2. Zuordnung der Pixel im Thermobild
3. Auslesen und Korrigieren (bspw.  $\varepsilon(\varphi)$ ) der thermografisch gemessenen Temperaturen

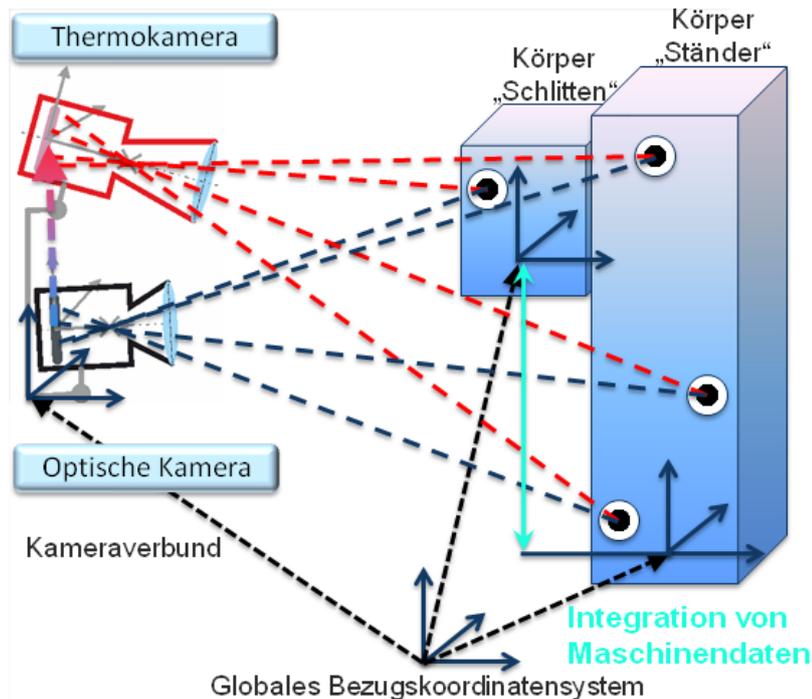


Bild 2- Funktionsprinzip der selektiven Thermografie (Beispiel: handgeführter Kameraverbund)

Das erweiterte Messmodell kann auch für die Messung von Deformation und Verlagerung genutzt werden. In Verbindung mit der selektiven Thermografie können damit Deformation bzw. Verlagerung und Temperatur an den vordefinierten Messpunkten kollokiert und synchron bestimmt werden. Das Messmodell ermöglicht es dank der Unterscheidung in einzelne Objekte, externe Daten zu integrieren (bspw. Achsposition einer Vorschubachse) und damit die Genauigkeit der Messung weiter zu steigern.

### 3.2 Voraussetzungen für die Kalibrierung

Voraussetzung für die selektiv thermografische Temperaturmessung ist die Kalibrierung des aus optischer und Thermografiekamera bestehenden Kameraverbundes. Dazu muss ein Kalibriernormal geschaffen werden, welches sowohl im optischen als auch im Thermobild sichtbare Referenzpunkte realisiert. Diese Referenzpunkte müssen eine vordefinierte relative Lage haben oder idealerweise identisch sein.

Als geeignete Referenzpunkte haben sich kreisrunde schwarze Papiermarken (kombinierte Marken), welche auf einer blanken Aluminiumplatte aufgeklebt werden, erwiesen. Im optischen ist der Kontrast zwischen der walzblanken Aluminiumoberfläche und der schwarzen Marke ausreichend. Um im Thermobild ausreichenden Kontrast zu erhalten, wird die Aluminiumplatte zusätzlich beheizt. Das blanke Aluminium ( $\varepsilon \downarrow$ ) reflektiert überwiegend den kalten Strahlungshintergrund, während die Papiermarke ( $\varepsilon \uparrow$ ) eine deutlich höhere Strahlleistungsdichte emittiert. Es entsteht ausreichend guter Kontrast.

### 3.3 Kalibrierung an einem erweiterten Kalibrierfeld

Die Kalibrierung des Kameraverbundes erfolgt an einem um kombinierte Marken erweiterten Kalibrierfeld für die Photogrammetrie (Bild 3 links).

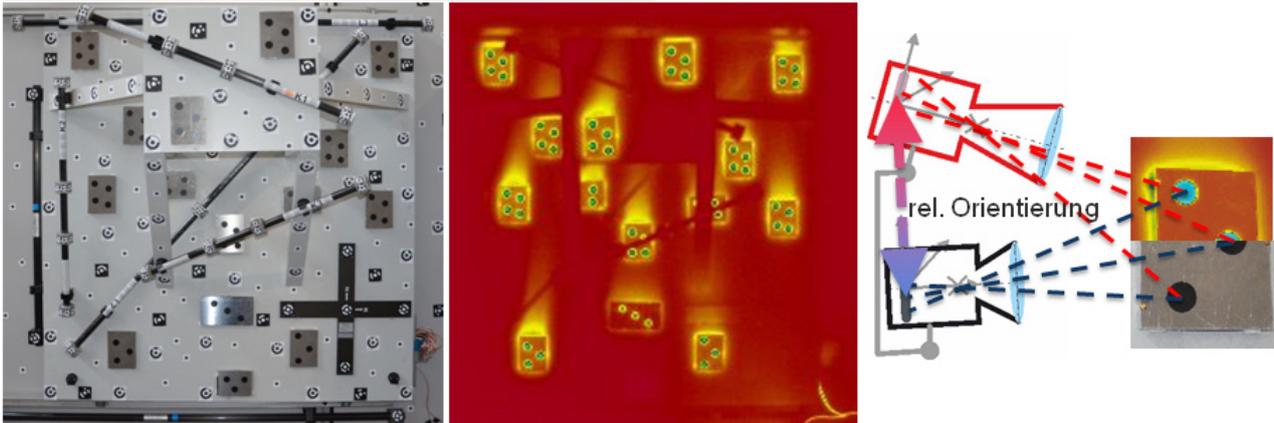


Bild 3 - Erweitertes Kalibrierfeld (links: optisch; Mitte: thermografisch; rechts: Kalibrierung)

Mit dem Kameraverbund aus optischer und Thermografiekamera werden Aufnahmen des erweiterten Kalibrierfeldes aus einer ausreichenden Anzahl von Perspektiven gemacht. Die kombinierten optischen und thermografischen Marken werden im erweiterten Messmodell als kolloziert betrachtet und über eine Ausgleichsrechnung die genauigkeitsrelevanten Kameraparameter (bspw. Verzeichnung) sowie die relative Orientierung der Kameras zueinander bestimmt (Bild 3 rechts).

## 4 Thermografische Temperaturmessung

### 4.1 Grundlagenuntersuchungen

Die Grundlagenuntersuchungen wurden an einem definiert beheizbaren Probekörper durchgeführt. Dieser bildet den für spanende und (kalt-) umformende Werkzeugmaschinen typischen Temperaturbereich von ca. 20 ... 100 °C ab. Außerdem können unterschiedliche Materialproben auf dem Probekörper aufgenommen und untersucht werden. Für die Grundlagenuntersuchungen wurde ein Kameraverbund, bestehend aus einer digitalen Spiegelreflexkamera und einer Wärmebildkamera eingesetzt.

Mit dem Probekörper wurden Vorversuche:

- zur Winkelabhängigkeit des Emissionsverhaltens von passiven Marken (bspw. Papiermarken, Magnetfolie usw.),
- zur Charakterisierung des Emissions- und Reflexionsverhaltens der am Versuchsträger (vgl. Bild 1 rechts) vorliegenden Werkstoffe und Oberflächenbeschaffenheiten,
- zur Sichtbarkeit aktiver (bspw. beheizter) Marken im Thermobild und
- zur genauen Charakterisierung des winkel- und temperaturabhängigen Emissionsverhaltens einer ausgesuchten Papiersorte (siehe 4.2)

durchgeführt.

### 4.2 Exemplarische Charakterisierung einer Papiermarke

Für eine beispielhaft ausgewählte Papiersorte konnte der winkel- und temperaturabhängige Temperaturkoeffizient ( $K_T = T_{Bild}/T_{taktel}$ ) bestimmt werden. Dabei zeigt sich eine Temperaturabhängigkeit. Mit steigender Temperatur steigt auch der Temperaturkoeffizient geringfügig an. Zudem besteht eine Winkelabhängigkeit. Bis zu einem Winkel von ca. 55° ist der Temperaturkoeffizient konstant und fällt danach deutlich ab.

## 5 Photogrammetrische Verlagerungsmessung

Eine Photogrammetrische Verlagerungsmessung wurde beispielhaft an einem Werkzeugmaschinenständer durchgeführt. Mit der Überblicksmessung mit einer hochauflösenden Kamera kann das zweidimensionale Deformationsfeld der Ständer-Seitenwand mit begrenzter Genauigkeit und Auflösung (ca. 0,3 mm/Pixel) erfasst werden (Bild 4). Die Minimalmessung (punktuelle Messung mit begrenztem Sichtfeld) ist für die Messaufgabe „Verlagerung am oberen Ende des Ständers“ optimiert. Mit einer niedrig auflösenden Kamera wird eine etwa doppelt so hohe Auflösung der Verlagerungsmessung (ca. 0,15 mm/Pixel) erreicht (Bild 4). Die Ergebnisse der Messungen dienen später dem Vergleich mit einem FE-Modell des Ständers.

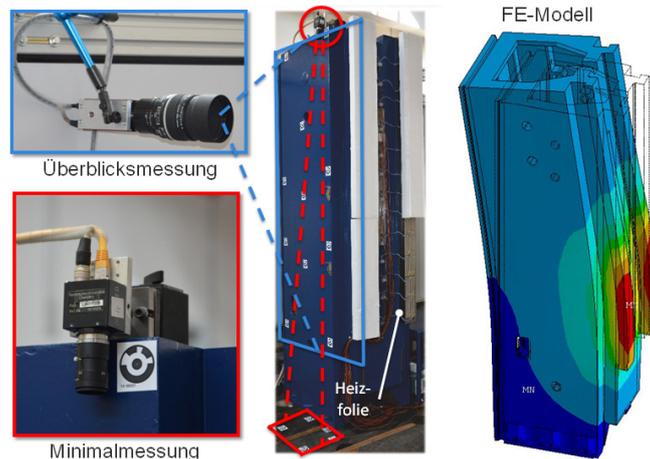


Bild 4 – Verlagerungsmessung am Beispiel eines Werkzeugmaschinenständers und FE-Modell (deformiert mit Temperaturfeld)

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die selektive Thermografie in Verbindung mit der verteilten Messwerterfassung und der photogrammetrischen Deformations- und Verlagerungsmessung bietet ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung der Analyse von Werkzeugmaschinen entlang ihrer thermoelastischen Wirkungskette. Damit wird der Abgleich von Simulationsmodellen signifikant vereinfacht und verbessert.

Zukünftig wird das Messverfahren selektive Thermografie in einer benutzerfreundlichen Software implementiert. Die Grundlagenuntersuchungen werden fortgesetzt und die Ergebnisse für die Optimierung des Verfahrens (bspw. die Berücksichtigung winkelabhängiger Temperaturkoeffizienten) herangezogen. Schließlich werden die selektive Thermografie, die photogrammetrische Deformations- und Verlagerungsmessung am Versuchsträger (Bild 1) implementiert und für Modellabgleich und Korrektur eingesetzt.

## 7 Quellen

- [Luh10] Luhmann, T.; Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen; Wichmann; Berlin; 2010.
- [LUH10] Leibniz Universität Hannover (Anmelder); Acker W.; Denkena B., Möhring H.-C. (Erfinder); Berührungslose Erfassungseinrichtung; Patentschrift; Offenlegungstag 30.12.2010; Tag der Patenterteilung 03.02.2011.
- [OPT12] N.N.; Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung; Firmenschrift Optris GmbH; 2012.
- [STS02] Thor Smith, S.; Modelling Hot Bodies: Combined real-time 3D and Thermal Imaging for Medical Applications; 3D-MATIC department, Glasgow University; 2002.

# Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern

*Ergebnisse aus dem Teilprojekt C06*

*im SFB/TR96 „Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“*

*Prof. Dr.-Ing. habil. Knut Großmann*

*Dipl.-Ing. Marcel Merx*

*Dipl.-Ing. Mirko Riedel*

*IWM - TU Dresden*

Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern 1

## Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern

### Gliederung

#### **1 Motivation und Zielstellung**

#### **2 Grundlagen**

- 2.1 Nahbereichs-Photogrammetrie
- 2.2 Thermografie

#### **3 Selektive Thermografie**

- 3.1 Synthese von Photogrammetrie und Thermografie im 3D-Messmodell
- 3.2 Voraussetzungen für die Kalibrierung
- 3.3 Erweitertes Kalibrierfeld und Ablauf der Kalibrierung
- 3.4 Kalibrierfeld als 3D-Modell

#### **4 Thermografische Temperaturmessung**

- 4.1 Versuchsaufbau
- 4.2 Grundlagenuntersuchungen
- 4.3 Charakterisierung der Papiermarken

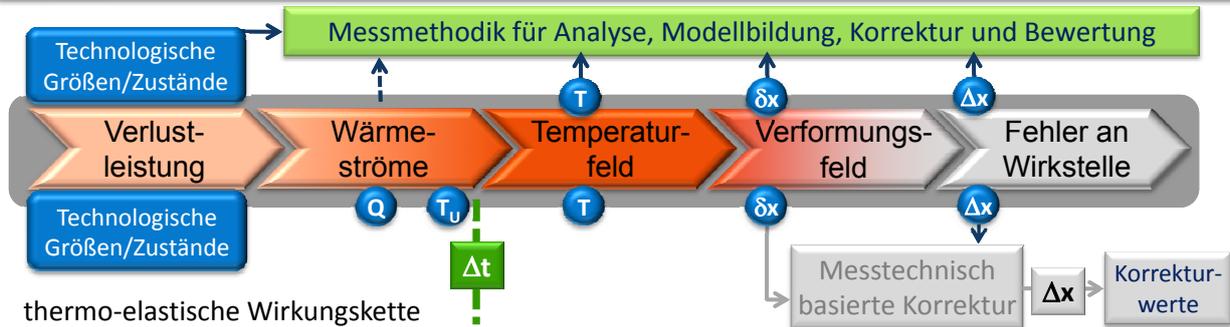
#### **5 Photogrammetrische Verlagerungsmessung**

#### **6 Zusammenfassung und Ausblick**

Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern 2

## 1 Motivation und Zielstellung

**Teilprojekt C06:** „Messtechnische Erfassung von verhaltens- und betriebszustandsrelevanten Größen entlang der thermischen Wirkungskette für Analyse, Bewertung, Simulation und Korrektur (...)“



### gegenwärtige Hauptdefizite

- erheblicher Zeitaufwand zur Instrumentierung & Messung von  $\delta x$ ,  $\Delta x$ ,  $T$
- begrenzte strukturelle Auflösung
- fehlender Bezug zwischen steuerungs-internen und externen Messgrößen
- geringe Steuerungsunterstützung

### Zielstellungen

- Beseitigung der Hauptdefizite durch berührungslose kollokierte Verformungs- & Temperaturmessung
- **verbesserte Ursache-Wirkungs-Analyse ( $T \rightarrow \delta x$  bzw.  $\Delta x$ )**
- **spezifische, optimierte, messtechn. basierte Korrekturansätze**

Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern 3

## 1 Motivation und Zielstellung

### Versuchsträger MAX

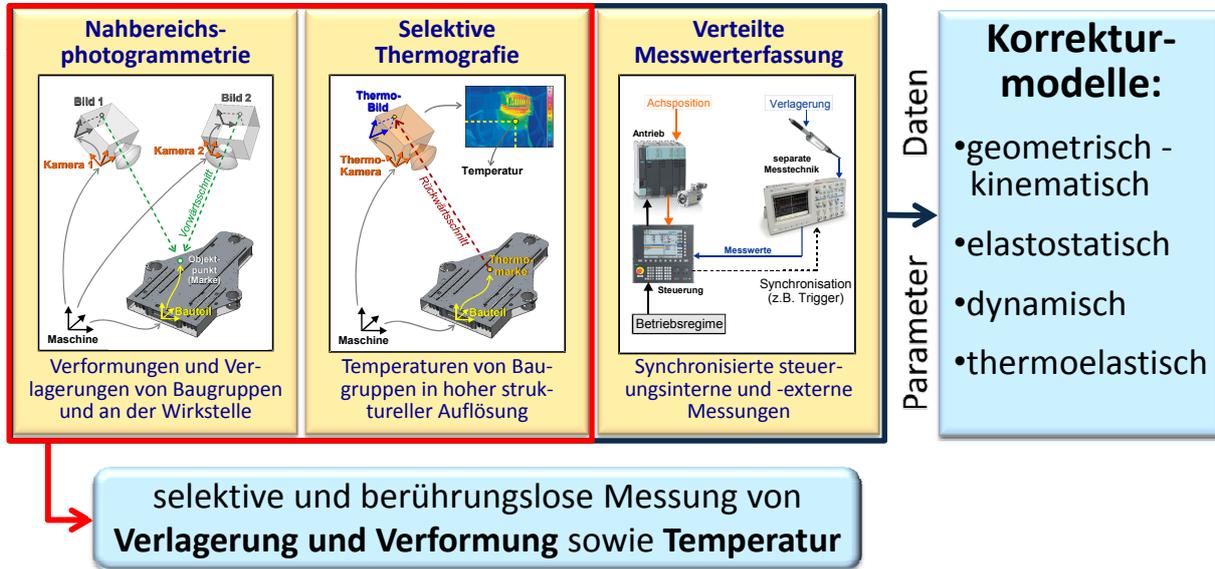


Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern 4

# 1 Motivation und Zielstellung

## Messmethodik

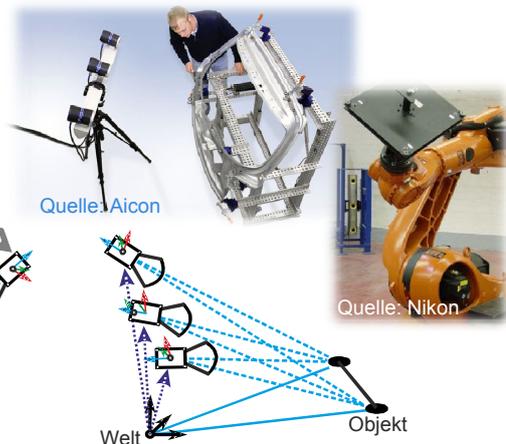
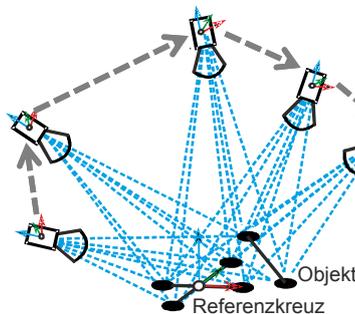
## Versuchsträger



Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern 5

# 2 Grundlagen

## 2.1 Nahbereichs-Photogrammetrie



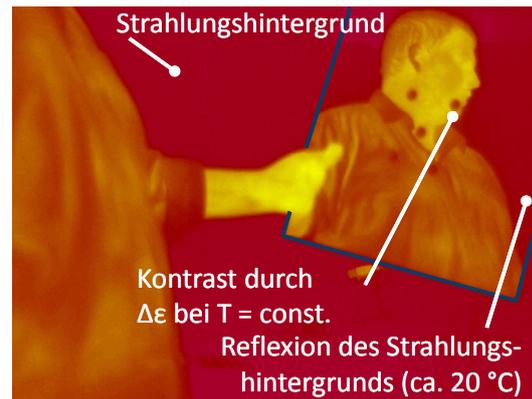
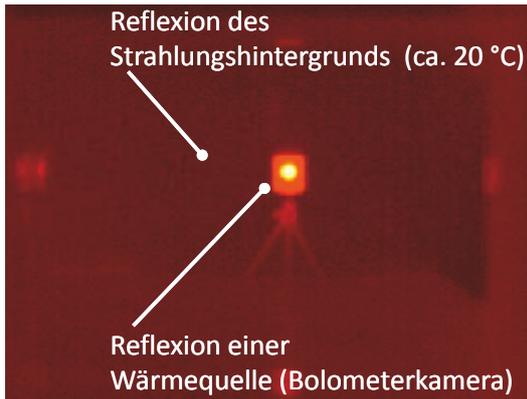
	Bündeltriangulation	Stereobildauswertung
Kameraanzahl	1 (meist)	2 - 3
Blickfeld	variabel	variabel oder fest
Kalibrierung	Selbstkalibrierung	separater Kalibrierschritt / vorkalibriert
Messunsicherheit	$\pm 2 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$ (RMS)* $\pm 3 \mu\text{m} + 7 \mu\text{m}/\text{m}$ (3 Sigma)*	$\pm 20 \mu\text{m}$ (1m <sup>3</sup> , konfigurationsabhängig) * bis zu $\pm 90 \mu\text{m}$ (17m <sup>3</sup> , Entfernung 6m) **

Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern 6

## 2 Grundlagen

### 2.2 Thermografie

- Erfassen der **Wärmestrahlung** (bspw.  $\lambda = 7 \dots 14 \mu\text{m}$ ) wobei  $L(T) \sim T^4$  gilt
- geringer Emissionsgrad  $\epsilon$  blanker Metalle  $\rightarrow$  Reflexion Strahlungshintergrund
- häufig winkelabhängiges Emissionsverhalten der Oberflächen ( $\epsilon = f(\varphi)$ )
- Kontrast entsteht durch  $\Delta\epsilon$  bei  $T_{\text{Oberfl}} = \text{const.}$  oder durch  $\Delta T_{\text{Oberfl}}$  bei  $\epsilon = \text{const.}$   
 $\rightarrow$  thermografische Temperaturmessung auf **definierter Oberfläche** = „Marke“



Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern 7

## 2 Grundlagen

### 2.2 Thermografie

- Erfassen der **Wärmestrahlung** (bspw.  $\lambda = 7 \dots 14 \mu\text{m}$ ) wobei  $L(T) \sim T^4$  gilt
- geringer Emissionsgrad  $\epsilon$  blanker Metalle  $\rightarrow$  Reflexion Strahlungshintergrund
- häufig winkelabhängiges Emissionsverhalten der Oberflächen ( $\epsilon = f(\varphi)$ )
- Kontrast entsteht durch  $\Delta\epsilon$  bei  $T_{\text{Oberfl}} = \text{const.}$  oder durch  $\Delta T_{\text{Oberfl}}$  bei  $\epsilon = \text{const.}$   
 $\rightarrow$  thermografische Temperaturmessung auf **definierter Oberfläche** = „Marke“



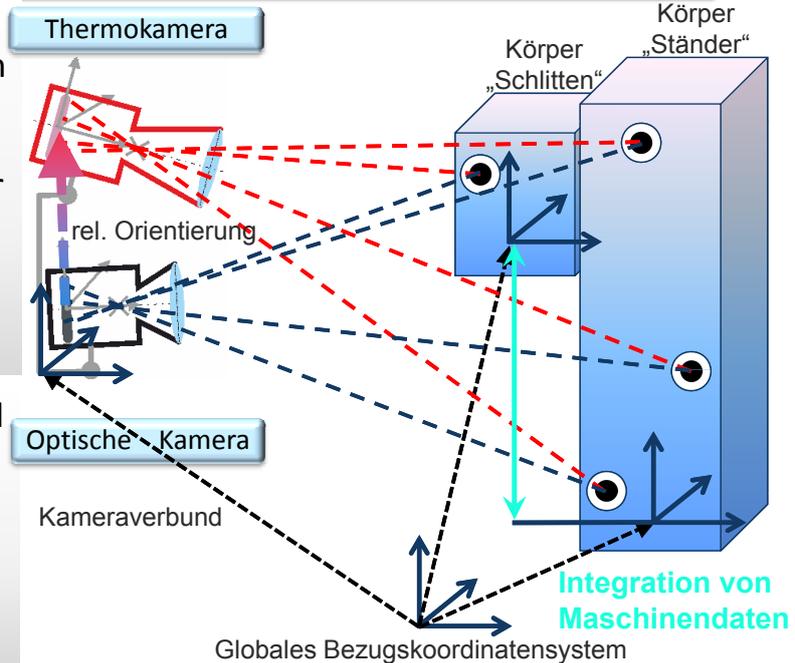
Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern 8

### 3 Selektive Thermografie

#### 3.1 Synthese von Photogrammetrie und Thermografie im 3D-Messmodell

- 1) 3D-Koordinaten der Messpunkte bestimmen (Photogrammetrie)
- 2) Zuordnung der Pixel im Thermobild (kalibrierter Kameraverbund)
- 3) Auslesen und Korrektur der thermografischen Temperaturen

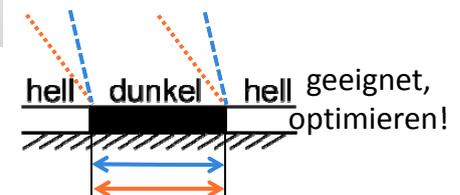
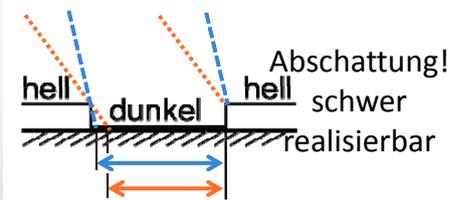
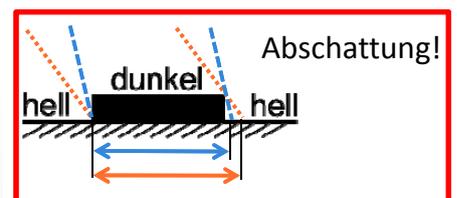
- zu jedem Objektzustand gleichzeitig Temperatur (T) Verlagerung ( $\delta x$  bzw.  $\Delta x$ ) vorhanden
- allgemeines 3D-Modell mit bewegten Objekten (Kameras und Körper)



### 3 Selektive Thermografie

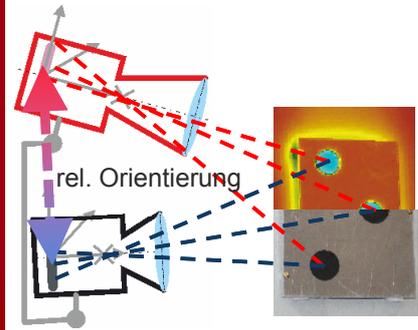
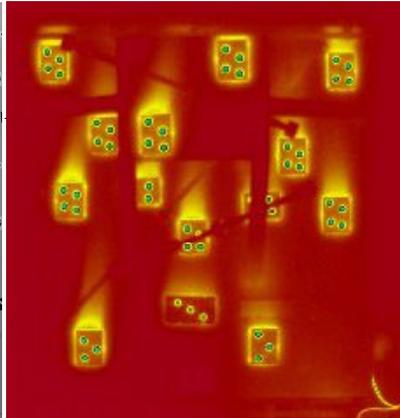
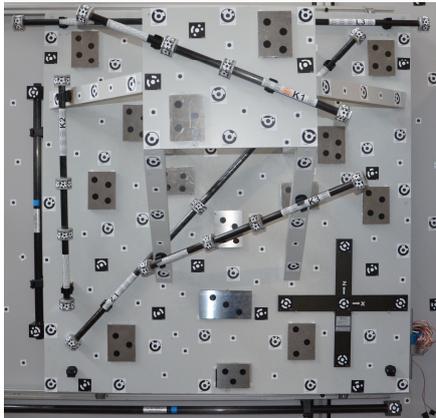
#### 3.2 Voraussetzungen für die Kalibrierung

- Marke gut und reproduzierbar detektierbar  
→ kreisförmige Marken (Ellipsenmessung)
- genügend Kontrast im **optischen und Thermobild**  
→ selektive Beschichtung, Untergrund  $\epsilon \downarrow$  und  $T \uparrow$
- geringer Höhenversatz zwischen den kontrastbildenden Kanten (Dicke gegen Null!):
  - erhabene Papiermarke (hell → dunkel)
  - ausgestanzte Papiermarken (hell → dunkel)
  - Bohrung in Metall mit EP-Harz ausgegossen, Oberfläche glänzend geschliffen



### 3 Selektive Thermografie

#### 3.2 Voraussetzungen für die Kalibrierung



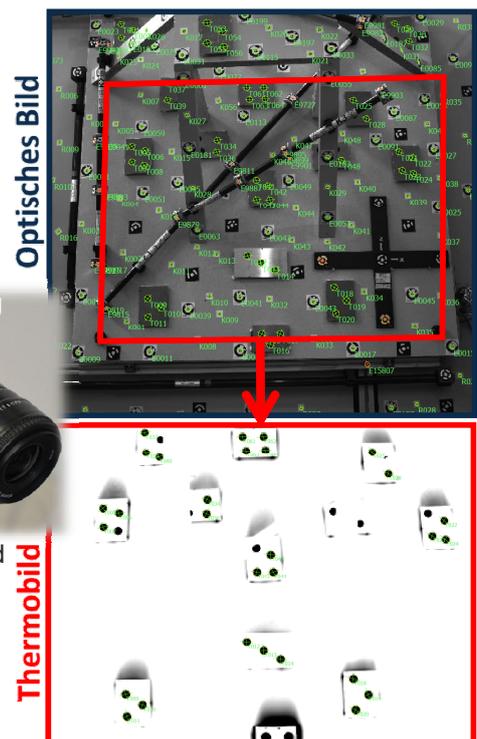
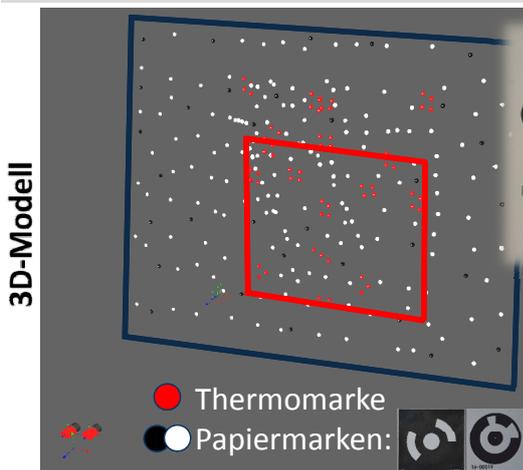
#### 3.3 Erweitertes Kalibrierfeld u. Ablauf der Kalibrierung

- Photogrammetrie-Kalibrierfeld mit versch. Tiefen und eingehangenen Längenmaßstäben
- ergänzt um beheizte Thermografie-Kalibriertafeln (AL-Platten mit Heizfolie, erhabene Papiermarken)

### 3 Selektive Thermografie

#### 3.4 Kalibrierfeld als 3D-Modell

- Aufnahme eines Bildverbandes:
  - Aufnahme synchron mit 2 Kameras
  - hinreichende Anzahl  $N_A$  Aufnahmen ( $N_A \uparrow \rightarrow$  größere Überbestimmung  $\rightarrow \sigma \downarrow$ )

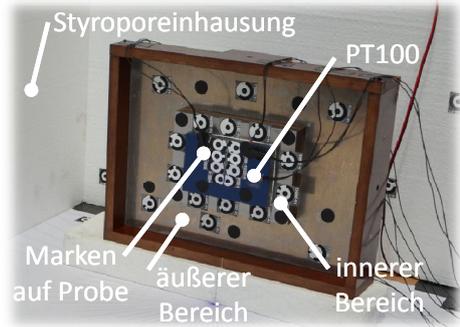


## 4 Thermografische Temperaturmessung

### Versuchsaufbau mit Probekörper

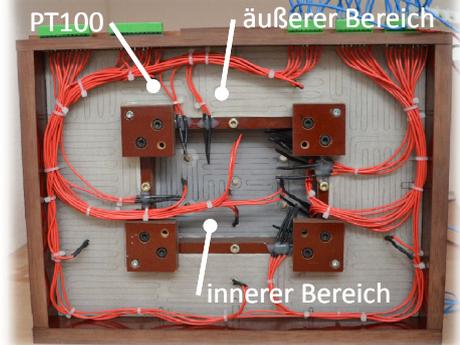
#### 4.1 Versuchsaufbau

- zwei abgesetzte, getrennt beheizbare Ebenen (Aluminium blank außen / Stahl blank innen)
- Heizung mit Konstantandraht (höhere Heizleistung als Heizfolie)
- integrierte Temperaturfühler (PT100)
- ➔ für Materialuntersuchungen und als einfaches Ersatzmodell einer WZM



#### 4.2 Grundlagenuntersuchungen

- Charakterisierung Probekörper ( $T(P)$ ,  $T_{max}$ )
- Vorversuch Temperatur- und Winkelabhängigkeit der Papiermarken
- Vorversuch aktive Marken (Sichtbarkeit)
- **Emissionsgradbestimmung / Bestimmen der Temperaturkoeffizienten  $K_T$  der Marken**

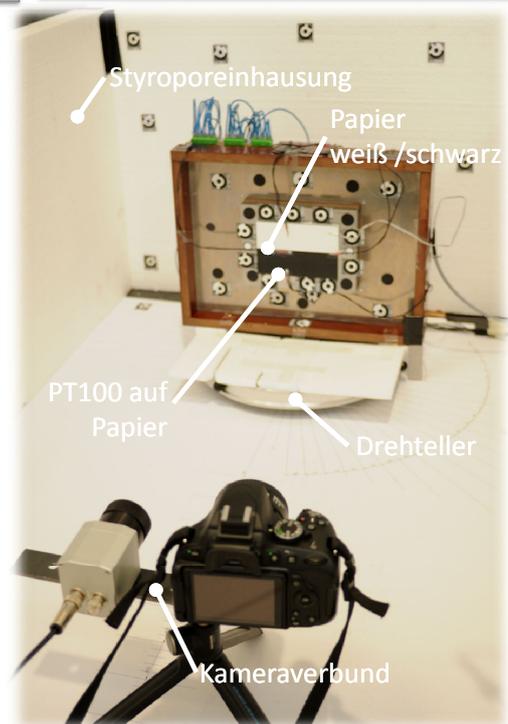
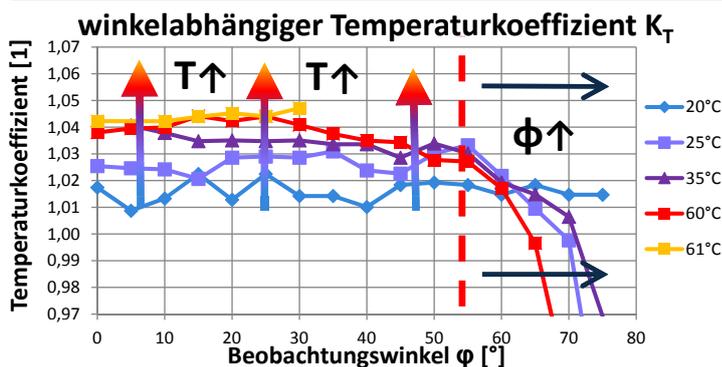


## 4 Thermografische Temperaturmessung

### Versuchsaufbau mit Probekörper

#### 4.3 Charakterisierung der Papiermarken

- Temperaturkorrektur basierend auf  $\epsilon$  nicht sinnvoll (Korrekturrechnung erfordert  $L(T)$ )
- Messen von taktill gemessener und Bildtemperatur (bei  $\epsilon = 1$ , für ges. Bild) ➔ Temperaturkoeffizient  $K_T = T_{Bild} / T_{taktill}$
- Temperaturkoeffizient  $K_T$  ist **winkel- und temperaturabhängig!**

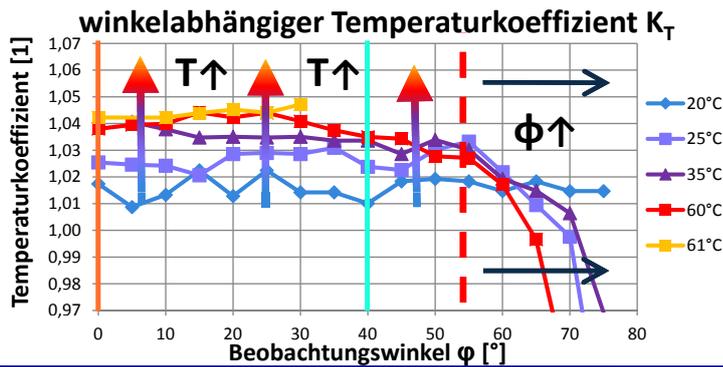
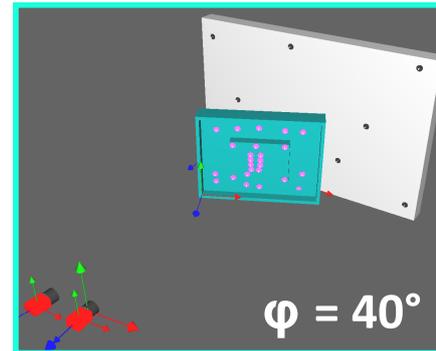
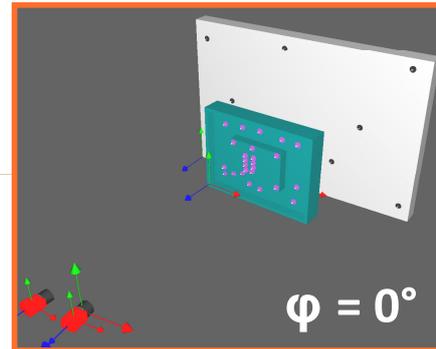


## 4 Thermografische Temperaturmessung

### Versuchsaufbau mit Probekörper

#### 4.3 Charakterisierung der Papiermarken

- Temperaturkorrektur basierend auf  $\epsilon$  nicht sinnvoll (Korrekturrechnung erfordert  $L(T)$ )  
Messen von taktile gemessener und Bildtemperatur (bei  $\epsilon = 1$ , für ges. Bild)  
→ Temperaturkoeffizient  $K_T = T_{\text{Bild}} / T_{\text{taktile}}$
- Temperaturkoeffizient  $K_T$  ist **winkel- und temperaturabhängig!**



Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern 15

## 5 Photogrammetrische Verlagerungsmessung

### Werkzeugmaschinenständer

#### Versuchsaufbau mit Ständer

- WZM-Ständer mit Heizung ( $P_{\text{Verlust}}$  der Führung)
- taktile Temperaturmessung
- Papiermarken als Messpunkte für Deformationsmessung und später selektive Thermografie



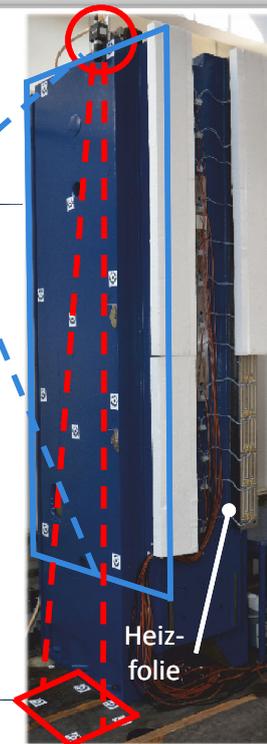
Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern 16

## 5 Photogrammetrische Verlagerungsmessung

## Werkzeugmaschinenständer

### Versuchsaufbau mit Ständer

- WZM-Ständer mit Heizung ( $P_{\text{Verlust}}$  der Führung)
- taktile Temperaturmessung
- Papiermarken als Messpunkte für Deformationsmessung und später selektive Thermografie
- Deformationsmessung (photogrammetrisch):
  - **Überblickmessung** (0,3 mm/Px) (Monokamera auf Ständer blickend) → Erfassen des Deformationsfeldes
  - **Minimalmessung** (0,15 mm/Px) (Monokamera am Ständer befestigt) → maximierte Wirkung d. Deformation im Bild



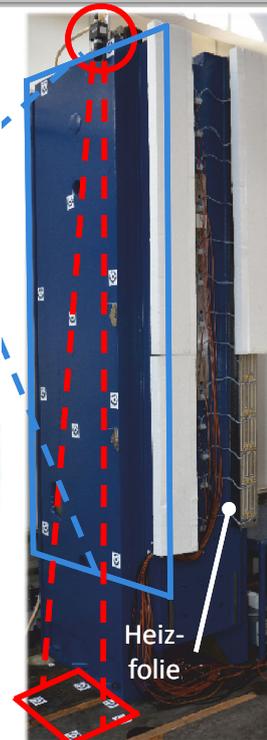
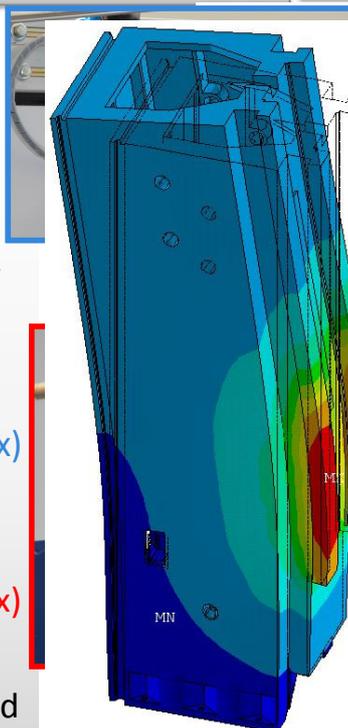
Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern 17

## 5 Photogrammetrische Verlagerungsmessung

## Werkzeugmaschinenständer

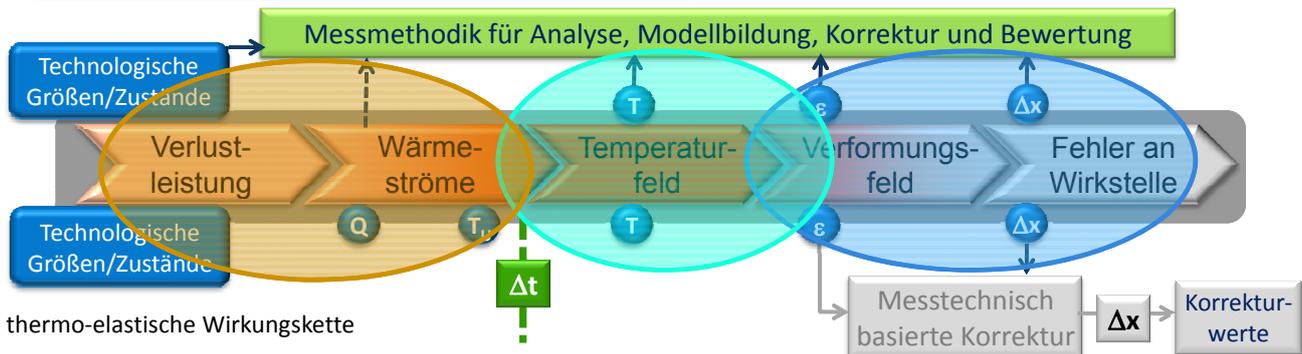
### Versuchsaufbau mit Ständer

- WZM-Ständer mit Heizung ( $P_{\text{Verlust}}$  der Führung)
- taktile Temperaturmessung
- Papiermarken als Messpunkte für Deformationsmessung und später selektive Thermografie
- Deformationsmessung (photogrammetrisch):
  - **Überblickmessung** (0,3 mm/Px) (Monokamera auf Ständer blickend) → Erfassen des Deformationsfeldes
  - **Minimalmessung** (0,15 mm/Px) (Monokamera am Ständer befestigt) → maximierte Wirkung d. Deformation im Bild



Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Erfassung von Temperatur- und Verlagerungsfeldern 18

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

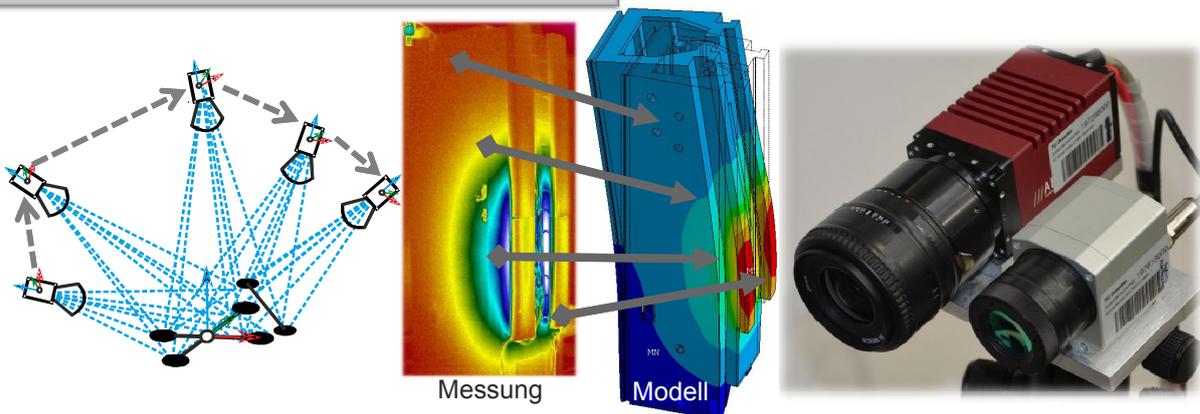


### verteilte Messwerterfassung & selektive Thermografie & Photogrammetrie

Zusammenfassung
<ul style="list-style-type: none"> <li>Besonderheiten der thermograf. Temperaturmessg. → Maßnahmen</li> <li><b>Selektive Thermografie</b> als Lösung</li> <li>Modellabgleich wird signifikant vereinfacht und verbessert</li> </ul>

Ausblick
<ul style="list-style-type: none"> <li>Verfahren <b>implementieren</b> (Bedienkomfort, Geschwindigkeit usw.)</li> <li>Verfahren <b>optimieren</b> (Marken und Temperaturkoeffizient, Kalibrierung und Kalibriertafeln, hochaufl. Kamera)</li> <li>Steuerungsanbindung MAX (TwinCAT)</li> </ul>

## 6 Zusammenfassung und Ausblick



Zusammenfassung
<ul style="list-style-type: none"> <li>Besonderheiten der thermograf. Temperaturmessg. → Maßnahmen</li> <li><b>Selektive Thermografie</b> als Lösung</li> <li>Modellabgleich wird signifikant vereinfacht und verbessert</li> </ul>

Ausblick
<ul style="list-style-type: none"> <li>Verfahren <b>implementieren</b> (Bedienkomfort, Geschwindigkeit usw.)</li> <li>Verfahren <b>optimieren</b> (Marken und Temperaturkoeffizient, Kalibrierung und Kalibriertafeln, hochaufl. Kamera)</li> <li>Steuerungsanbindung MAX (TwinCAT)</li> </ul>

# **Eigenschaftsmodellbasierter Ansatz zur Korrektur thermo-elastischer Verlagerungen**

Prof. Dr.-Ing. Ch. Brecher; Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. M. Wennemer

RWTH Aachen, WZL

# Eigenschaftsmodellbasierter Ansatz zur Korrektur thermo-elastischer Verlagerungen

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. M. Wennemer

Getrieben durch stetige Verbesserungen des statischen und dynamischen Werkzeugmaschinenverhaltens besitzen nunmehr thermisch bedingte Strukturverformungen den größten Anteil am resultierenden Werkstückfehler [MAYR12].

Dabei können thermisch bedingte Strukturverformungen von Werkzeugmaschinen auf unterschiedliche Einflüsse externer und interner Art zurückgeführt werden: Externe Einflüsse umfassen diejenigen, welche aus der Umgebung auf die Maschine einwirken, wie beispielsweise Tages- und Jahreszeit abhängige Zyklen oder auch benachbarte Produktionsanlagen. Interne Einflüsse sind hingegen Wärmequellen und -senken innerhalb der Maschinenstruktur, wie beispielsweise die Antriebssysteme oder auch der Prozess.

Ziel des Projektes B06 des Sonderforschungsbereich Transregio 96 ist die Entwicklung eines eigenschaftsmodellbasierten Ansatzes zur Korrektur thermo-elastischer Verlagerungen im gesamten Arbeitsraum von Werkzeugmaschinen. Dabei wird ein indirekter Ansatz verfolgt, bei dem die Tool Center Point(TCP)-Verlagerungen über physikalische Hilfsgrößen, wie beispielweise Drehzahlen, Achspositionen und Leistungen, ermittelt werden (Bild 1). Mit diesen Hilfsgrößen werden die Verlagerungen der TCP-Position im gesamten Arbeitsraum berechnet und anschließend der Maschinensteuerung als Offset übergeben. Dabei wird die Korrektur steuerungsintern umgesetzt, sodass diese im späteren Betrieb ohne zusätzliche Elemente in bestehende Maschinenteknik integriert werden kann.

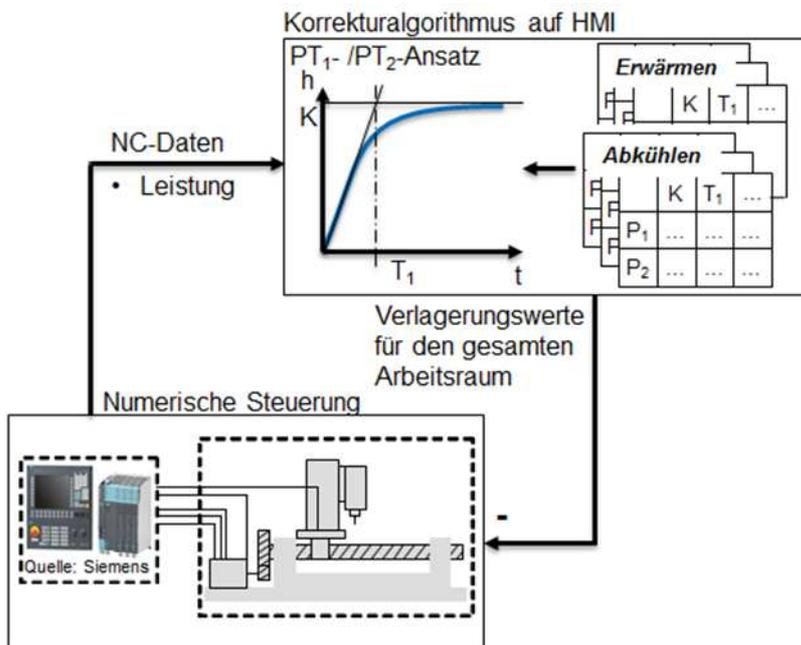


Bild 1: Ansatz der eigenschaftsmodellbasierten Korrektur

Der Ansatz einer eigenschaftsmodellbasierten Korrektur thermo-elastischer Verlagerungen des TCP wurde bereits am WZL für den spindelbedingten Anteil im Rahmen des EU-Projektes „NEXT“ erfolgreich entwickelt [BREC09]. Im Teilprojekt B06 des Sonderforschungsbereichs TR96 steht nun der Einfluss der Achsen inkl. des gesamten Antriebsstranges im Mittelpunkt der

Untersuchungen. Im weiteren Verlauf des Projektes ist geplant die beiden Teilmodelle für den spindel- und achsbedingten Anteil zusammenzuführen.

Zu Beginn des Projektes ist zunächst ein erstes eigenschaftsmodellbasiertes Korrekturmodell für einen Punkt im Arbeitsraum einer Fräsmaschine entwickelt worden. Die diesbezüglich notwendigen Verlagerungsversuche zur Modellierung des thermischen Verhaltens gestalten sich folgendermaßen: Ein Verlagerungsversuch besteht jeweils aus einer Aufwärm- und einer Abkühlphase, da diese aufgrund der unterschiedlichen thermischen Zeitkonstanten separat modelliert werden müssen. Die Erwärmung der betreffenden Achsen erfolgt, indem sie mit hoher Geschwindigkeit ohne Zerspanungseingriff (Luftschnitt) verfahren werden. Dabei dauert es in etwa 6 Stunden bis die Maschine in der Aufwärmphase für die gewählte Belastung ihren Beharrungszustand erreicht. Der Aufwärm- schließt die Abkühlphase mit einer Dauer von etwa 18 Stunden an (Bild 2). Während Aufwärm- wie auch Abkühlphase werden die translatorischen Verlagerungen des TCP entsprechend ISO 230-3 mit einem Messwinkel und 5 induktiven Messtastern alle 120 s gemessen.

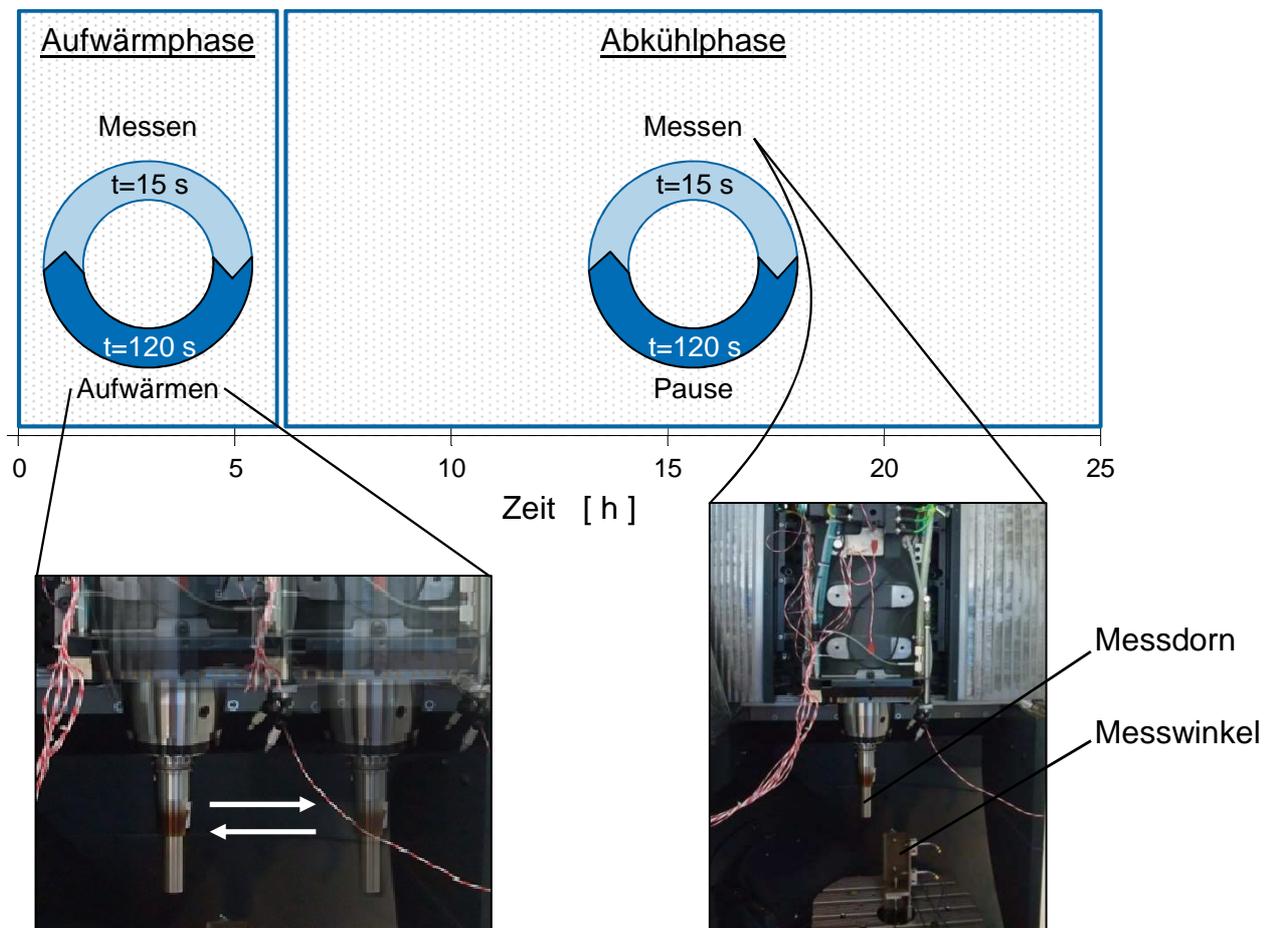


Bild 2: Versuchsaufbau zur Verlagerungsmessung eines Raumpunktes

Das Korrekturmodell besteht aus je einem Teilmodell je Achse, welches den Einfluss der Einzelachse auf die Verlagerung des TCP beschreibt. Jedes Teilachsmodell basiert wiederum auf zwei Versuchen a 24 Stunden mit einer hohen und einer niedrigeren Belastung. Demnach wird jedes Achsverhalten mittels zwei Stützpunkten im Modell abgebildet, Zwischenwerte werden entsprechend linear interpoliert. Die diesbezügliche Eingangsgröße für das Modell ist die Leistung der einzelnen Achsantriebe.

Im Ergebnis konnte mit dem ersten vereinfachten Modellansatz für einen Punkt im Arbeitsraum auf Basis von  $PT_1$ -Gliedern der Restfehler bei Belastung einer Einzelachse auf eine Restverlagerung von  $5\text{ }\mu\text{m}$  reduziert werden. In Bild 3 ist hierzu exemplarisch die Verlagerung des TCP in

Z-Richtung bei Belastung der Y-Achse dargestellt. Der Restfehler ergibt sich hierbei aus der Differenz von gemessener und berechneter Verlagerung.

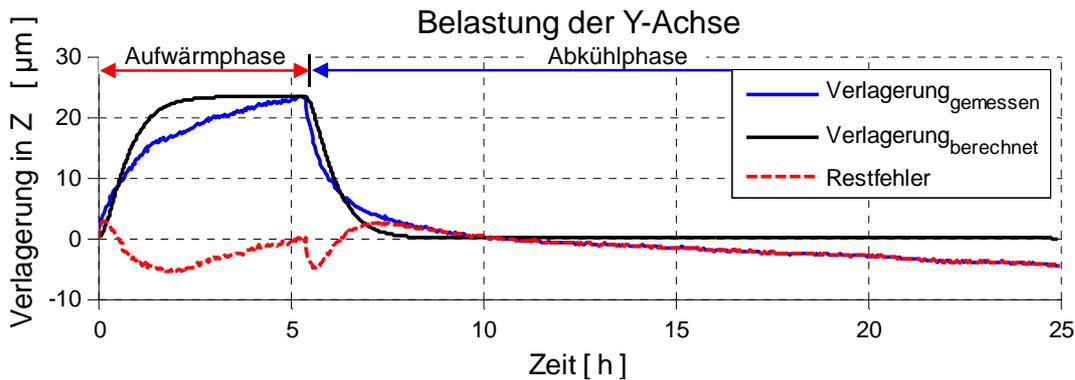


Bild 3: Korrekturergebnis bei Belastung einer Einzelachse

Das erste Fehlermodell ist anschließend dahingehend untersucht worden, inwieweit auch kombinierte mehrachsige Belastungen abgebildet werden können. Hierzu wird die Gesamtverlagerung durch Superposition der Teilmodelle berechnet. Das Ergebnis einer solchen mehrachsigen Belastung aller drei Linearachsen X, Y und Z ist in Bild 4 dargestellt.

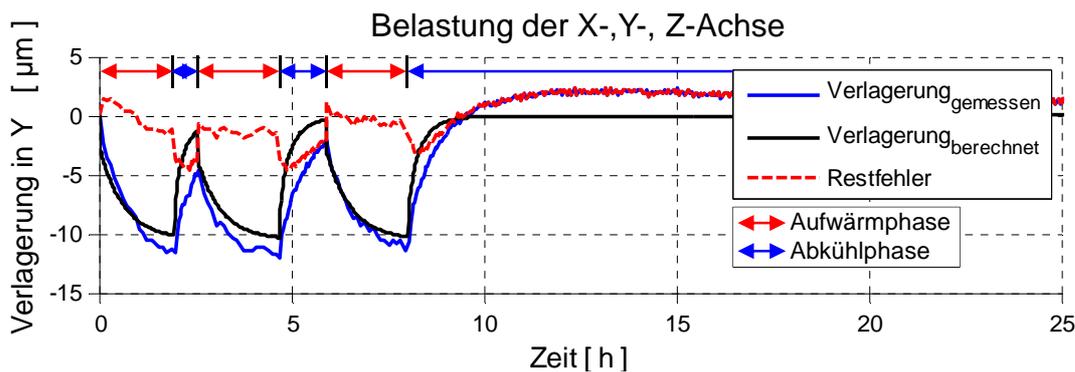


Bild 4: Korrekturergebnis bei simultaner Belastung von X, Y und Z Achse

Bei mehrachsiger Belastung können ebenfalls wesentliche Verbesserungen mit einer Restverlagerung von unter  $5\ \mu\text{m}$  erzielt werden. Allerdings verdeutlicht dieser Versuch eine erste Herausforderung des Korrekturansatzes: Im Gegensatz zur Aufwärmphase mit räumlich definierten Wärmequellen (Linearmotoren) und -senken (Maschinenstruktur), verfügt die Abkühlphase über einen vergleichsweise undefinierten Zustand bezüglich der Verteilung der Wärmequellen und -senken. Die komplexe im Wesentlichen von der Belastungsvorgeschichte abhängige Rückverlagerung kann dadurch nur schwer mit einem indirekten Korrekturmodell abgebildet werden. Im Ergebnis treten insbesondere in der Abkühlphase große Restverlagerungen auf, sodass an dieser Stelle weiterer Forschungsbedarf besteht. Zusammenfassend kann jedoch die Eignung eines eigenschaftsmodellbasierten Verfahrens zur Korrektur thermo-elastischer Verlagerungen des TCPs für Linearachsen gezeigt werden.

Der nächste Schritt zur Korrektur thermo-elastischer Verformungen ist die Umsetzung des Ansatzes im gesamten Arbeitsraum einer Werkzeugmaschine. Hierzu wird zunächst das thermo-elastische Verhalten mittels LaserTracer der Etalon AG, Braunschweig, im gesamten Arbeitsraum aufgenommen (Bild 5, links). Das Messsystem arbeitet nach dem Prinzip der Multilateration, wie es auch vom Positioniersystem GPS bekannt ist, um die relative Position des TCPs zum

Maschinentisch zu bestimmen [SCHW08]. Mit den so gewonnenen räumlichen Verlagerungsdaten (Bild 5, rechts) kann anschließend das Korrekturmodell weiterentwickelt werden.

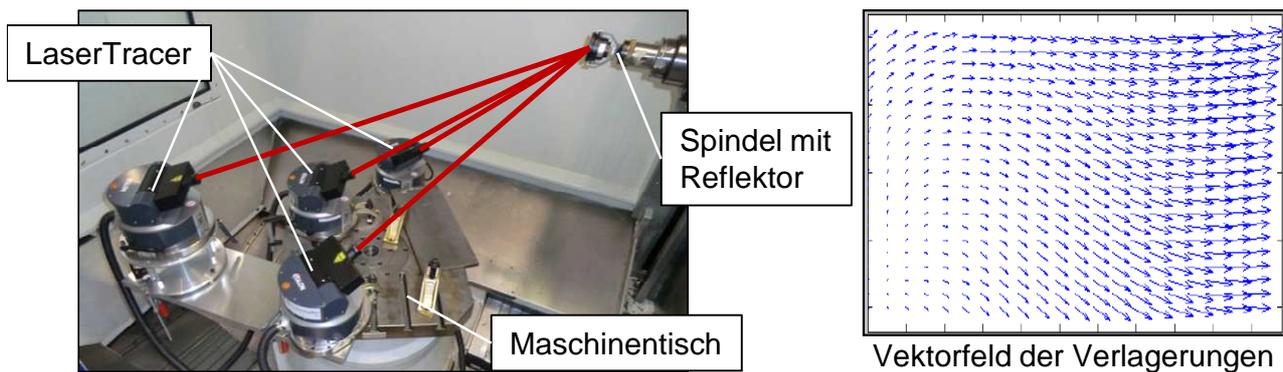


Bild 5: Messung der TCP-Verlagerungen mittels Multilateration

Bisher erfolgte die Erwärmung der Maschinenstruktur lediglich durch das Verfahren der einzelnen Maschinenachsen im Luftschnitt. Im realen Betrieb ist hingegen durch die Bearbeitung mit vergleichsweise geringen Vorschubgeschwindigkeiten und hohen Belastungen durch prozessbedingte Widerstandskräfte zu rechnen. Dieser unterschiedliche Belastungszustand wird den Wärmeeintrag in die Maschinenstruktur über tribologische Effekte im Antriebsstrang und den elektrischen Verlustleistungen wesentlich beeinflussen, sodass im weiteren Verlauf des Projektes die Achsen gezielt und reproduzierbar, einzeln wie auch kombiniert, belastet werden. Hierfür ist bereits eine Belastungseinheit entwickelt worden (Bild 6). Die Belastungseinheit besteht dabei aus zwei Linearachsen mit Kugelgewindetrieb, an denen anstelle eines Motors eine Hydraulikpumpe angeflanscht ist (Bild 6, rechts). In der Maschine können diese einzelnen Einheiten beispielsweise zu einem Kreuztisch kombiniert werden (Bild 6, links). Im Betrieb treibt die Werkzeugmaschine über die Linearachsen die Hydraulikpumpen, die jeweils gegen ein Druckbegrenzungsventil (DBV) arbeiten, an. Die Belastung ist dabei durch Regelung des Gegendrucks einstellbar. Durch die Hydraulik kann die entstehende Verlustwärme an den neben der Maschine stehenden Kühler abgeführt werden und führt somit zu keiner zusätzlichen störenden Erwärmung der Maschinenstruktur.

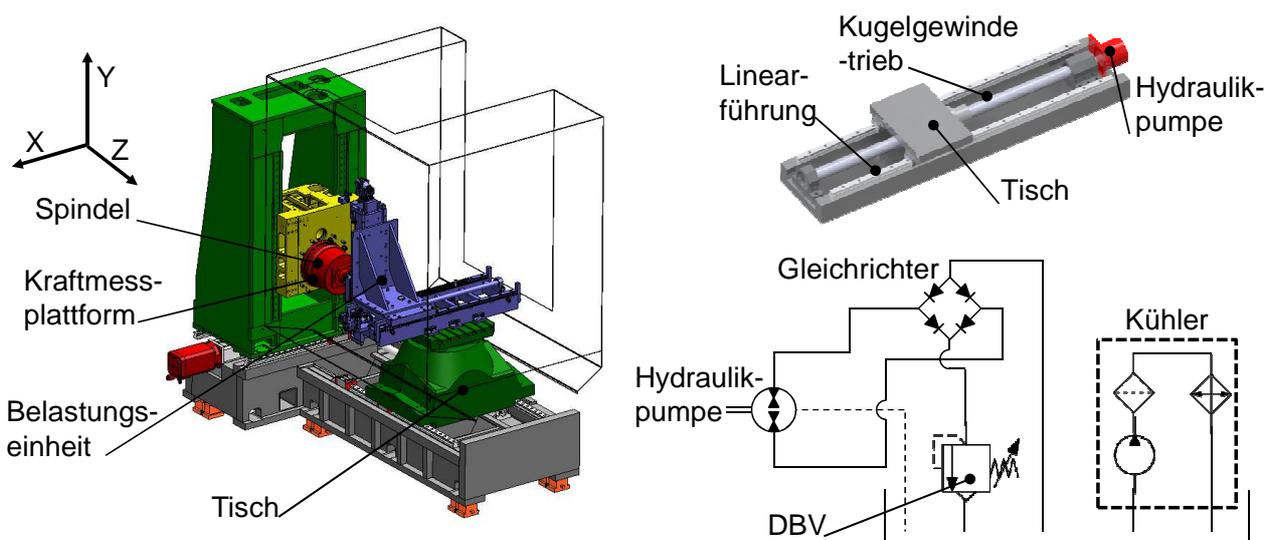
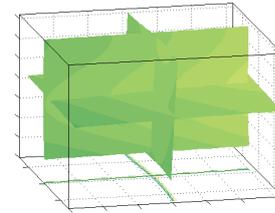
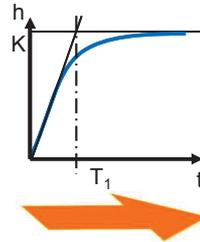
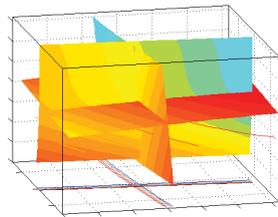


Bild 6: Belastungseinheit

- [BREC09] Brecher, C.; Wissmann, A.: Modelling of Thermal Behaviour of a Milling Machine Due to Spindle Load. 12th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations, Spain, (2009), S.673-678.
- [MAYR12] Mayr, J.; Jedrzejewski, J.; Uhlmann, E.; Alkan Donmez, M.; Knapp, W.; Härtig, F. et al.: Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61, (2012), S. 771–791.
- [SCHW08] Schwenke, H.; Knapp, W.; Haitjema, H.; Weckenmann, A.; Schmitt, R.; Delbressine, F.: Geometric error measurement and compensation of machines—An update. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57, (2008), S. 660–675.

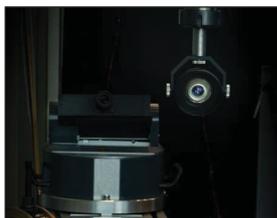
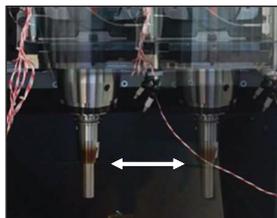
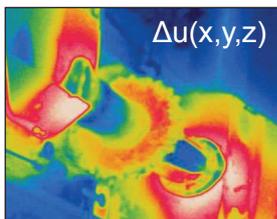
# Eigenschaftsmodellbasierter Ansatz zur Korrektur thermo-elastischer Verlagerungen



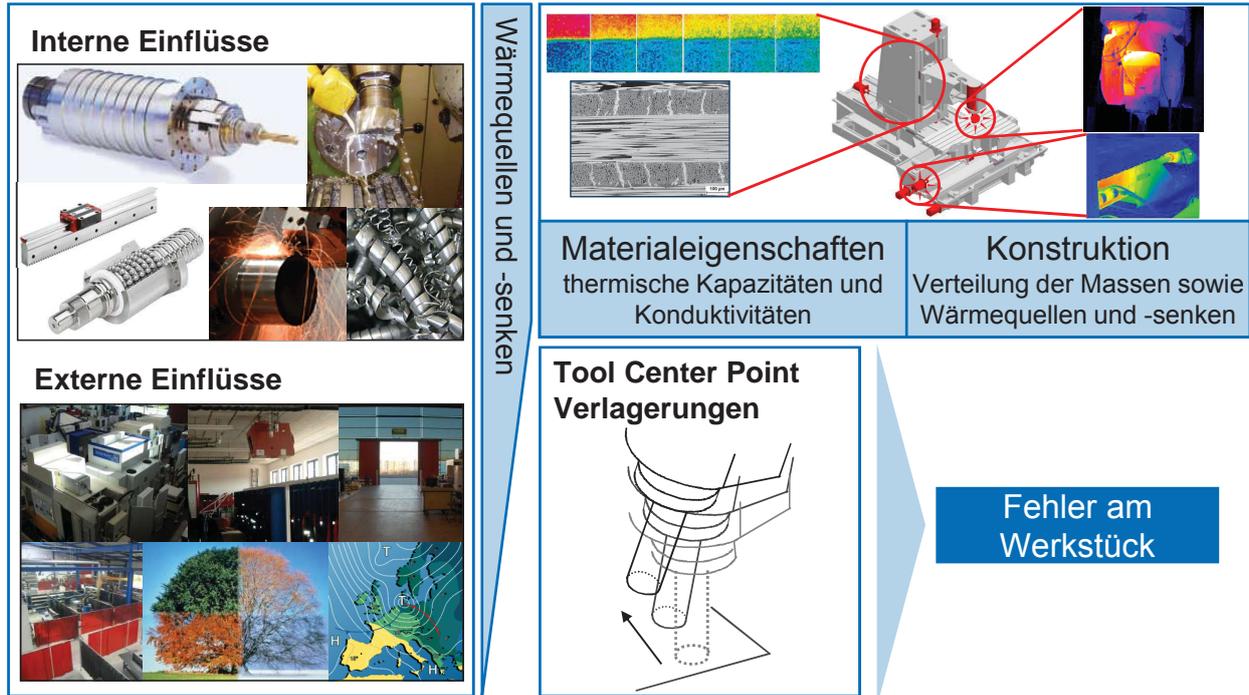
Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Matthias Wennemer

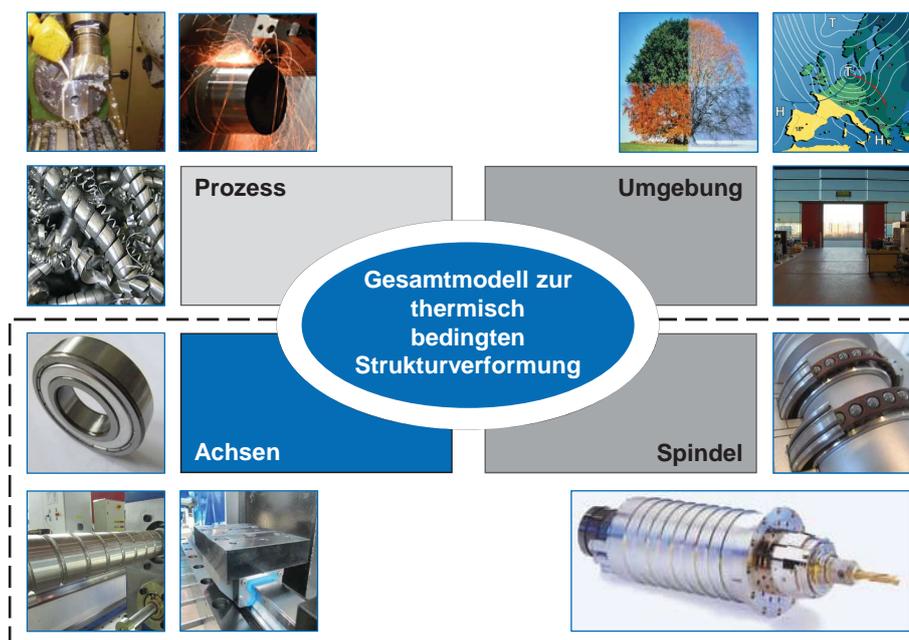
## Agenda



- 1 **Forschungsfeld**
- 2 **Ziele und Methoden**
- 3 **Volumetrische Betrachtung**
- 4 **Ausblick**

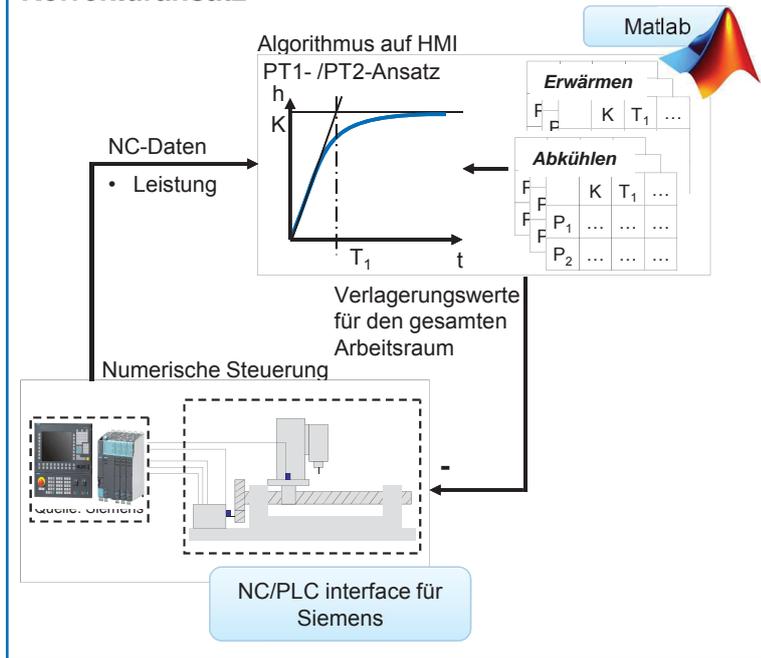


Forschungsfeld



Forschungsfeld

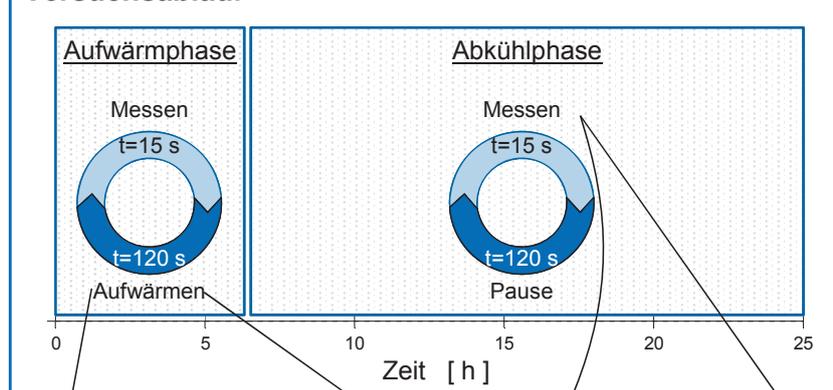
**Korrekturansatz**



- Methode zur steuerungs-internen Korrektur lastabhängiger, thermisch bedingter Bearbeitungsfehler im gesamten Arbeitsraum einer Fräs- und einer Schleifmaschine
- Auf der Basis von Daten, die der Steuerung entnommen werden können
  - » keine zusätzliche, externe Messtechnik notwendig
- Korrektur des achsbedingten Anteils
- Synthese mit dem bereits vorhandenen Modell zur Korrektur von Verformungen durch die Spindelbelastung

Ziele und Methoden

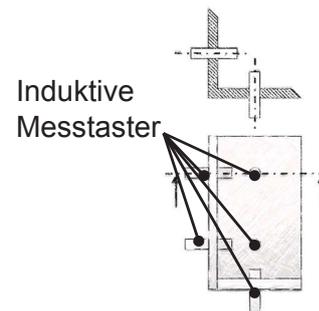
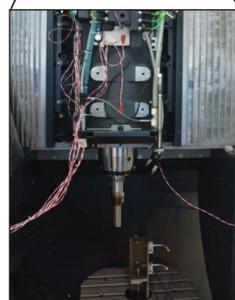
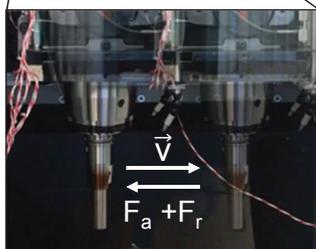
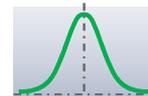
**Versuchsablauf**



**Messunsicherheit**

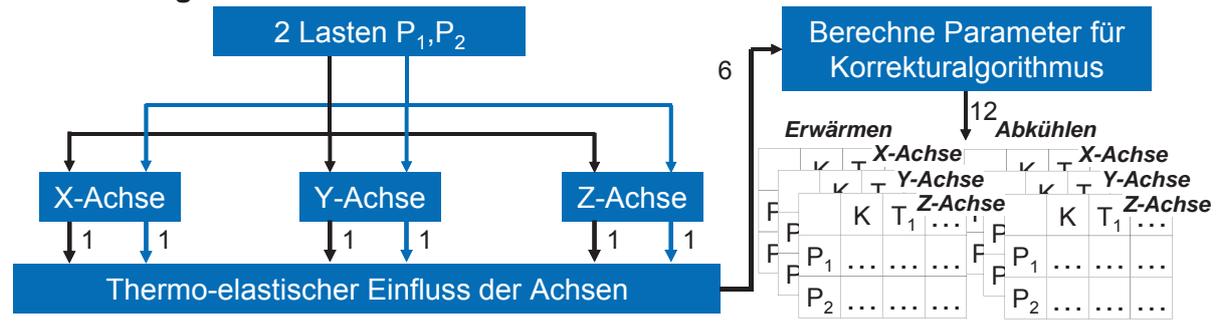
Induktive Messtaster:  
 Wiederholgenauigkeit:  
 $< 0,15\ \mu\text{m}$   
 Messbereich:  
 $\pm 1\ \text{mm}$

Messverfahren (n=51):  
 Standardabw.:  
 $< 0,25\ \mu\text{m}$   
 Bereich:  
 $< 1\ \mu\text{m}$

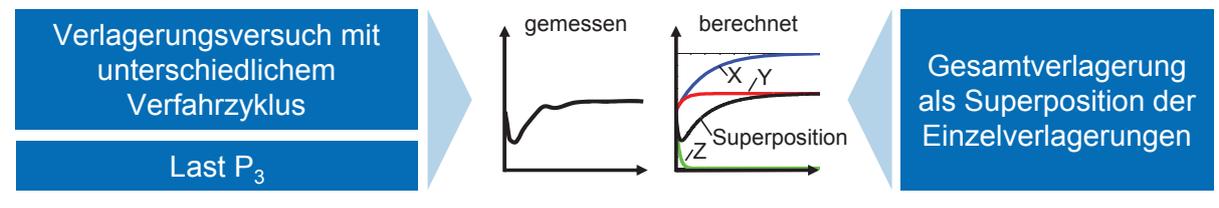


Ziele und Methoden

Modellierung

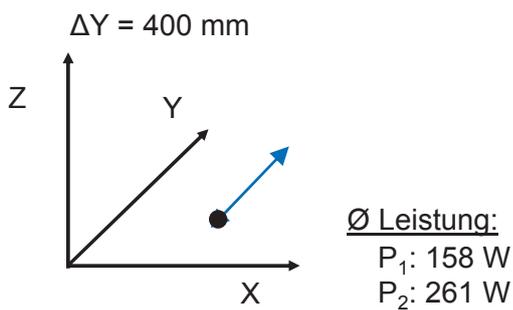


Validierung

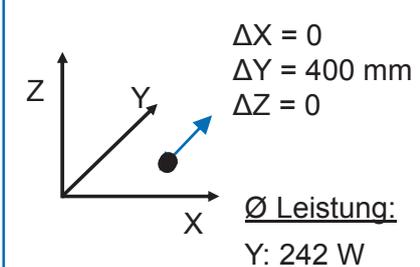


Ziele und Methoden

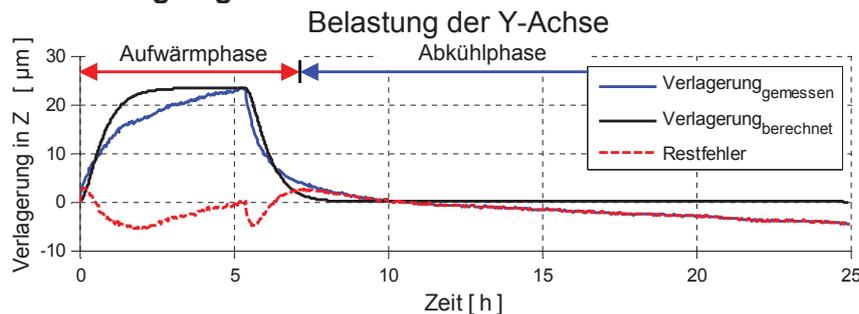
Modellierung ( $v_1: 20 \text{ m/min}, v_2: 30 \text{ m/min}$ )



Validierung ( $v_3: 25 \text{ m/min}$ )



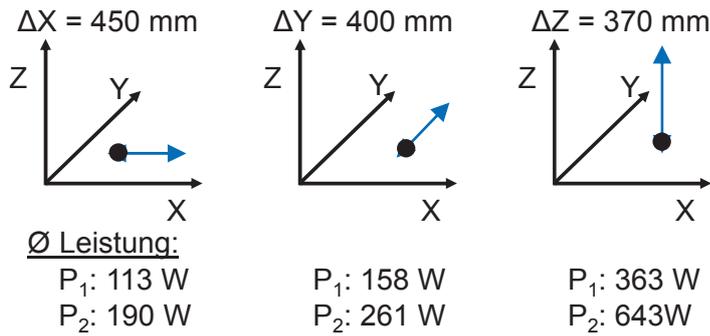
Validierungsergebnis



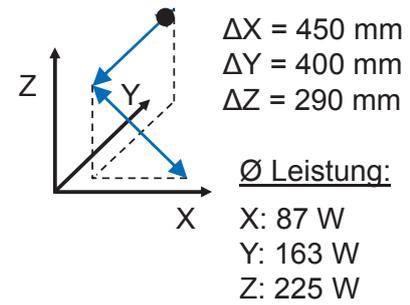
- Max. Fehler ohne Korrektur: 23,4 µm
- Max. Fehler mit Korrektur: 5,6 µm
- Verbesserung: 76 %

Ziele und Methoden

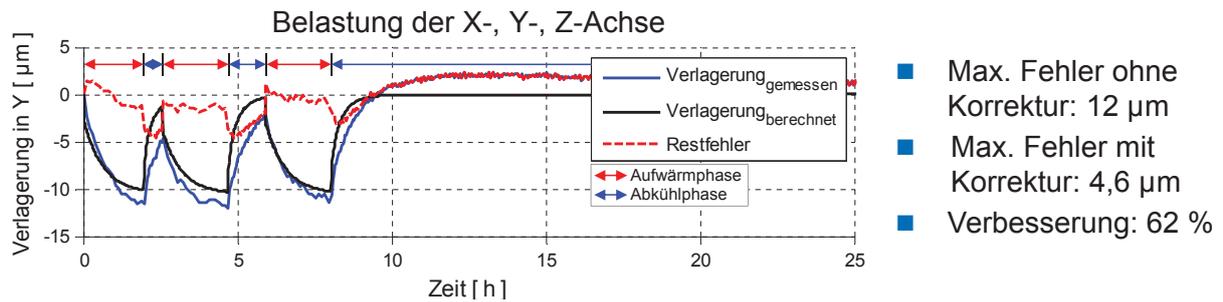
**Modellierung ( $v_1: 20 \text{ m/min}, v_2: 30 \text{ m/min}$ )**



**Validierung ( $v_3: 30 \text{ m/min}$ )**

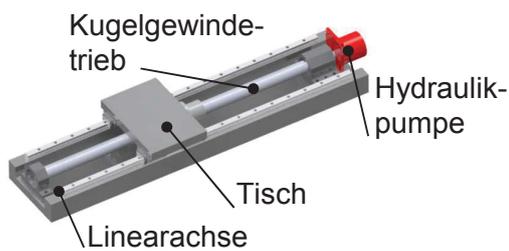


**Validierungsergebnis**

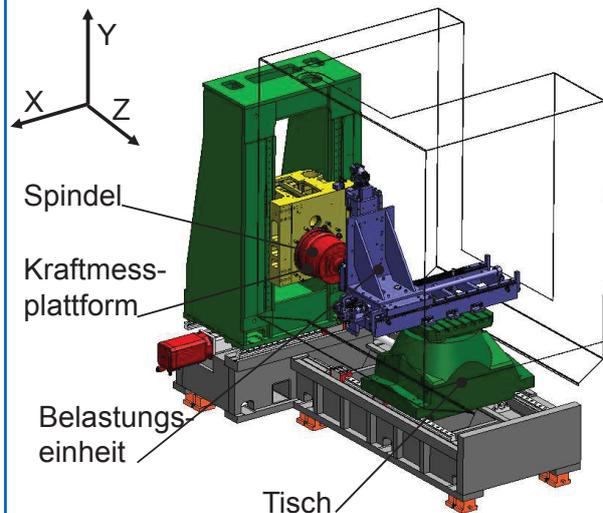


**Ziele und Methoden**

**Einzelne Belastungseinheit**

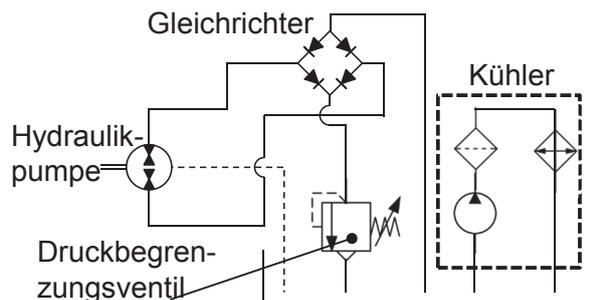


**Belastungseinheit für kombinierte Belastung von X- und Y-Achse**



■ Max. Last: 10 kN

**Hydraulikplan**



**Ziele und Methoden**

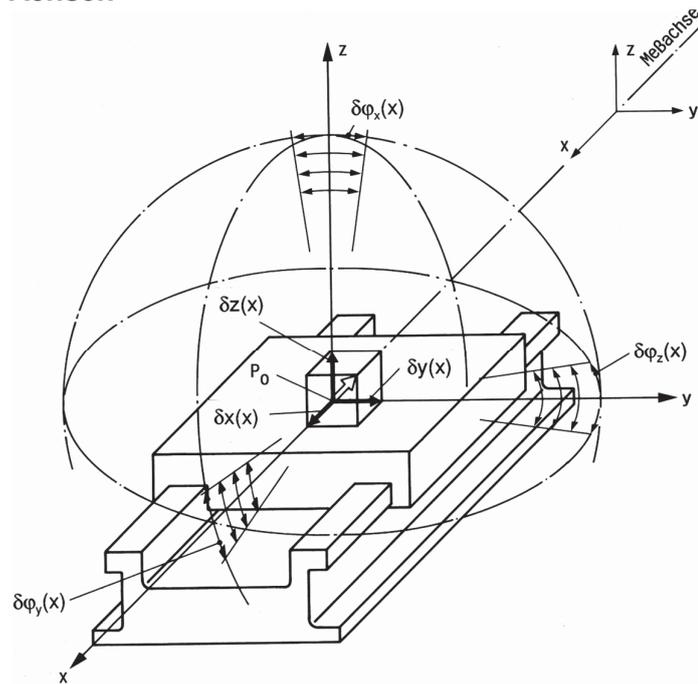
### Freiheitsgrade bei linear bewegten Achsen

#### Translatorische Abweichungen

- $\delta x(x)$ : Positionsabweichung
- $\delta y(x)$ : Geradheitsabweichung
- $\delta z(x)$ : Geradheitsabweichung

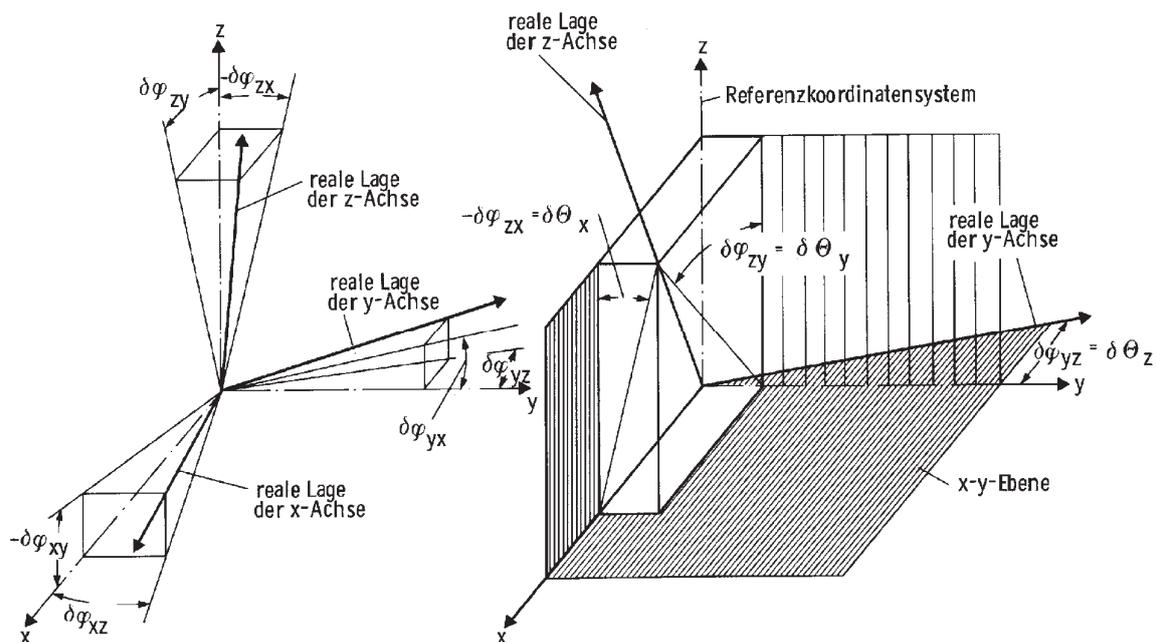
#### Rotatorische Abweichungen

- $\delta\varphi_x(x)$ : Rollen
- $\delta\varphi_y(x)$ : Stampfen, Nicken
- $\delta\varphi_z(x)$ : Gieren



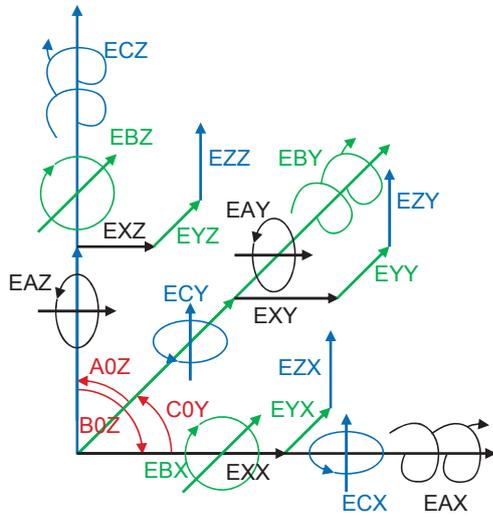
### Volumetrische Betrachtung

### Winkelabweichungen der Bewegungsachsen untereinander

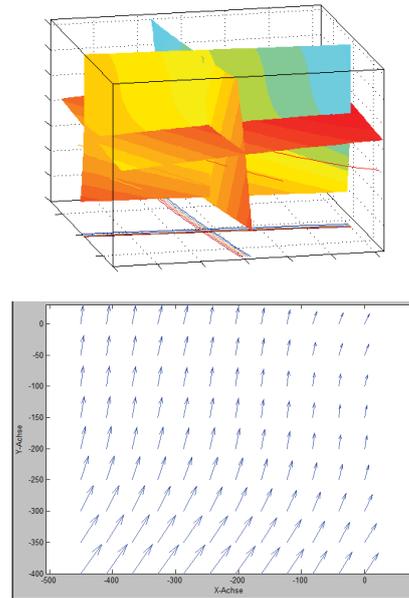


### Volumetrische Betrachtung

### 21 Fehlerparameter nach ISO 210

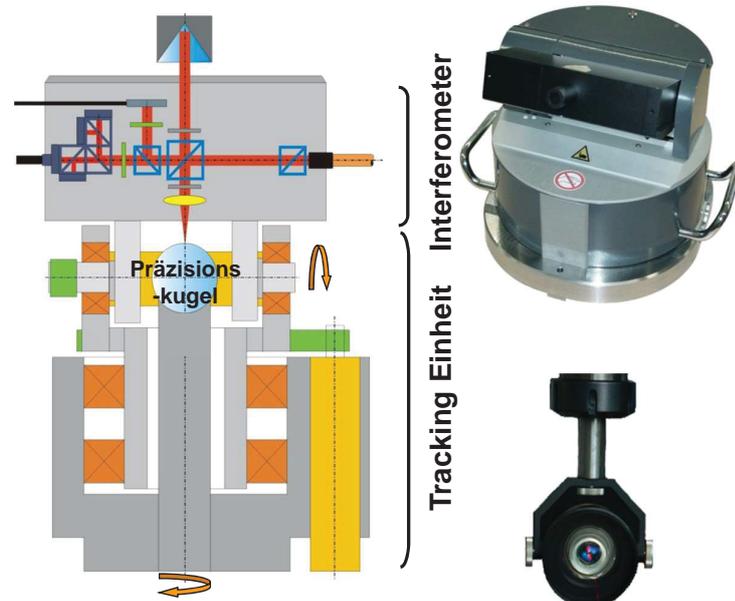


### Volumetrische Abweichungen



### Volumetrische Betrachtung

### Eingesetzte Messtechnik: LaserTracer



#### Idee des LaserTracers

- Drehen und Schwenken des kompletten Interferometers
- Rotationszentrum des Interferometers entspricht dem Ursprung für alle Messungen
- Arbeitsbereich: 6 m (durch mehrere Standpunkte beliebig erweiterbar)
- Messdauer (inkl. Aufbau) für eine Arbeitsraum von 1 m<sup>3</sup> ca. 2 h

#### Möglichkeiten

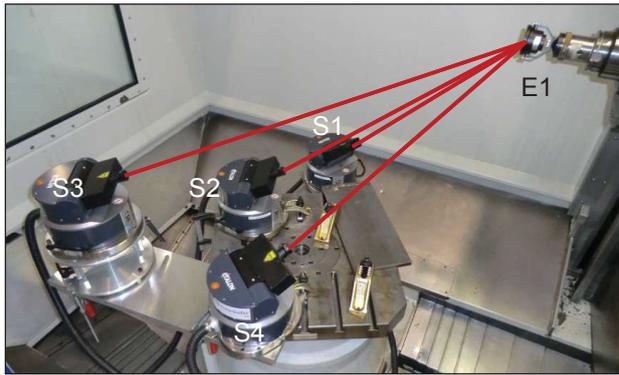
- Genauigkeit: 0,3 µm + 0,3 µm/m
- Kompletter Arbeitsraum kann vermessen werden

#### Grenzen

- Sichtkontakt notwendig
- Großer Raumbedarf
- ~100.000 €

### Volumetrische Betrachtung

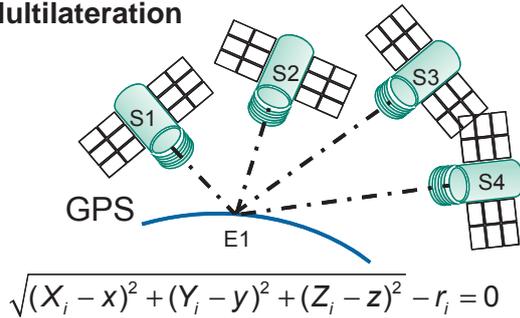
LaserTracer



LaserTracerMT



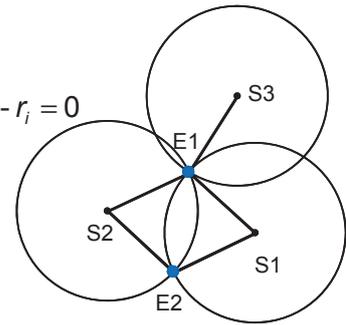
Multilateration



2-dimensionaler Fall:

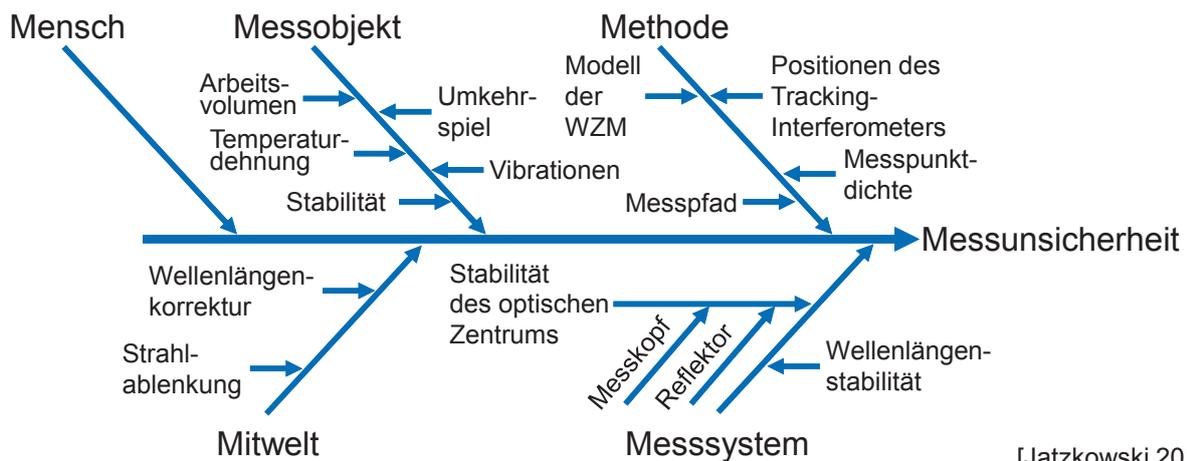
$$\sqrt{(X_i - x_j)^2 + (Y_i - y_j)^2} - r_i = 0$$

$X_i, Y_i$  : Position  $S_i$   
 $x_j, y_j$  : Position  $E_j$   
 $r_i$  : Strecke  $\overline{S_i E_i}$



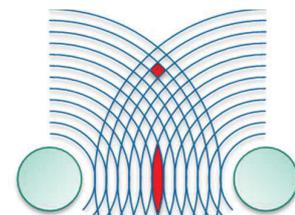
Volumetrische Betrachtung

Einflussgrößen auf die Messunsicherheit

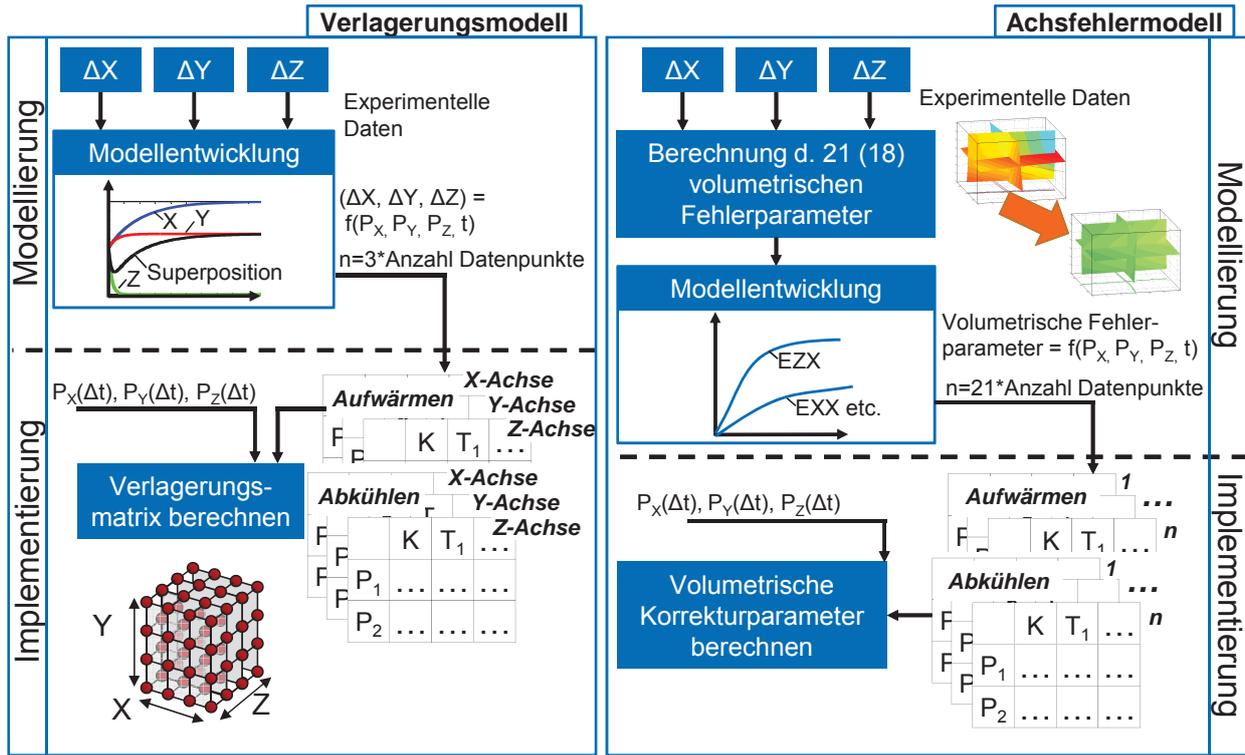


Messunsicherheit

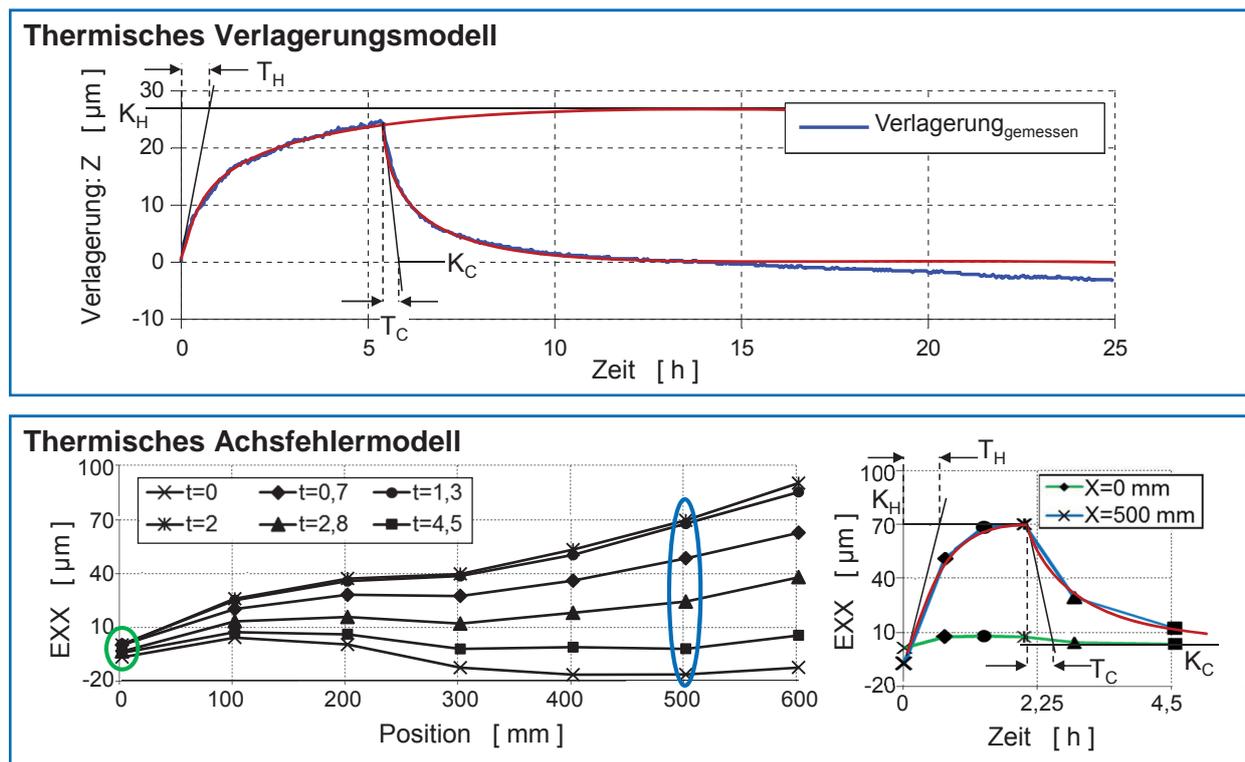
- Messunsicherheit liegt beim LaserTracer-System über das gesamte Volumen für die thermischen Verlagerungsmessungen in einem Bereich von 1 µm bis 3 µm.
- Berechnung der Unsicherheit mittels Monte-Carlo Simulation



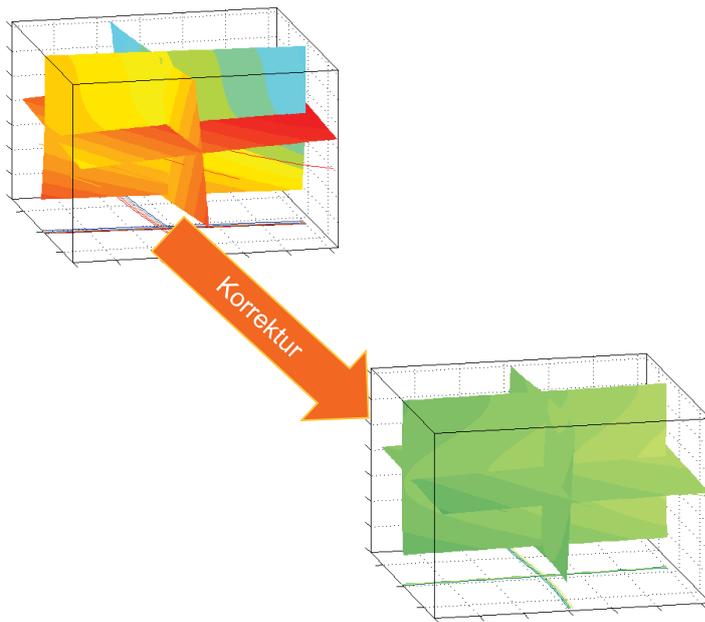
Volumetrische Betrachtung



Volumetrische Betrachtung



Volumetrische Betrachtung



- Automatisierte Messung der TCP-Verlagerungen im gesamten Arbeitsraum
- Entwicklung, Validierung und Vergleich von volumetrischen Korrekturmodellen für thermoelastische TCP-Verlagerungen
- Zusammenführung des Achsmodells mit dem eigenschaftsmodellbasierten Korrekturverfahren für den spindellastbedingten Anteil

---

Ausblick

# **Simulative Erweiterung der Datenbasis zur korrelativen Korrektur thermo-elastischer Verformungen**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann; Dipl.-Ing. Ch. Städel; Dr.-Ing. A. Mühl  
TU Dresden, IWM

W. Keim  
GROB-WERKE GmbH & Co.KG, Mindelheim

# SIMULATIVE ERWEITERUNG DER DATENBASIS ZUR KORRELATIVEN KORREKTUR THERMO-ELASTISCHER VERFORMUNGEN

Möglichkeiten zur Abbildung von Strukturvariabilität

Großmann, K.; Städel, C.; Mühl, A.; IWM TU Dresden;

Keim, W.; GROB-Werke GmbH & Co. KG Mindelheim

## 1 Einführung

Durch Verlustleistungen und veränderliche Umgebungsbedingungen induzierte Temperaturfelder an WZM rufen Strukturverformungen und damit Verlagerungen des TCP hervor. Die Temperaturfelder reagieren i. d. R. mit großen Zeitkonstanten (Minuten- bis Stundenbereich) auf die eingepprägten thermischen Lasten. Die Verlagerungsfelder hingegen folgen nahezu unverzögert Änderungen im Temperaturfeld. Derart thermo-elastisch verursachte Fehler haben heute einen Anteil von ca. 50 ... 70 % am Gesamtfehler an der Wirkstelle. Eine Korrektur dieser Fehler durch entsprechende Korrekturwert-Beaufschlagung in den Vorschubachsen kann daher zu einer Verbesserung der geometrischen Qualität der auf WZM spanend gefertigten Werkstücke führen.

## 2 Charakteristik einer korrelativen Korrektur

Der Zusammenhang von Temperaturen und Verlagerungen an WZM ist aufgrund des weitgehend linearelastischen Verhaltens der Strukturbauteile und aufgrund des weitgehend konstanten thermischen Ausdehnungskoeffizienten der in diesen Strukturbauteilen verwendeten Werkstoffe i. d. R. linear. Der korrelative Ansatz  $\Delta \xi = k_1 \cdot T_1 + k_2 \cdot T_2 + k_3 \cdot T_3 + \dots + k_n \cdot T_n$  ist demnach hinreichend. Die Regressionskoeffizienten  $k_1 \dots k_n$  werden aus einer Datenbasis  $\{\Delta \xi_i\}^T, \{T_1 \dots T_n\}^T$  mit Ausgleichsrechnungen ermittelt. Da die Anzahl der zu erfassenden Temperaturmessstellen aus Wirtschaftlichkeitssicht begrenzt ist, müssen ausgewählte Messpositionen eine Näherungslösung liefern. Die Auswahl der Temperaturmessstellen erfolgt anhand des Bestimmtheitsmaßes R zwischen Temperaturmessstelle  $T_i$  und Verlagerung  $\xi$ . R sollte in der Nähe von 1 (gleichgerichtete Korrelation) oder -1 (ungleichgerichtete Korrelation) liegen. Die Korrektur erfolgt über die vorzeicheninvertierte Beaufschlagung der Verlagerungsvorhersagen in drei Koordinatenrichtungen auf die korrespondierenden Lagesollwerte der Vorschubachsen.

## 3 Abgrenzung des Korrekturverfahrens

Neben der korrelativen Korrektur thermo-elastischer Verlagerungen, bei der wie beschrieben lediglich der Zusammenhang zwischen Temperatur und Verlagerung an der Wirkstelle hergestellt wird, existieren weitere Korrekturlösungen.

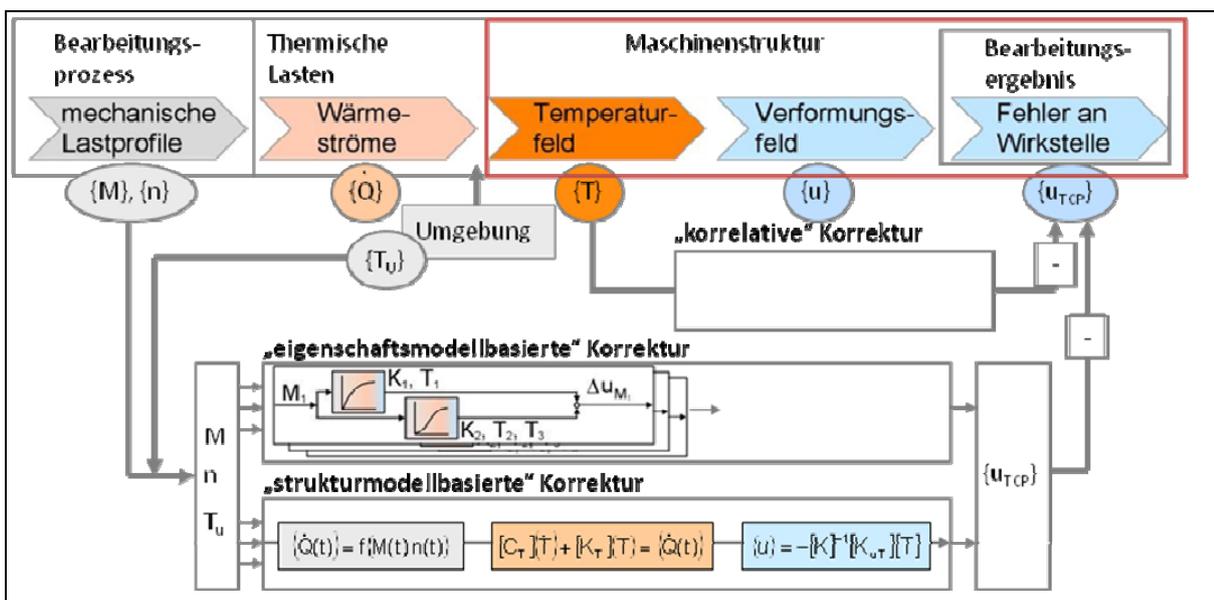


Bild 1: Thermische Wirkungskette und Prinzipdarstellung der Korrekturlösungen

Bei der eigenschaftsmodellbasierten Korrektur [1] werden in der Steuerung mitgeloggte Bewegungs- und Motorstromprofile mittels Übertragungsgliedern zu Verlagerungen an der Werkzeugspitze berechnet. Hier müssen Verstärkungsfaktoren und Zeitkonstanten der Übertragungsglieder aus einer Datenbasis bestimmt werden.

Bei der strukturmodellbasierten Korrektur [2] werden ebenfalls Betriebsdaten erfasst und ausgehend von ihnen, jedes Glied der thermischen Wirkungskette modellseitig in einem abzuarbeitenden unverzweigten Berechnungsablauf abgebildet. Auf diese Weise wird eine zum realen Prozess parallel laufende Vorhersage der thermisch induzierten Verzerrung des Arbeitsraums und damit der Verlagerungen an der Wirkstelle getätigt. Hier bleibt der Strukturbezug auch modellseitig erhalten, es muss jedoch höherer Aufwand betrieben werden, um Verlustleistungen, Kapazitäten, Wärmeübergänge und mechanische Steifigkeiten zu parametrieren.

## 4 Wege zur Gewinnung einer Datenbasis für die korrelative Korrektur

### 4.1 Messtechnische Gewinnung der Datenbasis

Zur Ermittlung der Regressionskoeffizienten ist eine Datenbasis erforderlich, s. o.

Es werden an der Maschine verschiedene Lastprozesse durchlaufen, wobei Temperaturen und Verlagerungen erfasst werden. Dies können z. B. Einzelachsbelastungen, repräsentative Bearbeitungszyklen mit und ohne KSS und Variationen der Umgebungstemperatur (Anheben/Absenken) sein. Die Lastprozesse sind dabei so zu wählen, dass prozesspräsentative Verformungszustände erreicht werden.

Nachteilig ist die zum Einrücken der Maschine notwendige Zeit (Wochen). Jeder Lastfall (Belastungs- und Abkühlphase) erfordert eine Messzeit von ca. einem Tag. Für genau diese Lastfälle ist das korrelative Zustandsmodell für eine ausreichende Anzahl gut gewählter Messstellen präzise. Bei „Verlassen“ der Lastfallcharakteristik können jedoch größere Abweichungen auftreten. Das Verfahren ist demnach begrenzt wirtschaftlich sowie – ohne Anpassungen – für ein breites Lastfallspektrum u. U. nicht geeignet.

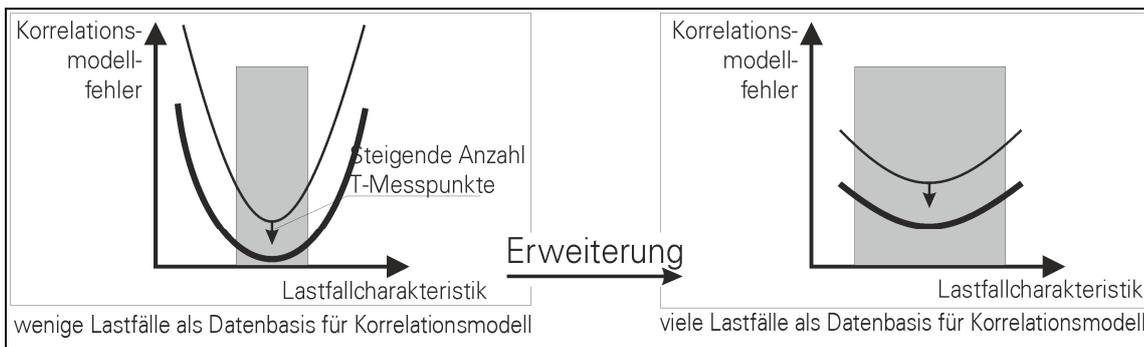


Bild 2: Korrelationsmodellfehler bei unterschiedlich breiten Datenbasen (Prinzip)

### 4.2 Simulative Erweiterung der Datenbasis

Eine Minderung des experimentellen Aufwandes bei gleichzeitiger Erhöhung des Lastfallspektrums ist möglich durch Verbreiterung der messtechnisch gewonnenen Datenbasis mittels FE-Simulationen. Dabei wird ein FE-Modell erstellt und mit einer Mindestanzahl messtechnisch erfasster Lastfälle abgeglichen. Durch Antriebe, Führungen und Lagerungen hervorgerufene Verlustleistungen, veränderliche Umgebungsbedingungen sowie innere und äußere Kühlkreisläufe können modellseitig abgebildet werden. Der Abgleich der berechneten Temperatur- und Verformungsfelder erfolgt vorrangig über die Anpassung der Wärmequellen und Senken.

## 5 Möglichkeiten zur Abbildung struktureller Variabilität in korrelativen Korrekturmodellen

### 5.1 Problemstellung

Unterschiedliche Arbeitspunkte im Arbeitsraum (AR) der Maschine führen bei gleichem Temperatur- bzw. Verformungsfeld zu unterschiedlichen Fehlern am TCP. Dies macht es notwendig, die sich schnell ändernde AR-Position permanent bei der Fehlerkorrektur zu berücksichtigen. Dem thermisch-bedingten Verformungsfeld liegt in aller Regel eine langsame Charakteristik zugrunde, sodass sich während einer Änderung der AR-Position nur vernachlässigbare Änderungen des Temperatur- und Verformungsfeldes ergeben. Aktualisierte Informationen des Temperatur- bzw. Verformungszustandes der Maschine sind daher in aller Regel nur im Minutentakt erforderlich, wohingegen sich bei schnellen Achs-Bewegungen signifikante Änderungen der AR-Position im Millisekunden- bis Sekundenbereich ergeben. Das heißt, durch schnelle Bahnbewegungen ergeben sich schnelle Änderungen in der Transformation der Verformungsfelder der Maschinenbaugruppen auf den Fehler an der Wirkstelle.

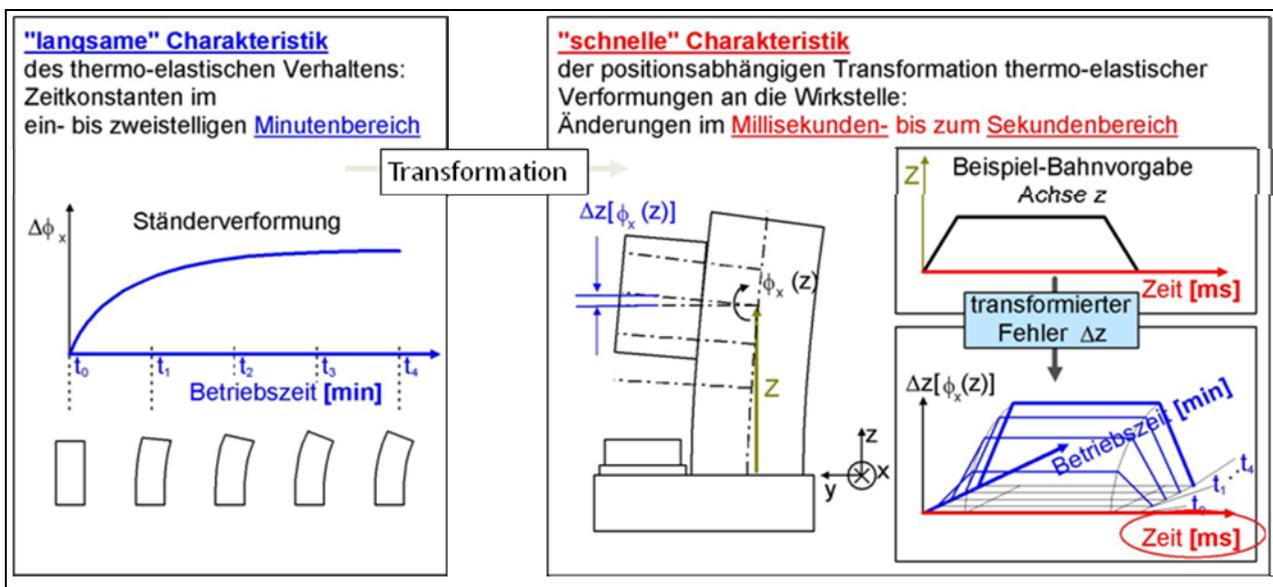


Bild 3: Zeitliches Verhalten des thermo-elastischen Verlagerungsfeldes und der Bewegung im Arbeitsraum

### 5.1 Abbildung von Strukturvariabilität bei 3-Achs-Maschinen

Dieses Verhalten kann mit korrelativen Modellen abgebildet werden, indem nach wie vor die Erfassung von Temperaturen an konkreten Strukturpositionen erfolgt, Verlagerungen jedoch an mehreren Positionen im Arbeitsraum (AR) erfasst werden. Aus der Kombination von Temperaturen und zeitlich zugehörigen Verlagerungen an einer AR-Position lässt sich jeweils ein AR-Positionsbezogenes Korrelationsmodell erstellen. Diese Korrelationsmodelle prognostizieren dann Verlagerungen, die ausschließlich für diese AR-Position zulässig sind. Verlässt die reale Maschine diese AR-Position, so kann zwischen den Korrelationsmodellvorhersagen benachbarter Stützstellen im AR interpoliert werden.

Auch kann für dieses Verfahren eine kombinierte Datenbasis, bestehend aus Mess- und Simulationsdaten, verwendet werden.

### 5.2 Abbildung von Strukturvariabilität bei Maschinen mit zusätzlichen Schwenk-Achsen

Weist die zu korrigierende Maschine neben drei senkrecht aufeinander stehenden Koordinatenachsen auch Dreh- und Schwenkachsen auf, müssen Verformungen (bzw. ihre Verlagerungswirkung am TCP) der Baugruppe "Dreh-/Schwenktisch" und der Baugruppe "Maschinengestell" (hierunter zählen Bett, Ständer sowie die senkrecht zueinander stehenden linearen Achsen) gesondert ermittelt werden, da die Dreh-/Schwenktischverformungen bei

Bewegung der entsprechenden Drehachsen in den kartesischen Koordinatenachsen  $\{x, y, z\}^T$  transformiert werden.

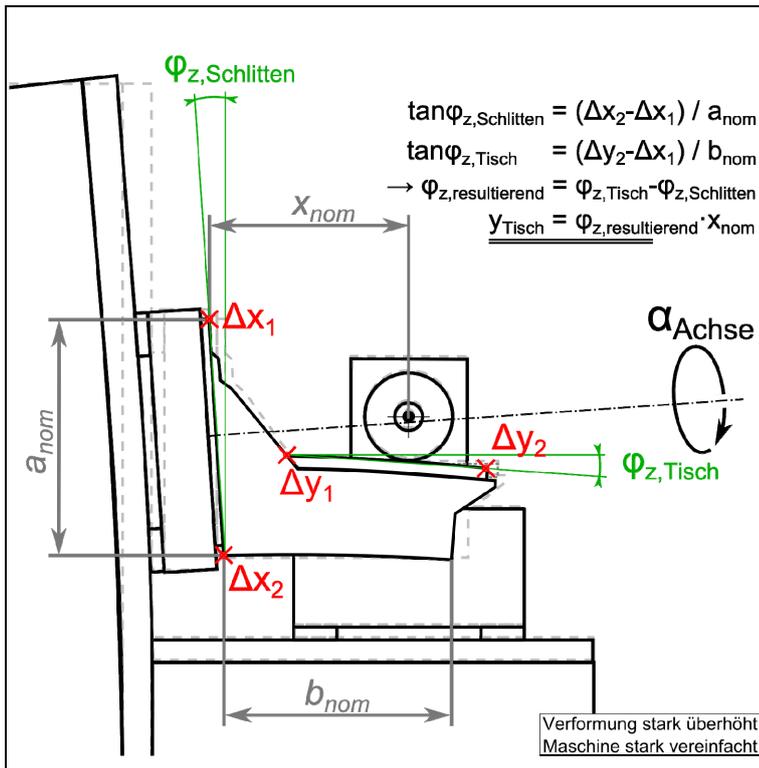


Bild 4: Ermittlung der TCP-wirksamen Verlagerung am Beispiel der  $y$ -Verlagerung eines Dreh-/Schwenktisches

Für den gezeigten Dreh-/Schwenktisch lässt sich die TCP-wirksame Verlagerung des Tisches bei Drehung um die Schwenkachse mit dem Winkel  $\alpha$  in das nicht drehende  $\{x, y, z\}^T$ -Koordinatensystem der Maschine transformieren. Die Summation mit den  $\{x, y, z\}^T$ -Verlagerungsanteilen des Maschinengestells liefert die resultierende Gesamtverlagerung.

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}_{\text{Gesamt}} = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}_{\text{Maschinengestell}} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_{\text{Achse}} & -\sin\alpha_{\text{Achse}} \\ 0 & \sin\alpha_{\text{Achse}} & \cos\alpha_{\text{Achse}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}_{\text{Tisch}}$$

Die getrennte Ermittlung der Datenbasen der Verlagerungsanteile von Maschinengestell und Dreh-/Schwenktisch ist mit erhöhtem Aufwand auch messtechnisch möglich.

Aus Simulationsdaten eines notwendigerweise abgeglichenen FE-Modells lassen sich die Datenbasen für die zwei erforderlichen Korrelationsmodelle für  $\{x, y, z\}^T_{\text{Maschinengestell}}$  und  $\{x, y, z\}^T_{\text{Tisch}}$  durch Auswertung der erforderlichen Temperatur- und Verlagerungskordinaten aber direkter ermitteln.

Bild 5 zeigt das schematische Vorgehen bei der Umsetzung der Berücksichtigung der Strukturvariabilität am Beispiel des bereits in Bild 4 gezeigten Dreh-/Schwenktisches.

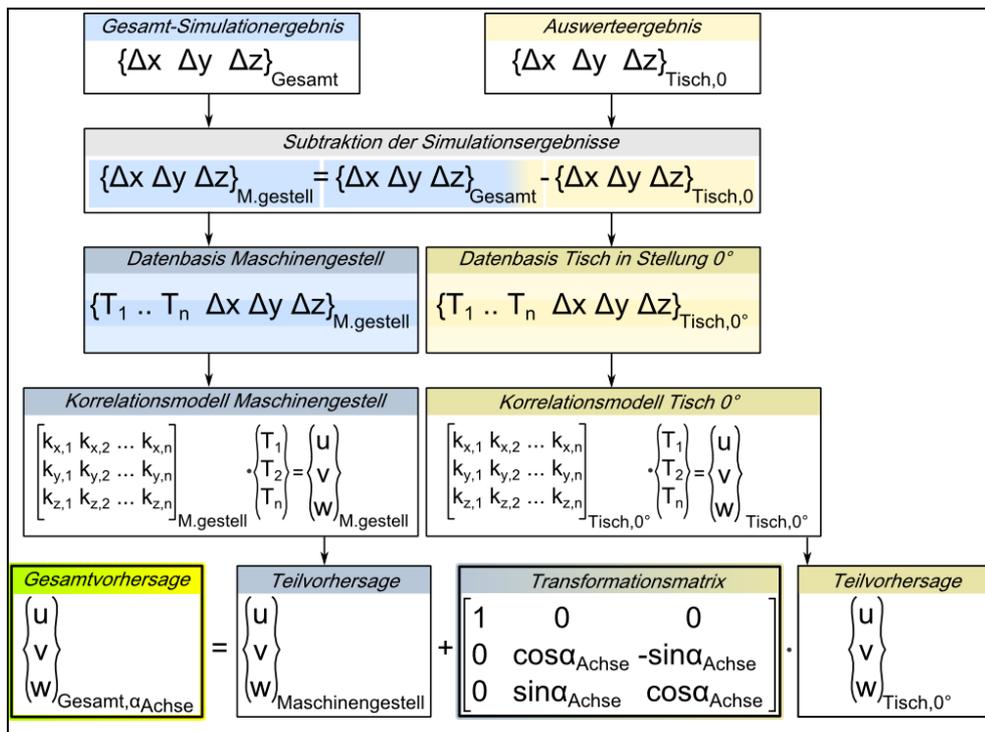


Bild 5: Zusammenfügen der Datenbasen und Transformation der Teil-Korrelationsmodellvorhersagen

## 6 Zusammenfassung

Es wurden Lösungswege vorgestellt,:

- mit denen die Datenbasis von korrelativen Korrekturmodellen mit FE-Simulationsdaten erweitert werden können, wodurch die Versuchsdurchführung in ihrem Umfang begrenzt werden und der Gültigkeitsbereich des Korrelationsmodells verbreitert werden kann,
- mit denen in korrelativen Korrekturmodellen Strukturvariabilität berücksichtigt werden kann, wodurch die AR-positionsabhängige Verlagerung auch mit korrelativen Ansätzen korrigiert werden kann.

## 7 Quellen

- [1]: Brecher, C., Hirsch, P., Weck, M.: Compensation of Thermo-elastic Machine Tool Deformation Based on Control internal Data. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 53, Iss. 1, 2004, pg. 299-304
- [2]: Großmann, K.; Jungnickel, G.; Kauschinger, B.; Mühl, A.; Rehn, S.: Prozessaktuelle strukturmodellbasierte Korrektur thermo-elastischer Fehler. 1. Kolloquium zum SFB/Transregio96, 28./29.11.2011, Dresden (Vortrag, Tagungsband)

Kontakt

C. Städel, A. Mühl

Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, TU Dresden

01062 Dresden, Tel.: 0351 / 463 36102, E-Mail.: christian.staedel@tu-dresden.de, andreas.muehl@tu-dresden.de

# Simulative Erweiterung der Datenbasis zur korrelativen Korrektur thermo-elastischer Verformungen

Möglichkeiten zur Abbildung von Strukturvariabilität

\*Großmann, K., \*Städel, C., \*Mühl, A., \*\*Keim, W.

\*IWM, TU Dresden

\*\*GROB-WERKE GmbH & Co. KG, Mindelheim

---

1

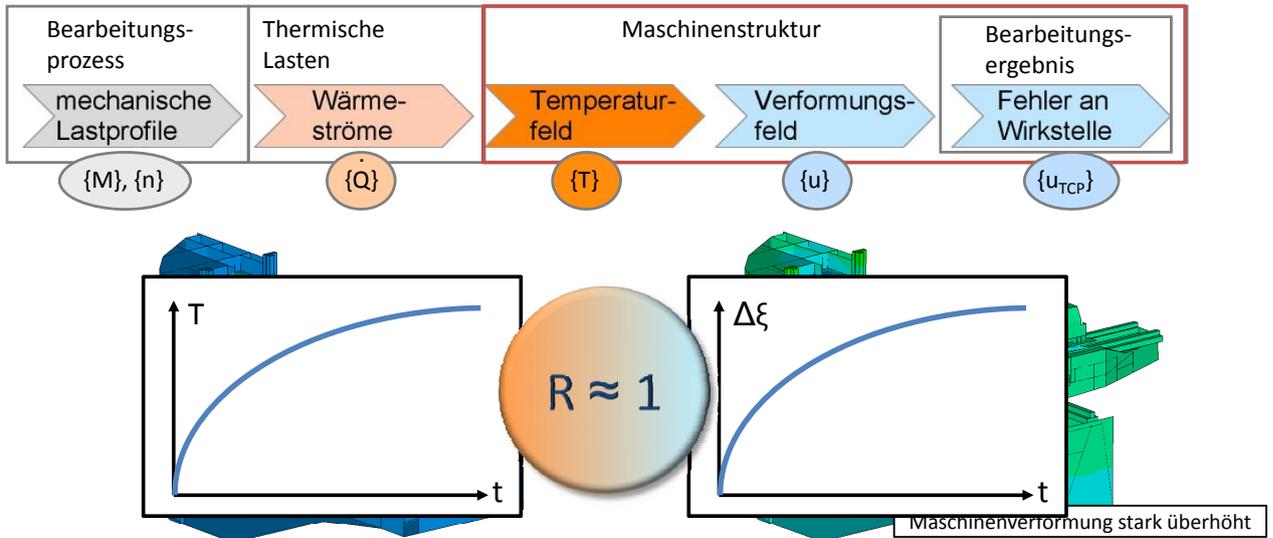
## Vortragsinhalt

- Charakteristik thermo-elastischer Verlagerungen
- Abgrenzung des korrelativen Korrekturverfahrens
- Aufstellung und Erweiterung der Datenbasis mit Hilfe von FE-Simulationen
- Verwendung von Kennfeldbasierten Korrekturverfahren zur Abbildung struktureller Variabilität
- Zusammenfassung

---

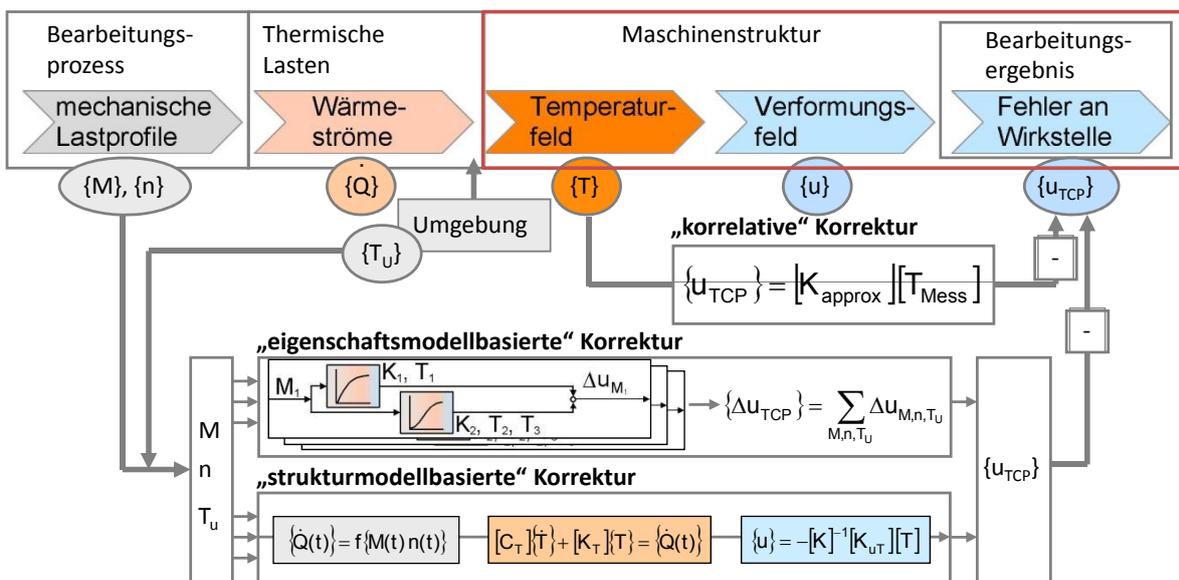
2

### Charakteristik thermo-elastischer Verlagerungen an WZM



- Zeitlich unverzögerter Zusammenhang zwischen Temperatur und Verlagerung
- Linearer Zusammenhang zwischen Temperatur an der Maschinenstruktur und Verlagerung in Koordinatenrichtung ist gegeben

### Abgrenzung des Korrekturverfahrens



### Abgrenzung des Korrekturverfahrens

- Zusammenhang von Temperaturen und Verlagerungen

vollständige Lösung aller FE-Knoten:  $\{\xi\} = -[K^{-1}K_{x,T}] \cdot \{T\}$

- Praktisch muss die Anzahl von Temperaturmessstellen begrenzt werden
- Auswahl an Temperaturmessstellen liefert Regressionslösung (Näherung) (Bedingung  $R \approx 1$ )

Teillösung für ausgewählte Knoten/Messtellen:  $\begin{bmatrix} k_{x,1} & k_{x,2} & \dots & k_{x,n} \\ k_{y,1} & k_{y,2} & \dots & k_{y,n} \\ k_{z,1} & k_{z,2} & \dots & k_{z,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}$

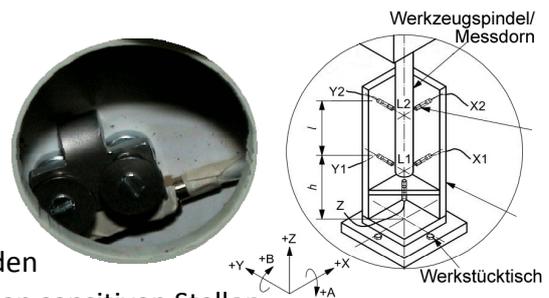
5

### Gewinnung der Datenbasis

#### Messtechnische Gewinnung:

Messläufe bei repräsentativen Lastfällen

- Reale Temperaturfelder müssen erzielt werden
- Reale Verformungszustände müssen erzielt werden
- Temperaturmessstellen an für diese Verformungen sensitiven Stellen
- Erfassung von Temperaturen u. Verlagerungen und Aufnahme in eine Datenbasis
- Mit jedem Lastfall in Datenbasis verbreitert sich Gültigkeit d. Korrelationsmodells**



→ Zeit- und kostenintensive Versuchsdurchführung

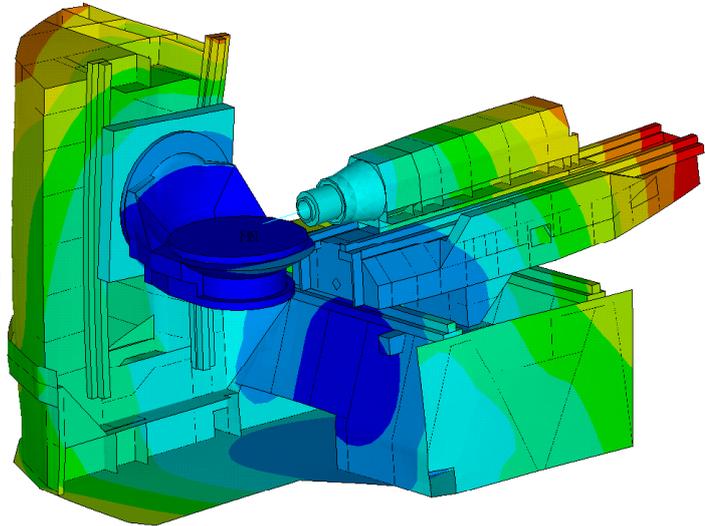
6

Gewinnung der Datenbasis

Simulative Gewinnung bzw. Erweiterung der Datenbasis

Erstellung eines FE-Modells

- Geometrie- und Netzerstellung
- Abbildung von Fluidkreisläufen (innere Kühlung von Gestellen; Kühlung mittels KSS)
- Beaufschlagung von konvektiven und radiativen Lasten
- Beaufschlagung von Wärmeströmen, hervorgerufen durch Antriebe, Führungen, Lagerungen



Ableich mit Messläufen

- Anpassung der Wärmequellen und -senken anhand von Temperatur- und Verformungsgängen

Gewinnung der Datenbasis

Simulative Gewinnung bzw. Erweiterung der Datenbasis

- Ergänzung der Messdaten mit simulierten Messläufen

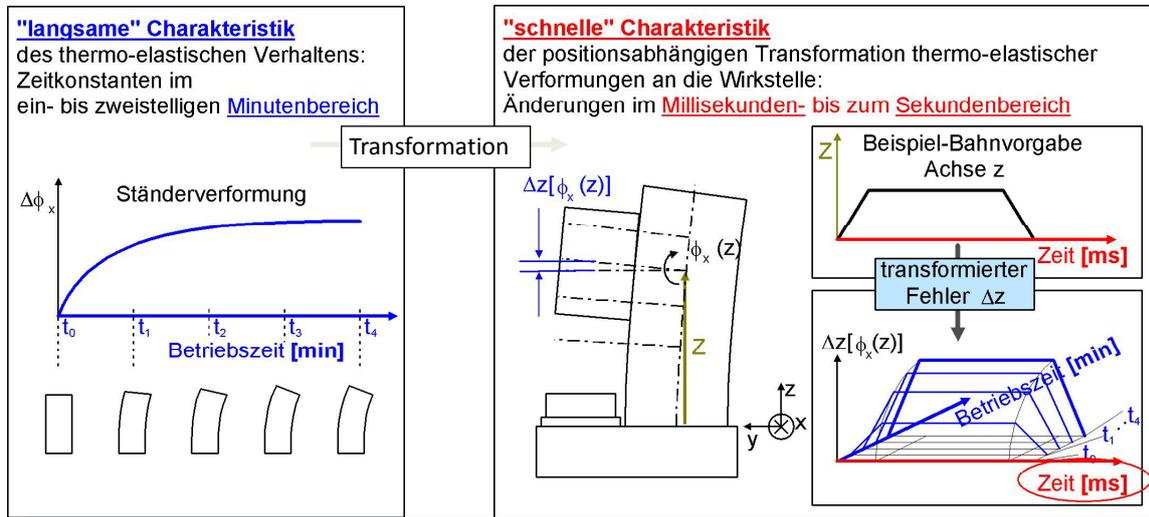
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	...	T <sub>n</sub>	Δx	Δy	Δz
Messungen	20,2° C	20,4° C	...	23,0° C	2μm	10μm	5μm
				...			
FE-Simulationen (typische und dennoch breit gestreute Lastfälle)	22,5° C	21,4° C	...	21,1° C	8μm	1μm	-7μm
	20,1° C	20,5° C	...	23,1° C	1μm	11μm	6μm
				...		...	
				...			
	22,7° C	21,3° C	...	20,9° C	7μm	2μm	-9μm

→ Hieraus Bildung von Regressionskoeffizienten

$$\text{Teillösung für ausgewählte Knoten/Messtellen: } \begin{bmatrix} k_{x,1} & k_{x,2} & \dots & k_{x,n} \\ k_{y,1} & k_{y,2} & \dots & k_{y,n} \\ k_{z,1} & k_{z,2} & \dots & k_{z,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{Bmatrix}$$

## Möglichkeiten der Abbildung von Strukturvariabilität

- Für unterschiedliche Arbeitspunkte im Arbeitsraum führt ein gleiches Temperatur- / Verformungsfeld zu unterschiedlichen Fehlern am TCP
- Bei **vereinfachter Annahme freier Dehnungen** ist das „nur“ ein poseabhängiges Transformationsproblem.

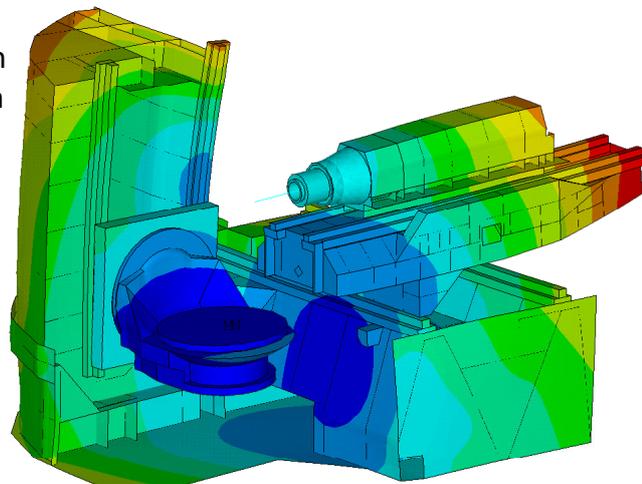
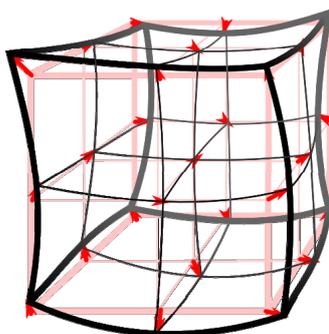


9

## Möglichkeiten der Abbildung von Strukturvariabilität

### Berücksichtigung von Strukturvariabilität in kartesischen Koordinatenrichtungen

- Berechnung des Temperaturfeldes
- Berechnung der thermo-elastischen Verformung für mehrere Positionen des TCP im Arbeitsraum:



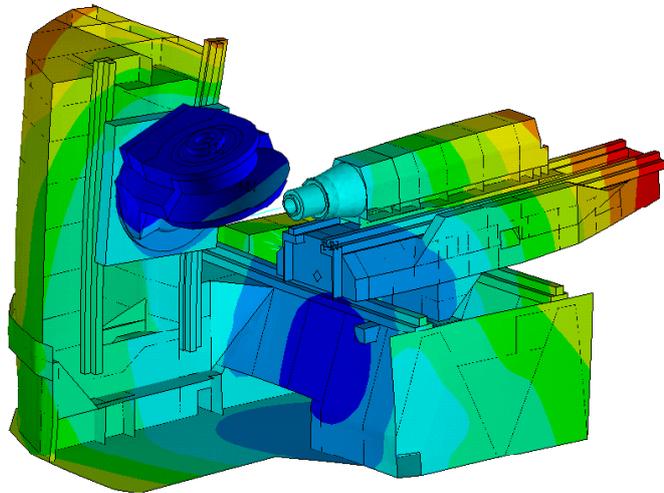
- Erstellen von Korrelationsmodellen entsprechend Anzahl der Stützstellen
- Interpolation zwischen den Vorhersagen der Korrelationsmodelle mit parabolischen Interpolationspolynom

10

## Möglichkeiten der Abbildung von Strukturvariabilität

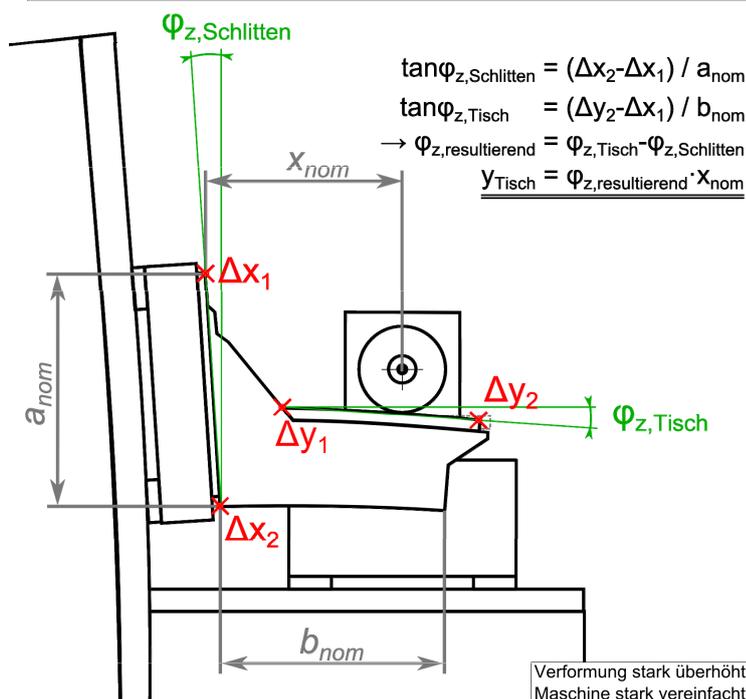
### Berücksichtigung bei Schwenkbewegungen

- TCP-wirksame Verlagerungsanteile des Schwenktisches werden im kartesischen Koordinatensystem durch Drehbewegung transformiert



11

## Möglichkeiten der Abbildung von Strukturvariabilität



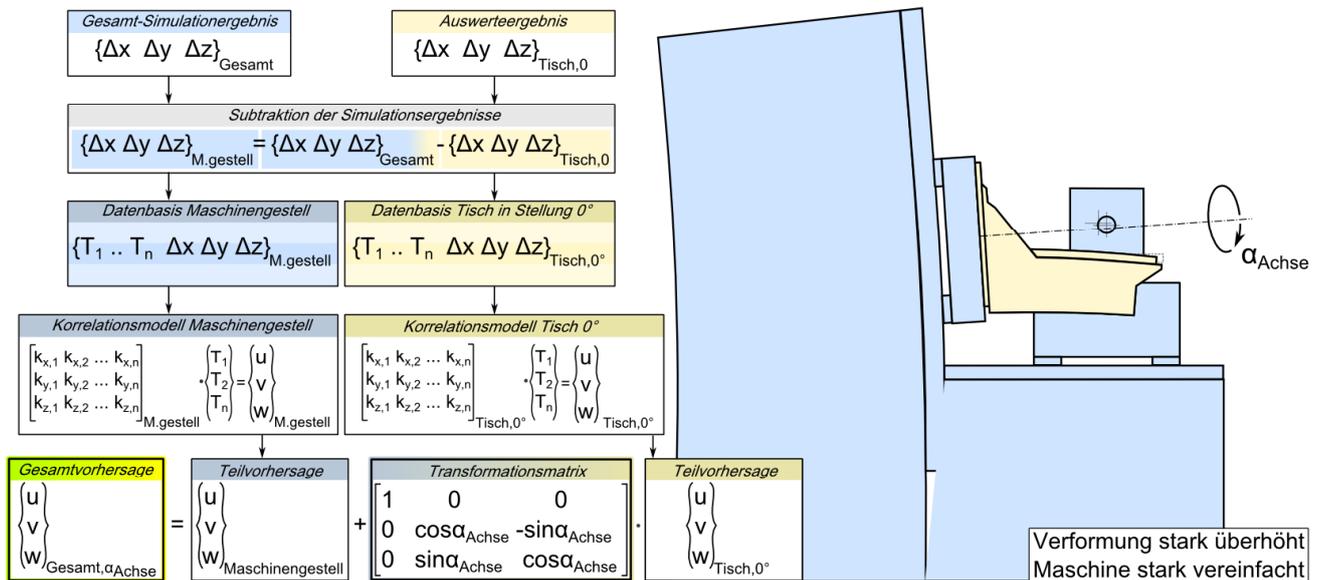
### Vorgehen in Simulation

- Auswertung d. Verlagerungen von Knoten an Teilstrukturbegrenzenden Positionen
- Berechnung von Verlagerungsanteilen über Geometriebedingungen
- Äquivalentes Vorgehen für Verlagerungsanteile des Schwenktisches in anderen Koordinatenrichtungen

$$\Rightarrow \begin{Bmatrix} x_{\text{Tisch}} \\ y_{\text{Tisch}} \\ z_{\text{Tisch}} \end{Bmatrix}$$

12

## Möglichkeiten der Abbildung von Strukturvariabilität



13

## Zusammenfassung

Es wurden Lösungswege vorgestellt, mit denen:

- die Datenbasis von korrelativen Korrekturmodellen mit FE-Simulationsdaten erweitert werden können
  - Verringerung des messtechnischen Aufwands
  - Verbreiterung des Gültigkeitsbereichs
- in korrelativen Korrekturmodellen Strukturvariabilität berücksichtigt werden kann
  - Korrektur der AR-positionsabhängigen Verlagerung

14

## **Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.**

Gedankt wird für:

- die Zusammenarbeit mit der Fa. GROB-WERKE GmbH und Co. KG, Mindelheim
- Impulse zur Abbildung von Strukturvariabilität aus dem Teilprojekt B07 des DFG-SFB/TR 96

# **Materialeffekte und Funktionsmechanismen zur Wärmefluss-Steuerung**

Priv.-Doz. Dr.-Ing. W.-G. Drossel; M.Sc. A. Bucht;  
Dipl.-Ing. Ch. Ohsenbrügge

Fraunhofer IWU, Chemnitz

# MATERIALEFFEKTE UND FUNKTIONSMECHANISMEN ZUR WÄRMEFLUSS-STEUERUNG

Priv.-Doz. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel, André Bucht, Christoph Ohsenbrügge

## 1 Einleitung

Eine besondere Herausforderung in der thermischen Stabilisierung von Werkzeugmaschinen stellen temporär wirksame Wärmequellen wie beispielsweise die Hauptspindel dar. Durch zeitlich und betragsmäßig variable Wärmeströme wird das Erreichen eines thermisch konstanten Beharrungszustandes erschwert. Der Aufwand zur Korrektur solcher thermischen Verlagerungen steigt überproportional mit der Inhomogenität des Temperaturfeldes. Somit bieten Lösungen zur aktiven Verstetigung des thermischen Feldes auf der Komponentenebene ein großes Potential zur Verbesserung des thermischen Gesamtverhaltens einer Werkzeugmaschine.

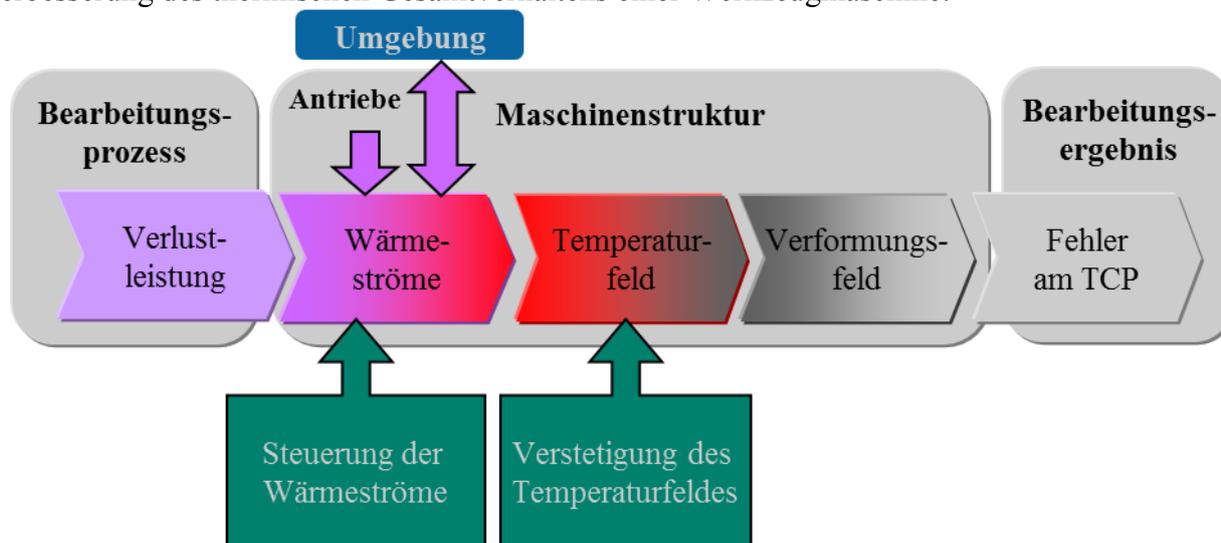


Bild 1: Eingriffstellen in die thermo-elastische Wirkungskette der Werkzeugmaschine

Basierend auf der thermo-elastischen Wirkungskette (siehe

Bild 1: Eingriffstellen in die thermo-elastische Wirkungskette der Werkzeugmaschine) der Werkzeugmaschine erfolgt ein Eingriff also bereits bei der Auswirkung auftretender Wärmeströme auf das Temperaturfeld.

Um eine Beeinflussung auf das thermische Übertragungsverhalten zu erreichen, werden neuartige Werkstoffe untersucht. Durch ein Einbringen zusätzlicher Wärmekapazitäten kann die thermische Trägheit einzelner Komponenten gezielt beeinflusst werden. Dies bewirkt eine zeitliche Glättung von thermischen Schwankungen und somit kann ein thermischer Beharrungszustand auch unter Einfluss variabler Wärmeströme länger aufrechterhalten werden. Jedoch führt eine solcherart erhöhte thermische Trägheit auch zu einem geänderten transienten Verhalten außerhalb des Beharrungszustandes. Ein thermisches Gleichgewicht wird verzögert erreicht, was zu einer verlängerten Einlaufphase der Maschine führen würde. Um dieser Auswirkung entgegen zu wirken, wird die zusätzliche Wärmekapazität über einen verstellbaren Wärmeübertragungsweg mit der Komponente verbunden. So kann der Puffer in der Einlaufphase thermisch von der Komponente isoliert werden und erst bei Erreichen des Beharrungszustandes thermisch angekoppelt werden.

## 2 Zusätzliche Wärmekapazitäten

Als zusätzliche Wärmekapazität werden Phasenwechselmaterialien (Phase Change Material – PCM) untersucht. Sie zeichnen sich durch hohe Umwandlungsenthalpien bei thermodynamischen Zustandsänderungen aus. Diese Eigenschaft ermöglicht die Aufnahme bzw. Abgabe großer Wärmemengen bei geringer Änderung der Temperatur in der Nähe der Phasenumwandlungstemperatur.

Kommerziell verfügbare PCM auf Basis von Paraffin weisen eine Schmelzenthalpie von über 200 kJ/kg auf.

Dies entspricht der thermischen Speicherfähigkeit von 150kg Baustahl bei einem Temperaturintervall von 3K. Zur Absorption großer Wärmemengen in einem thermischen Puffer ist eine ausreichende Verteilung innerhalb des Speichers wichtig. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Paraffins ist diese jedoch erschwert. Um die thermische Leitfähigkeit innerhalb der Speicher-komponente zu verbessern, wird das PCM in eine Matrix aus Metallschaum eingebettet. Metallschäume aus beispielsweise Aluminium weisen eine ausreichend hohe Wärmeleitfähigkeit auf, um einen Wärmetransport im thermischen Speicher zu ermöglichen. Dabei entsteht ein Zielkonflikt zwischen thermischer Leitfähigkeit und Speicherfähigkeit des Verbundmaterials aus Metallschaum und PCM (siehe Bild 3). Zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit ist eine geringere Porosität wünschenswert, was jedoch durch den geringeren Anteil an PCM die Speicherfähigkeit verringert. Je nach Randbedingung und Anforderung ist somit eine passende Kombination aus Metallschaum und PCM zu wählen. Entscheidende Faktoren sind dabei die zu kompensierenden Wärmeströme, die je nach Höhe die Wärmeleitfähigkeit bestimmen, sowie die absolute Wärmemenge, die sich aus zeitlicher und betragsmäßiger Komponente des zu kompensierenden Wärmestromes ergibt.

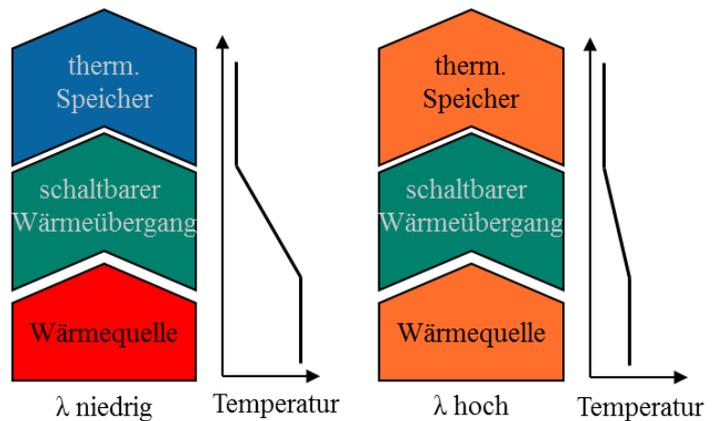


Bild 2: Prinzip der thermischen Beeinflussung durch thermischen Speicher und

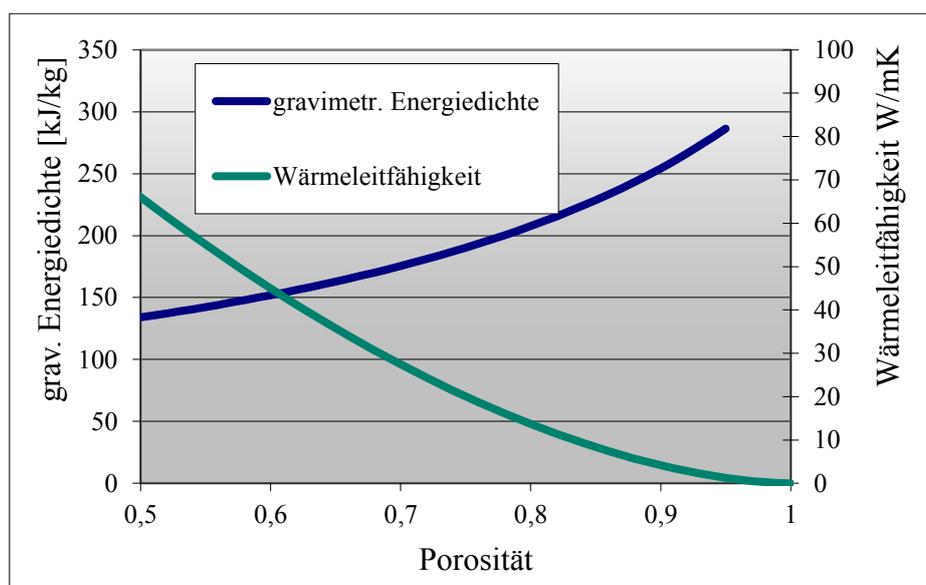


Bild 3: Zielkonflikt zwischen Energiedichte und Wärmeleitfähigkeit im Speicher

### 3 Steuerbare Wärmeleitung

Zur Veränderung der Wärmeübertragungseigenschaften werden im Rahmen des Projektes zwei verschiedene Materialeffekte betrachtet: Die Reaktion thermischer Formgedächtnislegierungen auf das thermische Feld sowie magnetorheologischer Fluide auf das magnetische Feld.

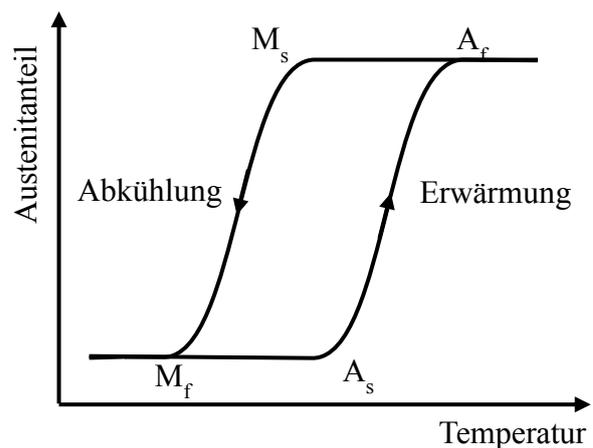
#### 3.1 Thermische Formgedächtnislegierungen

Mithilfe thermischer Formgedächtnislegierungen kann als Reaktion auf eine Änderung im thermischen Feld mechanische Arbeit verrichtet werden. Der Effekt beruht auf einer temperatur- und spannungsinduzierten Gefügeumwandlung im Material. Unterhalb einer Umwandlungstemperatur kann der Werkstoff scheinbar plastisch verformt werden. Eine Erhöhung der Temperatur über die Umwandlungstemperatur hinweg bewirkt eine Rückverformung in den eintrainierten Ursprungszustand. Wird diese Rückumwandlung gegen ein mechanisches System wie eine Feder oder ein Festkörpergelenk ausgeführt, so wird hierbei mechanische Arbeit verrichtet.

Der Formgedächtniseffekt kann genutzt werden, um das thermische Übertragungsverhalten von Strukturen zu beeinflussen. Zum einen ändert sich die Wärmeleitfähigkeit des Materials bei der Gefügeumwandlung. Zwischen der martensitischen Struktur unterhalb der Umwandlungstemperatur und der austenitischen Struktur darüber verändert sich die thermische Leitfähigkeit um den

Faktor zwei. Zum anderen kann die mechanische Wirkung von Strukturen aus FGL genutzt werden, um thermische Kontaktbedingungen zu beeinflussen. Sowohl geometrische Änderungen, die ein Öffnen und Schließen thermischer Übertragungswege bewirken können, also auch eine Änderung von Anpressdrücken im Kontakt spielen hierbei eine Rolle.

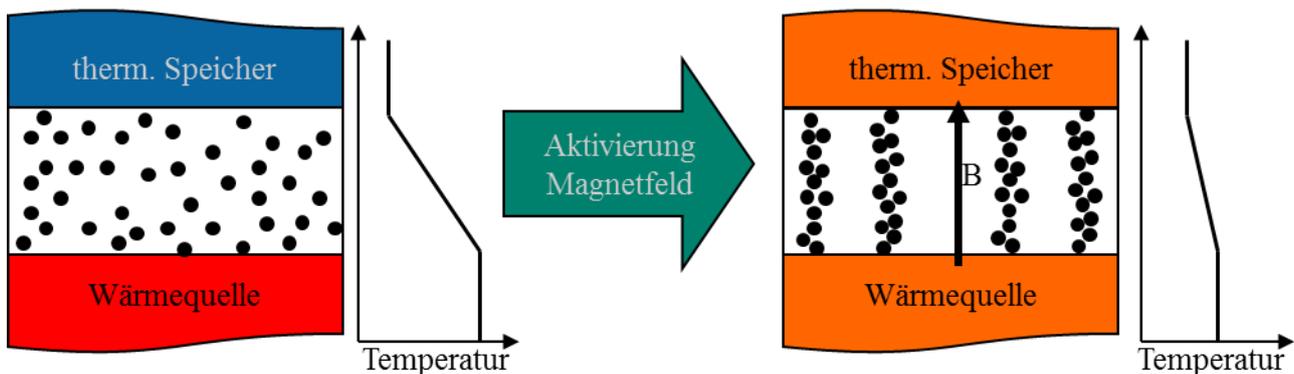
Die nötige thermische Energie zur Aktivierung des Formgedächtniseffektes kann entweder aktiv zugeführt werden oder dem Prozess entnommen werden. Die Nutzung vorhandener Prozesswärme ist attraktiv, da hierdurch eine autarke, selbstregelnde Anordnung möglich wird. Durch thermische Ankopplung eines Aktors aus Formgedächtnismaterial an die thermisch zu stabilisierende Komponente erfolgt eine direkte Abhängigkeit des Schaltzustandes von der Temperatur der Komponente. Überschreitet die Komponente die Umwandlungstemperatur, so kann ein thermischer Übertragungsweg geschlossen werden und damit die zusätzliche Wärmekapazität zugeschaltet werden, um eine thermische Stabilisierung zu ermöglichen. Sinkt die Temperatur wieder unter die Temperaturschwelle für die Rückumwandlung, so wird die Wärmebrücke wieder geöffnet und der thermische Speicher somit vom System isoliert. Besondere Beachtung benötigt bei einer solchen Anordnung die Umwandlungshysterese von FGL (siehe *Bild 4*). Die Gefügeumwandlung von Martensit zu Austenit erfolgt bei einer höheren Temperatur als die Rückumwandlung zum Martensit.



*Bild 4: Umwandlungshysterese thermischer Formgedächtnislegierungen*

### 3.2 Magnetorheologische Fluide

Magnetorheologische Fluide bestehen aus einer Suspension ferromagnetischer Partikel und einem Trägerfluid. Die Partikel werden unter Einfluss eines externen Magnetfeldes magnetisiert und ordnen sich entlang der Feldlinien zu Ketten an, wie in *Bild 5* angedeutet. Als Folge dieser Ausrichtung ändern sich die mechanischen Eigenschaften der Suspension. Zusätzlich zu den bereits bekannten und genutzten mechanischen Effekten ergibt sich durch die Ausrichtung der gut wärmeleitenden Partikel auch eine Änderung der thermischen Eigenschaften: entlang der Ketten erhöht sich die thermische Leitfähigkeit des Fluides.



*Bild 5: Prinzip der schaltbaren Wärmeleitung mittels magnetorheologischer Fluide*

## 4 Zusammenfassung

Das Konzept variabel zuschaltbarer thermischer Speicher ermöglicht eine aktive Beeinflussung der Wärmeströme und dadurch des Temperaturfeldes. Durch die dämpfende Wirkung der erhöhten Wärmekapazität werden thermische Spitzenlasten abgeschwächt und die zeitliche Schwankung der Temperatur und damit thermisch bedingter Verlagerungen verringert. Dies ermöglicht auch eine Unterbrechung des Dauerbetriebes der thermischen Grundlasten in einer Werkzeugmaschine, ohne dabei Genauigkeitseinbußen durch das Verlassen des Beharrungszustandes zu hinnehmen zu müssen.

---

# MATERIALEFFEKTE UND FUNKTIONSMECHANISMEN ZUR WÄRMEFLUSS-STEUERUNG

---



---

© Fraunhofer IWU  
Dr. Drossel



---

# MATERIALEFFEKTE UND FUNKTIONSMECHANISMEN ZUR WÄRMEFLUSS-STEUERUNG

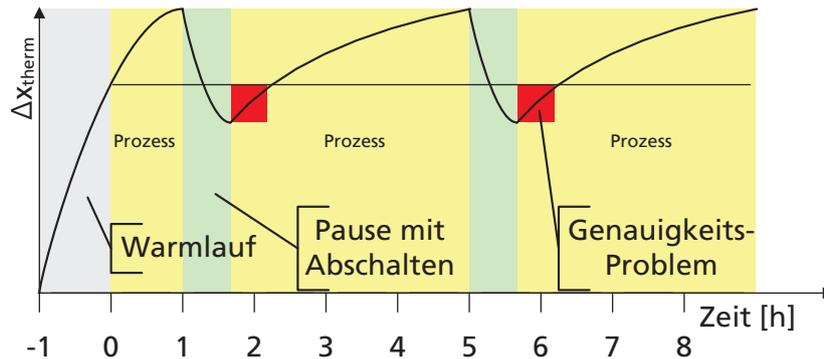
1. Lösungsansatz
2. Thermischer Speicher
  - Phase-Change-Material (PCM)
3. Schaltbarer Wärmeübergang
  - Formgedächtnislegierungen (FGL)
  - Magnetorheologische Fluide (MRF)



# 1. Lösungsansatz

## 1.1 Problemstellung

- konventionelle Genauigkeitssicherung:  
thermosymmetrischer Aufbau, Betrieb im Beharrungszustand ...
- dazu dauerhafter Betrieb von Grundlasten  
→ Bearbeitungspausen bieten Potential für Energieeinsparungen
- ohne zusätzliche Maßnahmen entstehen Genauigkeitsprobleme



16. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar, 21./22.03.2013, Dresden

© Fraunhofer IWU  
Dr. Drossel  
3

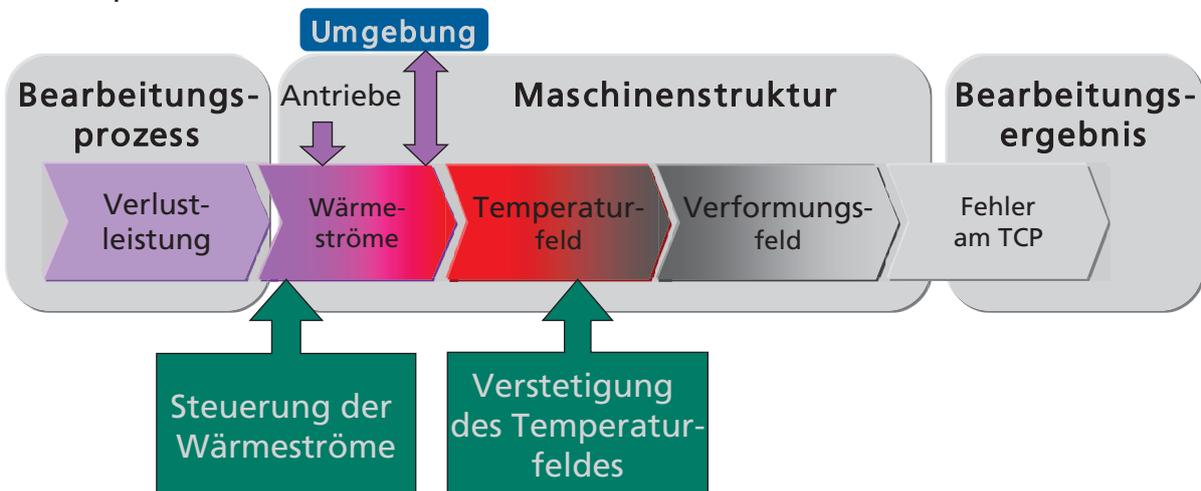


Fraunhofer  
IWU

# 1. Lösungsansatz

## 1.2 thermo-elastische Wirkungskette

- Aufrechterhaltung des thermischen Beharrungszustandes durch Beeinflussung von Wärmeströmen und Versteifung des Temperaturfeldes



16. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar, 21./22.03.2013, Dresden

© Fraunhofer IWU  
Dr. Drossel  
4

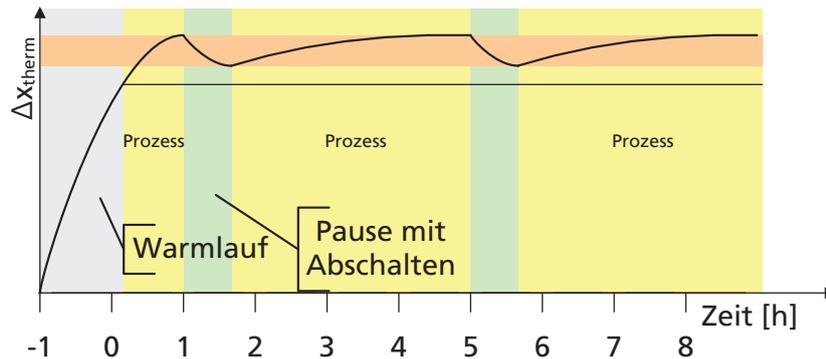


Fraunhofer  
IWU

# 1. Lösungsansatz

## 1.3 thermischer Speicher

- zeitliche Glättung thermischer Schwankungen durch zusätzliche Wärmekapazität
- längeres Verbleiben im Beharrungszustand verhindert Genauigkeitsprobleme
- erhöhte thermische Trägheit führt jedoch zu längerem Warmlauf



16. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar, 21./22.03.2013, Dresden

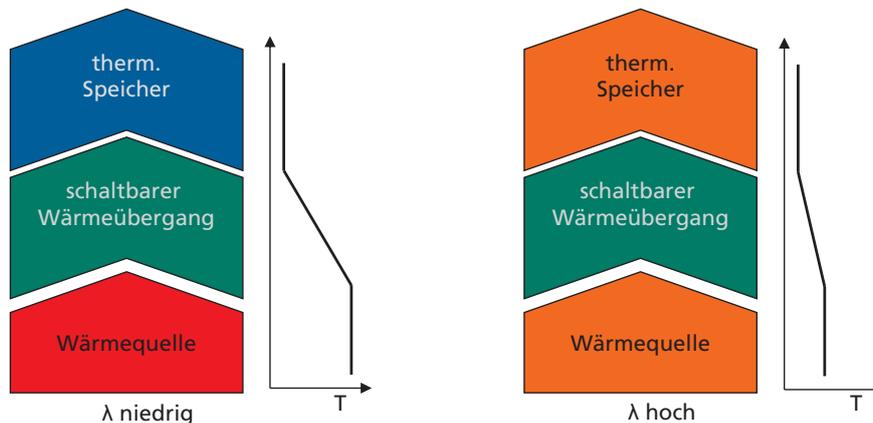
© Fraunhofer IWU  
Dr. Drossel  
5



# 1. Lösungsansatz

## 1.4 schaltbare Wärmeleitung

- gezielte An- und Abkopplung der zusätzlichen thermischen Trägheit
- aktiv oder passiv gesteuerte Beeinflussung von Wärmeströmen



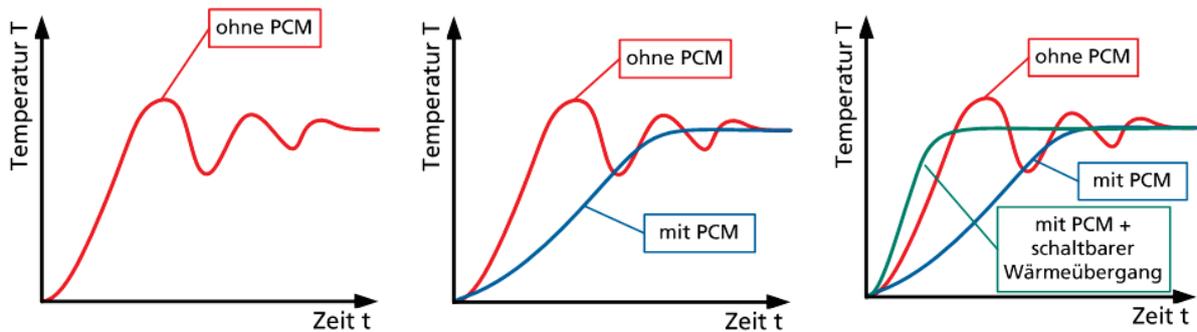
16. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar, 21./22.03.2013, Dresden

© Fraunhofer IWU  
Dr. Drossel  
6



# 1. Lösungsansatz

## 1.5 Gesamtprinzip



16. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar, 21./22.03.2013, Dresden

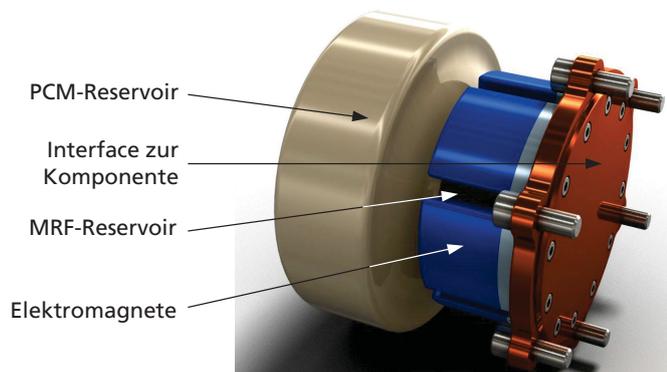
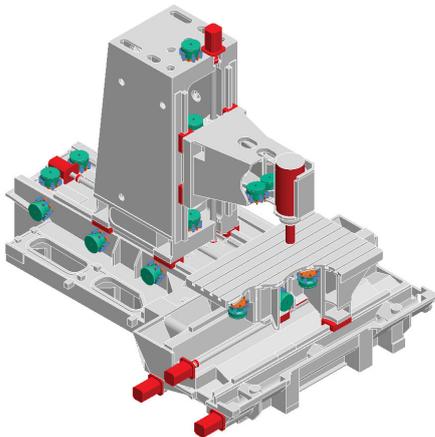
© Fraunhofer IWU  
Dr. Drossel  
7



# 1. Lösungsansatz

## 1.6 Gesamtprinzip

- thermische Stabilisierung auf Komponentenebene
- Anordnung an temporär wirksamen Wärmequellen (z.B. Hauptspindel)
- Auslegungskriterien für unterschiedliche thermische Randbedingungen



16. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar, 21./22.03.2013, Dresden

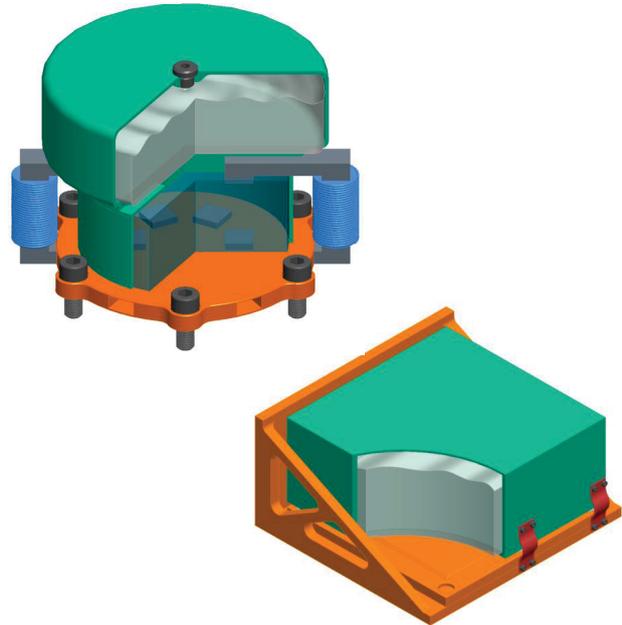
© Fraunhofer IWU  
Dr. Drossel  
8



# 1. Lösungsansatz

## 1.7 untersuchte Mechanismen und Materialeffekte

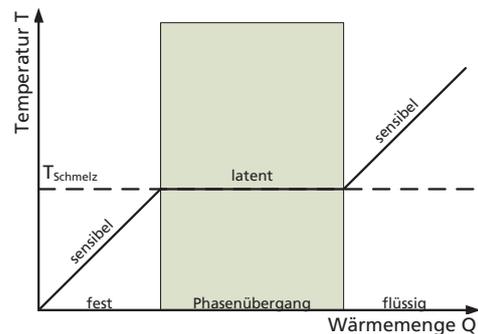
- thermischer Speicher
  - Phase-Change-Material als zusätzliche thermische Trägheit
  - Metallschaum als Trägerstruktur
- schaltbare Wärmeleitung
  - Formgedächtnislegierungen
  - Magnetorheologische Fluide



# 2. Thermischer Speicher

## 2.1 Phase-Change-Material (PCM)

- Material mit hoher Schmelzenthalpie
- Mögliche Schmelztemperaturen von  $-10\text{ °C}$  bis  $+100\text{ °C}$
- 1 kg PCM speichert bei Temperaturanstieg um 3 K (Schmelzbereich) soviel wie 150 kg Baustahl
- untersuchtes Material: Paraffin-Wachs (Phasenübergang von fest nach flüssig)



## 2. Thermischer Speicher

### 2.2 Metallschaummatrix

- Paraffin weist geringe Wärmeleitfähigkeit auf
- durch Einbringen in eine Metallschaummatrix wird Wärmeverteilung im Speicher gewährleistet
- Zielkonflikt: speicherbare Wärme gegen Wärmeleitfähigkeit
- Metallschaum gibt mechanische Stabilität und Bindung in flüssiger Phase

reines PCM		Werkstoffverbund
0,2 W/mK	$\lambda$	20 W/mK
213.500 J/kg	$h_{lat}$	94.300 J/kg
880 kg/m <sup>3</sup>	$\rho$	1254 kg/m <sup>3</sup>
2.100 J/kgK	$c_p$	1.430 J/kgK
245.000 J/kg	Q	115.700 J/kg

0,7 g/cm<sup>3</sup>,  
85% Infiltration  
 $\Delta T = 15 K$   
Massenanteile:  
44 % PCM  
56 % Aluminium

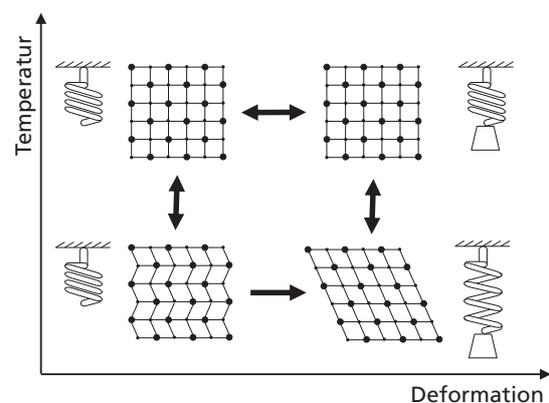
© Fraunhofer IWU  
Dr. Drossel  
11



## 3. Schaltbarer Wärmeübergang

### 3.1 Formgedächtnislegierungen (FGL)

- aktiver Werkstoff, der auf thermisches Feld reagiert
- Spannungs-Dehnungs-Verhalten ist abhängig von Temperatur und Last
- Formgedächtnis-Effekt ermöglicht aktorische Wirkung
- 4 % Dehnung möglich (abhängig von Zyklenzahl und Last)
- Blockierkräfte bis 200 N/mm<sup>2</sup>



### 3. Schaltbarer Wärmeübergang

#### 3.2 FGL: Mechanismen

- aktorische Wirkung ermöglicht geometrische Änderung von Kontaktbedingungen

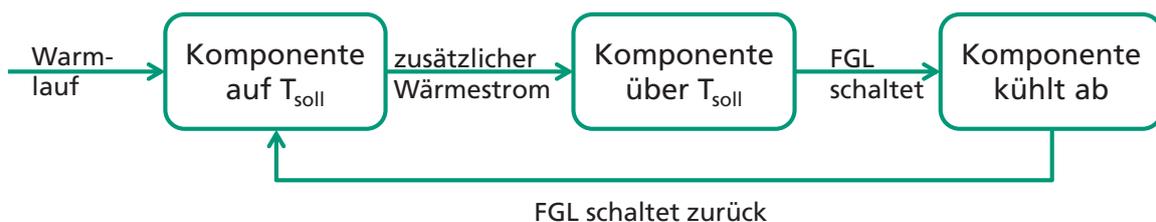


- zusätzlich zu geometrischer Änderung (Kontakt → kein Kontakt) kann durch Blockierkraft der Anpressdruck variiert werden
- erhöhter Anpressdruck bewirkt eine bessere Kontaktwärmeleitfähigkeit
- Wärmeleitfähigkeit des Materials unterscheidet sich je nach Gitterzustand (Faktor 2)

### 3. Schaltbarer Wärmeübergang

#### 3.3 FGL: autarke Arbeitsweise

- Erwärmung des Aktors über Umwandlungstemperatur kann aktiv über Heizelemente oder Joulesche Wärme sowie autark durch Prozessenergie erfolgen
- durch autarke Arbeitsprinzip ist ein selbstregulierendes System ohne zusätzliche Sensorik möglich

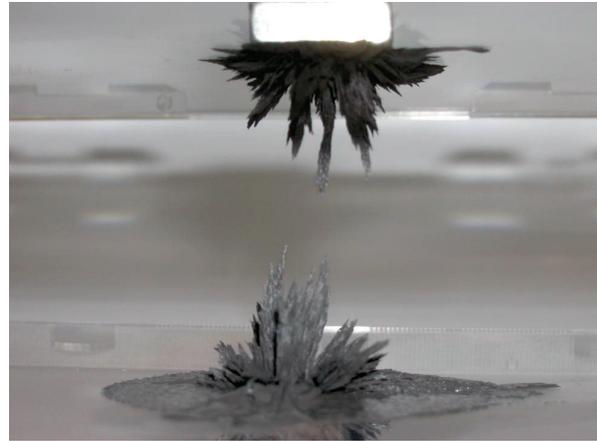


- bei autark agierendem System muss Temperaturhysterese des FGL berücksichtigt werden (10 – 30 K)

### 3. Schaltbarer Wärmeübergang

#### 3.4 Magnetorheologische Fluide (MRF)

- Suspension ferromagnetischer Partikel in Trägerfluid
- durch externes Magnetfeld werden Partikel polarisiert und bilden Ketten entlang der magnetischen Feldlinien
- kommerziell eingesetzt als Fluid mit einstellbaren mechanischen Eigenschaften



### 3. Schaltbarer Wärmeübergang

#### 3.5 Magnetorheologische Fluide (MRF)

- ferromagnetische Partikel weisen wesentlich höhere thermische Leitfähigkeit auf als Trägerfluid
- Beispiel: Eisenpartikel (80 W/mK) in Silikonöl (0,14 W/mK)
- Wärmeleitfähigkeit der Suspension hängt vom Partikelanteil ab
- unter Magnetfeldeinfluss gebildete Ketten aus Eisen ergeben eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Dipl.-Ing. Christoph Ohsenbrügge

 Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

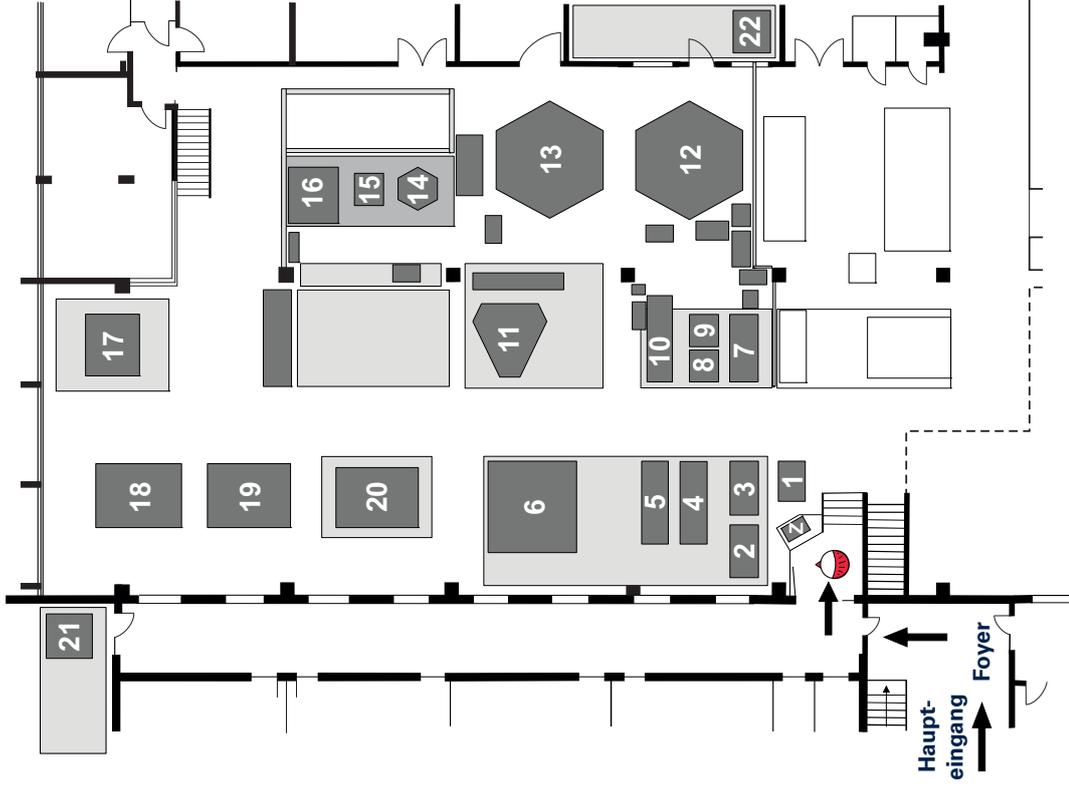
Nöthnitzer Str. 44, 01187 Dresden

 +49 (0)351 / 4772 – 2342

 [christoph.ohsenbruegge@iwu.fraunhofer.de](mailto:christoph.ohsenbruegge@iwu.fraunhofer.de)



- (Z) **Zahnrad-Profilfräsmaschine**  
Brown & Sharpe MFG. Co., USA, Patented 1900/1908
- (1) **Hauptspindeln**  
Schnittmodell, Lagerungen
- (2) **Hauptspindeln**  
Laufgenauigkeit (Lehrversuchsstand)
- (3) **Hauptspindeln**  
Lagerungsvergleich (Lehrversuchsstand)
- (4), (5) **Profilschienenführungen**  
Lebensdauer, Reliabilität, Genauigkeit für Führungen bis Größe 35 (Universalprüfstände)
- (6) **DMU 80 eVo linear**  
5-Achs-Fräs-/Drehmaschine mit Direktantrieben
- (7) **Hauptspindeln**  
Motorspindel mit aktiver Magnetlagerung
- (8) **Vorschubachse mit Linearmotor**  
Dynamik von Baugruppen  
Eigenfrequenz-, Schwingform-, Frequenzgang- und Dämpfungsermittlung
- (9) **Elementarversuche Thermik**
- (10) **Vorschubachse mit Linearmotor**  
Impulskopplung, Impulskompensation
- (11) **Versuchsträger MAX**  
Dynamik, Leichtbau, Präzision
- (12) **Hexapod FELIX I**
- (13) **Hexapod FELIX II**  
Flexibles Bearbeitungszentrum mit Freiheitsgrad 6
- (14) **Hexapod MINIHEx**  
Flexibles Bearbeitungszentrum mit Freiheitsgrad 6
- (15) **Modelverification thermoelastischer Modelle**  
Bearbeitungszentrum, Flexibilität von Werkzeugkonfiguration und Werkstückhandlung
- (16) **Nahbereichsphotogrammetrie**  
Optische Posemessung
- (17) **Kurbelpresse**
- (18) **CNC-Presse**  
Energieeffizienzuntersuchungen
- (19) **Pressenzelle**  
Heißpressen von Verbundwerkstoffen
- (20) **Hydraulische Doppelständerpresse HPV 160**  
Technologische und simulationsbegleitende Untersuchungen
- (21) **SPS-Labor**  
SPS-Programmierung
- (22) **CNC-Labor**  
CAD/CAM, NC-Programmierung



# **Präsentationen im Werkzeugmaschinen-Versuchsfeld Kutzbach-Bau**

## **Versuchsträger MAX**

für eine Hochgeschwindigkeits-Leichtbau-Genauigkeitsmaschine

- Konstruktion des Versuchsträgers
- Elastische Schlittenanbindung zur Neigungskorrektur
- Impulskompensation mittels Sollbahnberechnung an einem Kreuzschlitten
- Impulskompensierter Kreuzschlitten
- Räumliche Kraftmessung in sechs Freiheitsgraden

## **Thermik**

- Vorversuche zur Selektiven Thermografie
- Messung von Fugeneigenschaften
- Photogrammetrische Deformationsmessung
- Kalibrierfeld für Photogrammetrie und Thermografie
- Selektive Thermografie an einem Werkzeugmaschinen-Ständer

## **Bildverarbeitung**

- Photogrammetrisches Tracking  
am Beispiel des MiniHex
- Photogrammetrische Posemessung  
am Beispiel des Linearachs-Versuchsstandes

## **Sonstiges**

- Generierung effizienter Netzwerkmodelle aus FE-Modellen  
am Beispiel einer Gestell-Struktur
- CAM-Labor  
Praktika für Maschinenbau- und Mechatronikstudenten
- SPS-Labor  
Praktika für Maschinenbau- und Mechatronikstudenten

# Konstruktion des Versuchsträgers

für eine Hochgeschwindigkeits-Leichtbau-Genauigkeitsmaschine

Entwicklung einer Experimental-Maschine

Untersuchungsschwerpunkte:

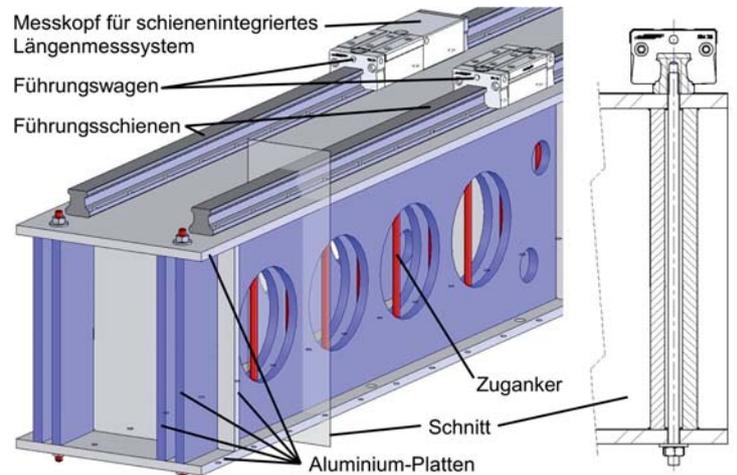
- hohe Beschleunigungen in den Achsen x, y und z
- Möglichkeiten einer Impulskompensation
- Genauigkeitsbeherrschung durch Steuerung in sechs Freiheitsgraden ohne mechanisches Einprägen der Bewegungspräzision

Konstruktionsmerkmale:

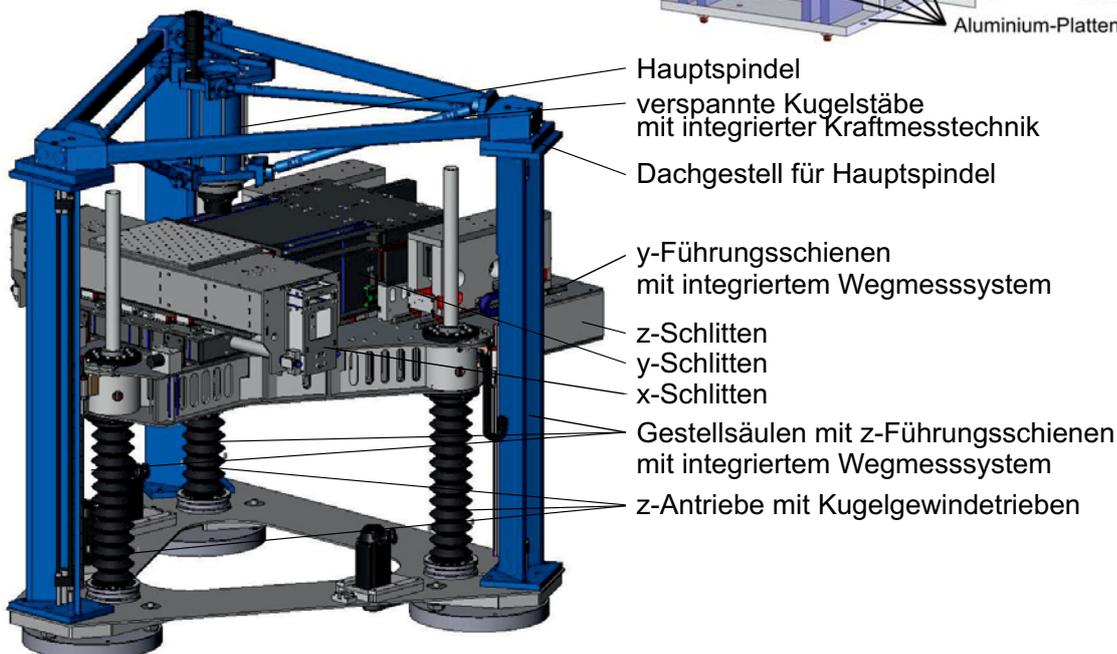
- serieller Aufbau, feststehende Vertikalspindel, alle Bewegungen auf der Werkstückseite
- 6 translatorische Achsen ( $x$ ;  $y_1$ ;  $y_2$ ;  $z_1$ ;  $z_2$ ;  $z_3$ ) für die Bewegungssteuerung in x, y und z sowie kleine Winkel in  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  und  $\varphi_z$
- Impuls-Kompensationsantriebe in x und y
- konsequenter modularer Leichtbau

Prinzipieller Aufbau der Schlitten:

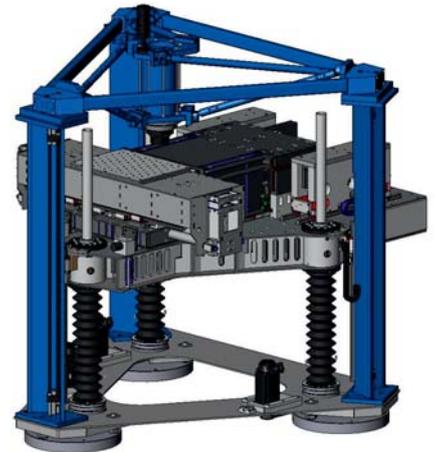
Aufbau aus Aluminium-Platten, die ineinander gesteckt, verstiftet und mit Zugankern verspannt werden



Aufbau des Versuchsträgers:



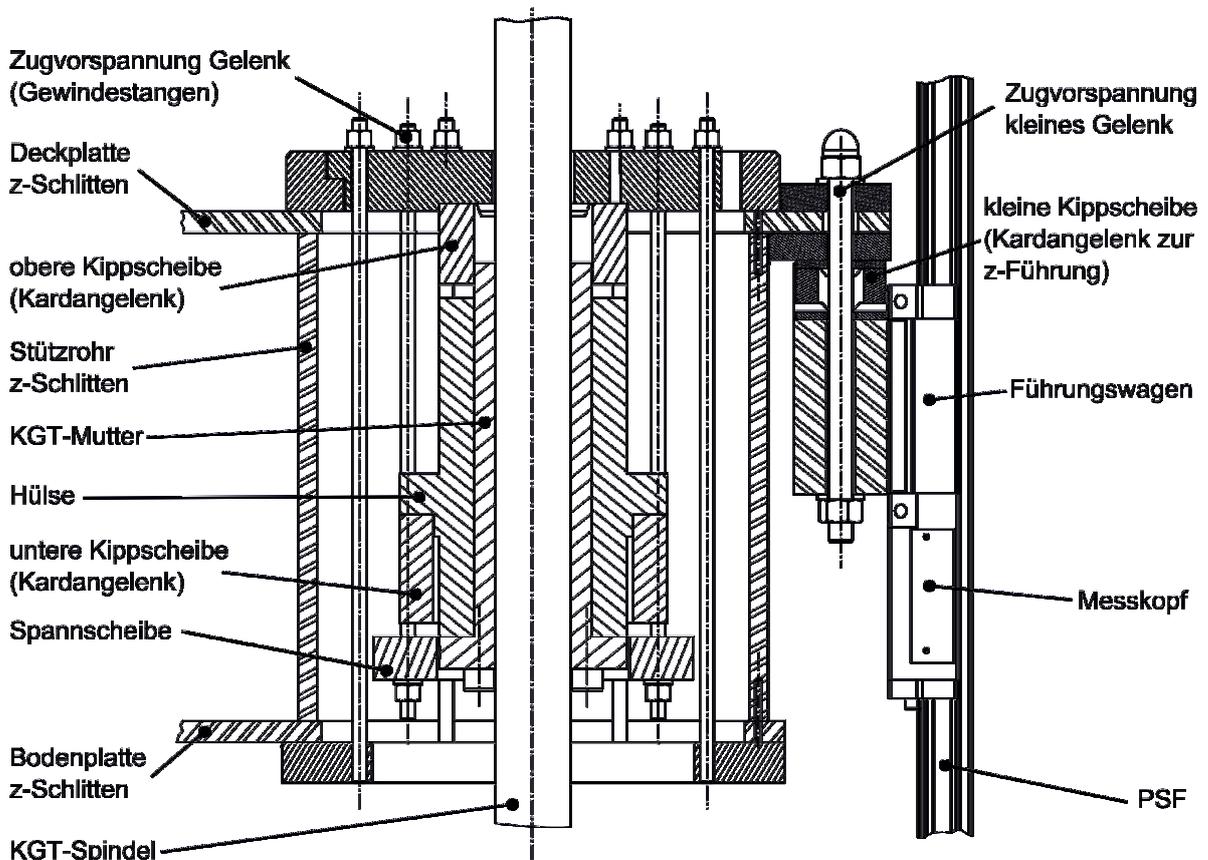
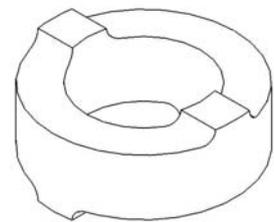
- Konstruktive Lösung für Korrekturbewegungen  $\Delta\varphi_x$  und  $\Delta\varphi_y$  des z-Schlittens
- Begrenzung der Momentenbelastung durch lokale Reduktion der Kippsteifigkeiten an den Verbindungsstellen des z-Schlittens zum Kugelgewindetrieb und den Gestellsäulen
- Erzielbare Winkelkorrektur: 500  $\mu\text{m/m}$



## Schnittbild an der Verbindungsstelle

- Aufnahme der KGT-Mutter und des z-Führungswagens über Kontaktgelenke (verspannte Kippscheiben)
- Kippscheiben sind durch Zuganker verspannt

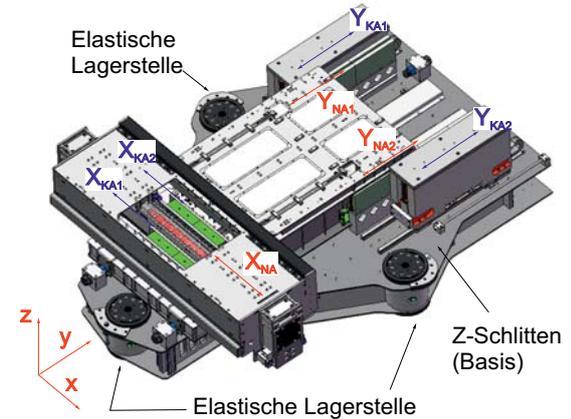
Kippscheibe



# Impulskompensation mittels Sollbahn- berechnung an einem Kreuzschlitten

## Zielstellung

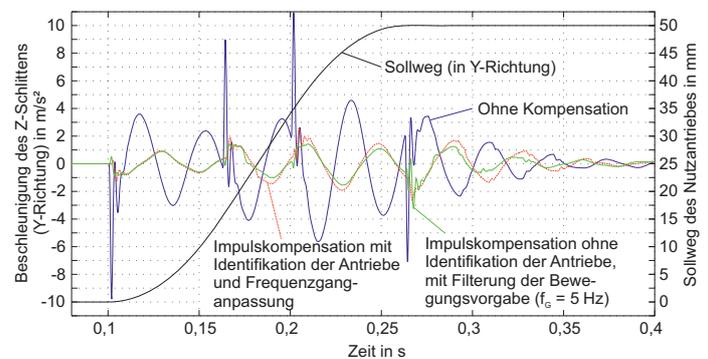
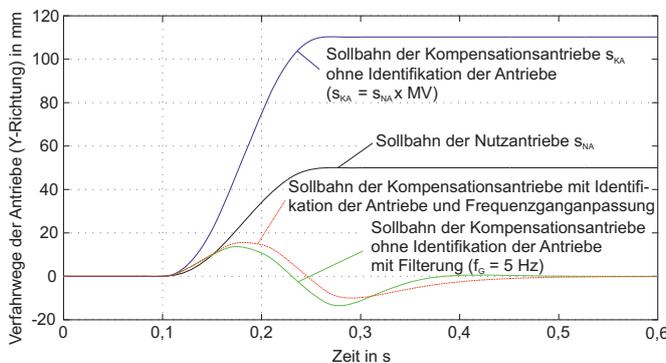
Zielstellung ist die Impulskompensation mittels Bahnvorausberechnung für den Kompensationsantrieb direkt aus den Bewegungsvorgaben des Nutzantriebes. Anhand der Simulation eines impuls kompensierten Kreuzschlittens sollen die Methoden für die Vorausberechnung der Kompensationsantriebe und die erzielbaren Kompensationswirkungen untersucht werden.



## Vorgehen

Die erste Variante zur Ermittlung der Sollbahn des Kompensationsantriebes ist, das Sollwegprofil des Nutzantriebes mit dem Masseverhältnis (MV) der Antriebe zu multiplizieren und anschließend zu filtern (Hochpass). Die zweite Variante berücksichtigt den Einfluss der Reglereinstellungen und Regelstrecken der Antriebe. Dazu müssen die Übertragungsfunktionen von Nutz- und Kompensationsantrieben identifiziert werden. Die mit der Kraftprognosefunktion berechneten Motorkräfte des Nutzantriebes stellen diejenigen gestellanregenden Anteile dar, die vom Kompensationsantrieb aufgebracht werden müssen. Mit der Wegprognosefunktion, die den Zusammenhang zwischen Motorkraft und Sollbahn des KA beschreibt, kann die Sollbahn des Kompensationsantriebs prognostiziert werden. Mittels der Anpassung des Frequenzganges der Wegprognosefunktion kann der Verfahrensweg des Kompensationsantriebs reduziert werden.

## Ergebnisse



Die Abbildungen zeigen die Verringerung der Anregung der Maschinenbasis (Z-Schlitten) für beide Methoden der Bahnvorausberechnung am Beispiel eines Verfahrensvorganges des Y-Schlittens (Sollgeschwindigkeit  $v_{Soll} = 0,5 \text{ m/s}$ , Sollbeschleunigung  $a_{Soll} = 8 \text{ m/s}^2$  sowie Sollruck  $r_{Soll} = 10000 \text{ m/s}^3$ ) und die zugehörigen Verfahrensweg der Antriebe. Insbesondere die beim Bremsen und Beschleunigen resultierenden impulsförmigen Beschleunigungsspitzen des Z-Schlittens können signifikant reduziert werden. Durch die verringerte Strukturanregung bei hohem Sollruck können die mit Lineardirektantrieben möglichen Kraftanstiegsgeschwindigkeiten und damit die Erhöhung des maximal zulässigen Rucks bei der Bahnvorgabe erreicht werden.

# Impulskompensierter Kreuzschlitten

für eine Hochgeschwindigkeits-Leichtbau-Genauigkeitsmaschine

## Zielstellung

Zielstellung sind sowohl gestalterisch-konstruktive als auch antriebs- und regelungstechnische Grundlagenuntersuchungen zum Einsatz der Impulskompensation an verkoppelten Achsstrukturen am Beispiel eines Kreuzschlittens. Schwerpunkte der Arbeiten sind dabei:

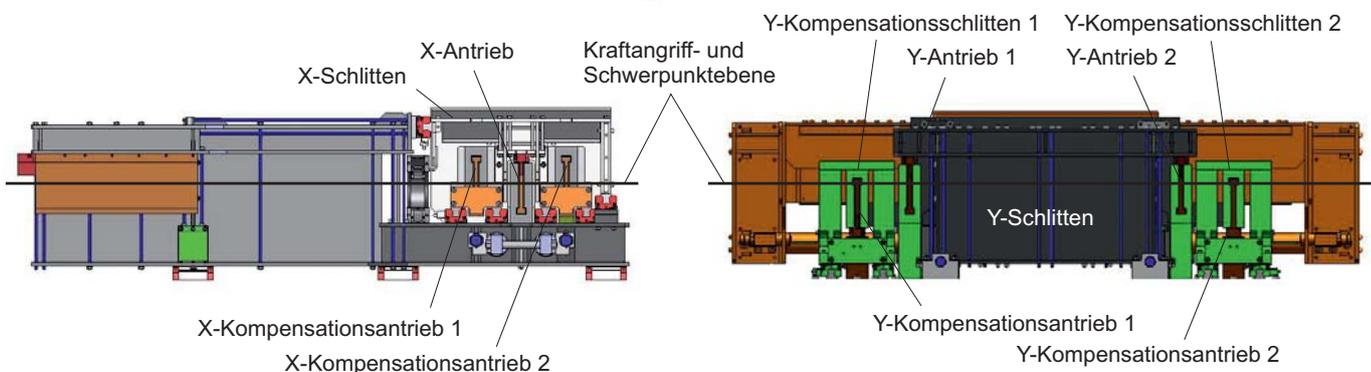
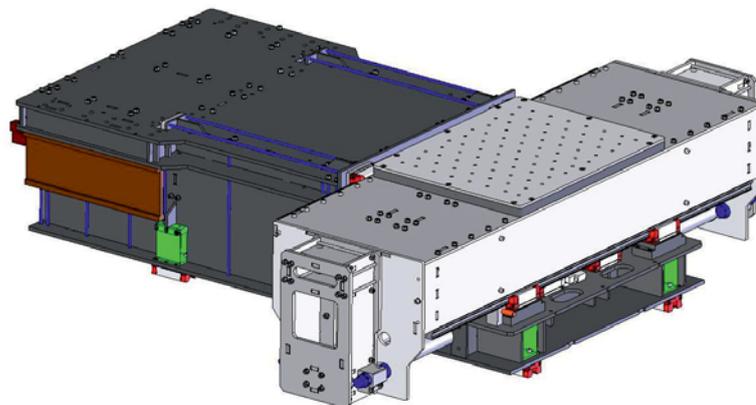
1. Masseoptimierung des Kreuzschlittens zur Reduzierung der bewegten Massen,
2. Kraftflussgerechte Gestaltung des Kreuzschlittens,
3. Erarbeitung von Gestaltungsprinzipien für den Kreuzschlitten zur Ermöglichung der Kraft- und Momentenkompensation
4. Verwendung eisenloser Lineardirektantriebe in Doppelkammausführung zur Vermeidung der Rastkraftwirkung sowie des magnetischen Zuges auf die Führungen,
5. Vorausberechnung der Bahn der Kompensationsantriebe,
6. Umsetzung der Impulskompensation mit kommerzieller Antriebstechnik.

## Vorgehen

Aufbau eines impulskompensierten Kreuzschlittens mit folgenden wesentlichen Konstruktionsmerkmalen:

- kraftflussgerechte Gestaltung,
- Minimierung bewegter Massen,
- geringe Fertigungsanforderungen,
- Bauteilmontage mittels Zugankern,
- Verwendung von Standard-Teilen,
- Minimierung der Einleitung strukturanregender Momente durch Kraftangriff im Massenschwerpunkt,
- Verwendung eisenloser Lineardirektantriebe in Doppelkamm-Bauform,

## Ergebnisse



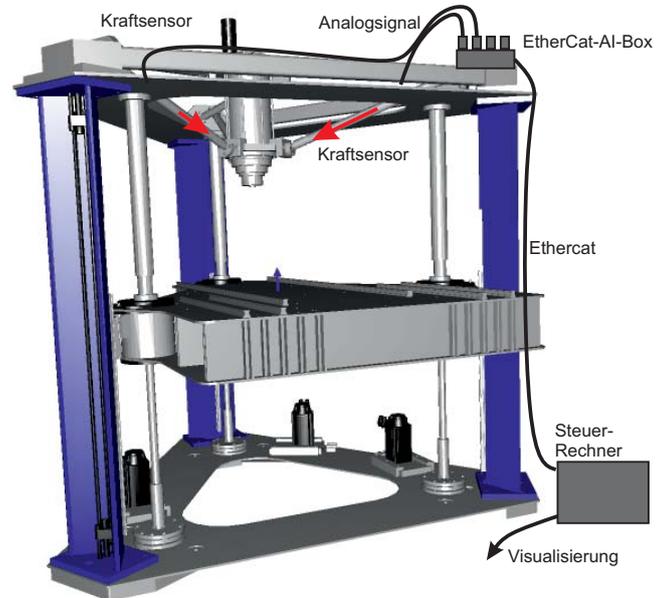
Bei der hochdynamischen Bearbeitung sollen Bearbeitungskräfte gemessen und geregelt werden. Dazu muss die Kraftmessung mit sehr hoher Abtastrate erfolgen, um auch noch regelnd reagieren zu können. Hinzu kommt in diesem Anwendungsfall ein großer Messbereich von 5000N bei gleichzeitig hohen Anforderungen an Auflösung und Genauigkeit im unteren Kraftmessbereich.

### Kraftmessung mit räumlichem Stabwerk

Um alle 6 räumlichen Komponenten der Kräfte und Momente an der Werkzeugspindel zu messen, wurde ein Stabwerk mit 6 linearen Kraftmesssensoren konstruiert. Mit räumlichen Vektorbeziehungen lassen sich aus den Sensorkräften wieder die Kräfte am Werkzeug rekonstruieren.

### Messaufbau mit EtherCat

Um Störungen in den analogen Messsignalen möglichst gering zu halten, werden die Signale bereits an der oberen Plattform mit einer EtherCat-AI-Box analog-digital gewandelt und von dort per EtherCat an den Steuerrechner übertragen.



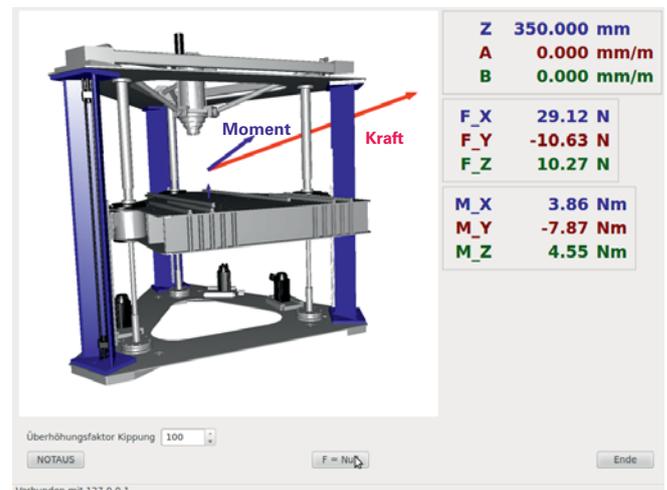
Aufbau der räumlichen Kraftmessung am Versuchsträger

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_1 & \dots & n_6 \\ r_1 \times n_1 & \dots & r_6 \times n_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{\text{Sensor}_1} \\ F_{\text{Sensor}_2} \\ F_{\text{Sensor}_3} \\ F_{\text{Sensor}_4} \\ F_{\text{Sensor}_5} \\ F_{\text{Sensor}_6} \end{pmatrix}$$

$n_1 \dots$  Richtungsvektor  
 $r_1 \dots$  Angriffspunkt

Auswertungsgrundlagen für die räumliche Kraftmessung

- Geringe Messunsicherheiten für feinfühligere Kraftmessungen bei gleichzeitig hoher Überlastsicherheit bis +/- 10 kN
- dynamische Abtastrate bis zu 300µs
- Verbesserung Signal-Rausch-Verhältnis gegenüber herkömmlichen Messaufbauten um - 6dB (=50%) durch dezentrale Analogeingänge
- messtechnische Grundlage für eine Kraftregelung
- 3D-Animation der Messergebnisse



3D-Visualisierung mit OpenGL

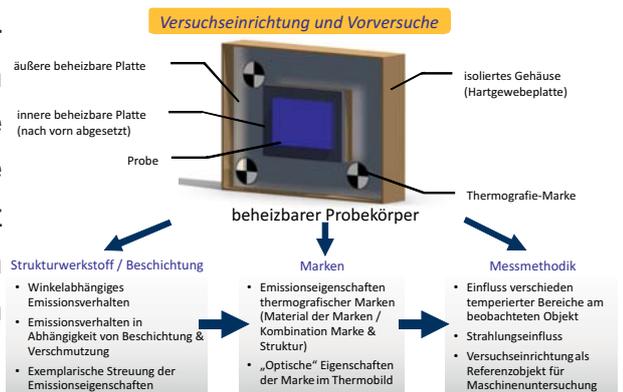
Inhalt

Mit der photogrammetrischen Erfassung von Verlagerung und Deformation, kombiniert mit der selektiv thermografischen Messung von Temperaturen, soll die Analyse des thermoelastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen verbessert werden. Für das Messverfahren selektive Thermografie werden zunächst Grundlagenuntersuchungen unter idealisierten Bedingungen zur Qualifizierung und zum Funktionsnachweis des Verfahrens durchgeführt.

Vorgehensweise

Als Versuchsbasis für die Grundlagenuntersuchungen zur selektiven Thermografie dient ein definiert beheizbarer Probekörper, welcher die erwarteten Problemstellungen (unterschiedliche Emissionseigenschaften der Werkstoffe, Versatz und Abschattung von Teilen der Struktur, Reflexion der Hintergrundstrahlung auf blanken Metallflächen usw.) reproduzierbar darstellen kann.

In mehreren Versuchsreihen werden die für die thermografische Temperaturmessung relevanten Eigenschaften verschiedener Werkstoffe und Oberflächenbeschichtungen unter idealisierten Bedingungen (definierte Hintergrundstrahlung und bekannte Oberflächentemperaturen) untersucht. Darüber hinaus wird mit dem beheizten Probekörper die Funktion des Verfahrens selektive Thermografie nachgewiesen.



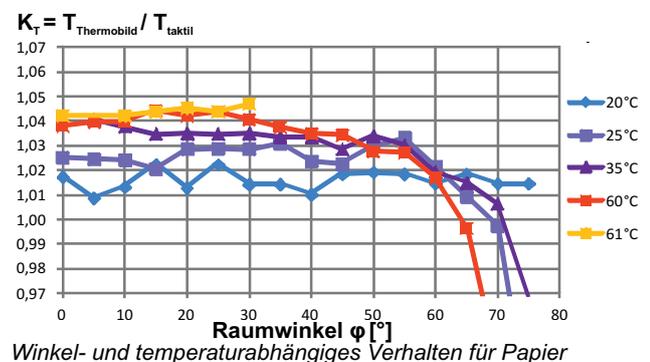
Versuchseinrichtung und Vorgehensweise (Vorversuche)



Einordnung verschiedener Markentypen (untersuchte Typen rot hervorgehoben)

Ergebnisse

Für die untersuchten Werkstoffe konnten die erwarteten Emissionseigenschaften nachgewiesen werden ( $\epsilon \downarrow$  für blanke Metalle,  $\epsilon \uparrow$  für Beschichtungen). Die Markenmaterialien wurden genauer hinsichtlich der Temperatur- und Winkelabhängigkeit des Emissionsgrades charakterisiert (vgl. Diagramm rechts).



Teilprojekt

Teilprojekt C06: Messtechnische Erfassung von verhaltens- und betriebszustandsrelevanten Größen entlang der thermischen Wirkungskette für Analyse, Simulation und Korrektur an einem spezifischen Versuchsträger

Teilprojektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann, IWM, TU Dresden

## Messung von Fugeneigenschaften B04

## Inhalt

Innerhalb des Sonderforschungsbereiches Transregio 96 soll ein thermisches Modell einer Experimentalmaschine erstellt werden. Die Fügeflächen, der in der Struktur zahlreich vorhandenen Fugen, besitzen auf Grund der gewählten Fertigungs- und Verbindungsverfahren relativ hohe Rauheiten sowie ungleichmäßige Druck- und Kontaktverhältnisse. Diese Fugen haben einen signifikanten Einfluss auf das thermische Verhalten. Für deren Eigenschaften lässt sich jedoch kein Modell zur Beschreibung des thermischen Leitwerts finden. Deshalb wurden experimentelle Untersuchungen zum Messen des Wärmeübergangs durchgeführt.

## Vorgehensweise

Um den Einfluss unterschiedlicher Einflussparameter auf den Fugenleitwert quantitativ besser beschreiben zu können, sind experimentelle Untersuchungen durchgeführt worden. Dafür wurde zunächst ein Versuchsstand entwickelt (Bild 1). Mit diesem Versuchsstand ist es möglich, die Fugen eines typischen Teilausschnitts der Struktur bei Variation der wichtigsten Einflussparameter wie Flächenpressung, Rauheit und Schräge der Kontaktflächen, zu vermessen. Für den relevanten Bereich dieser Einflussgrößen sind dann mit Hilfe der Messwerte und eines Thermischen FE-Modells (Bild 2) die Fugenleitwerte bestimmt worden.

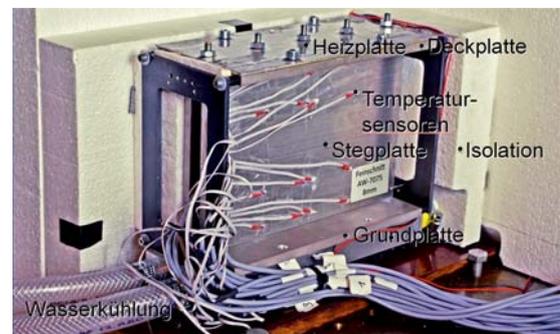


Bild 1: Versuchstand

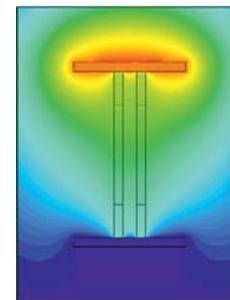


Bild 2: Mit FE-Modell des Versuchstands berechnete Temperaturverteilung

## Ergebnisse

Mit Hilfe einer Regressionsanalyse ist dann auf Basis der Messdaten ein thermisches Fugenmodell entwickelt worden. Dieses dient zur Parametrierung der Fugen in den thermischen Modellen der Gestellbauteile des Versuchsträgers.

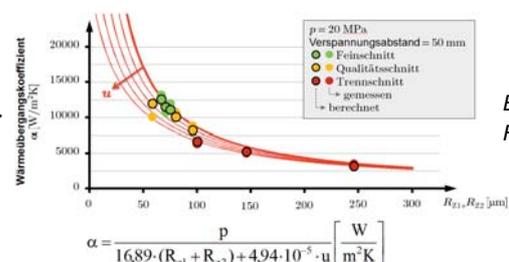


Bild 3: Fugenmodell

## Teilprojekt

B04 Identifikation von Modellparametern für exemplarisch streuende sowie zeitlich veränderliche thermische Maschineneigenschaften

Teilprojektleiter

- Prof. Dr.-Ing. habil. K. Kabitzsch, Institut für Angewandte Informatik, TU Dresden
- Dr.-Ing. B. Kauschinger, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, TU Dresden

## Inhalt

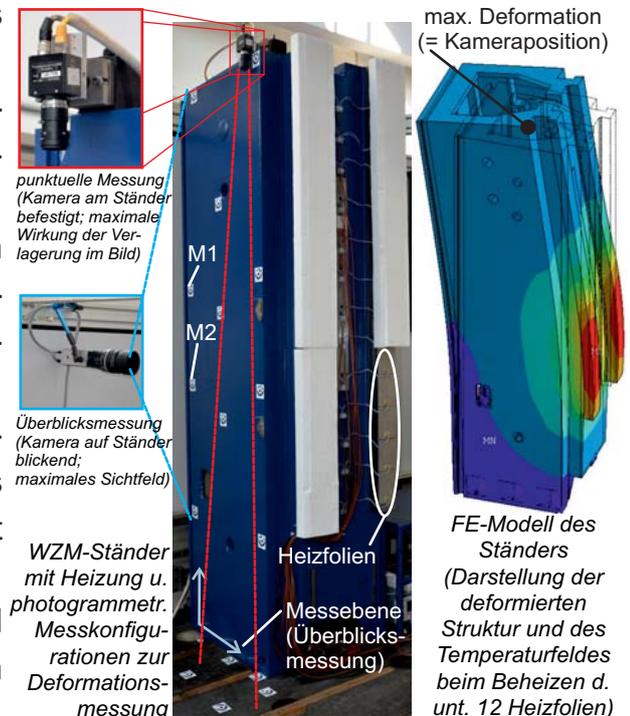
Im dargestellten Versuchsaufbau wird die Erfassung der Deformation eines WZM-Ständers mittels photogrammetrischer Messverfahren demonstriert. Die Messverfahren bieten Vorteile hinsichtlich: der strukturellen Auflösung (Anzahl und Anordnung der Messpunkte), des Aufwands zur Vorbereitung (Aufbau von Messgestängen und Einrichten taktiler Längenmessgeräte entfällt) und des Einflusses wechselnder Umgebungsbedingungen (Relativmessung möglich).

## Vorgehensweise

Zur Emulation der reibungsinduzierten Verlustleistung sind Heizfolien an den Führungsbahnen des Maschinenständers angebracht (siehe Bild rechts). Der Maschinenständer ist mit Papiermarken versehen, welche als Messpunkte für die photogrammetrische Deformationsmessung dienen. Dabei werden:

- eine punktuelle Messung mit einer am oberen Ende des Maschinenständers befestigten "mitbewegten" Kamera mit Blick auf am Boden fixierte Marken, sowie
- eine Überblicksmessung mit einer hochauflösenden Kamera, welche eine Seitenwand des Maschinenständers im Bild erfasst, realisiert (siehe Bilder rechts).

Zum Vergleich wird ein thermoelastisches FE-Modell erstellt, mit entsprechenden Randbedingungen versehen und gelöst.



## Ergebnisse

Die Überblicksmessung liefert ein 2D-Deformationsfeld des Maschinenständers (Seitenwand) bei begrenzter Auflösung (0,3 mm/Pixel), während die auf die Messaufgabe abgestimmte punktuelle Messung (Minimalmessung) bei begrenztem Gesichtsfeld höher aufgelöste (0,15 mm/Pixel) Messwerte für die Verlagerung der Ständerspitze ermöglicht. Bei der Bildmessung werden teilweise Messunsicherheiten  $\sigma_{\text{Bild}} < 0,01$  Pixel erreicht. Damit können Messunsicherheiten im Bereich weniger Mikrometer realisiert werden.

## Teilprojekt

Teilprojekt C06: Messtechnische Erfassung von verhaltens- und betriebszustandsrelevanten Größen entlang der thermischen Wirkungskette für Analyse, Simulation und Korrektur an einem spezifischen Versuchsträger

Teilprojektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann, IWM, TU Dresden

## Kalibrierfeld für Photogrammetrie u. Thermografie C06

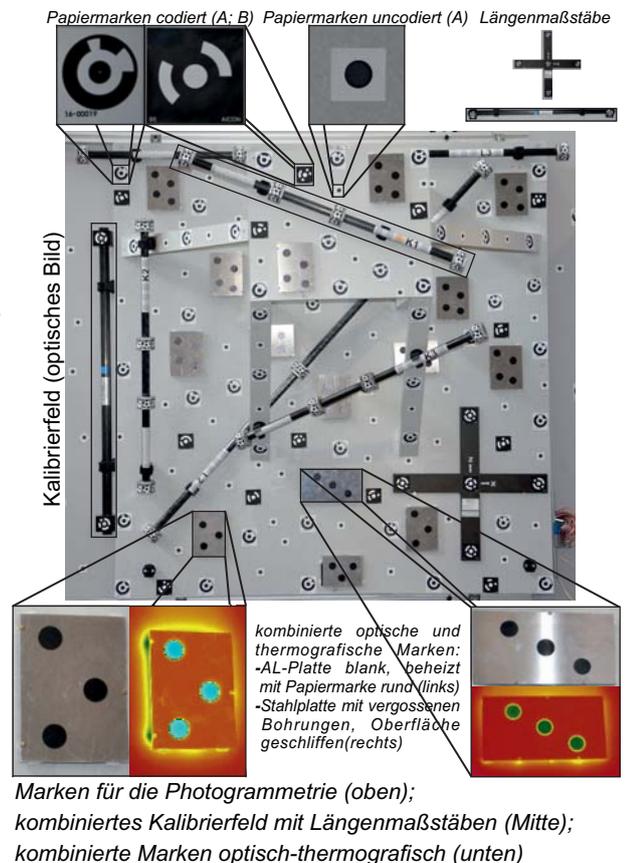
## Inhalt

Das erweiterte Kalibrierfeld dient der Kalibrierung von Photogrammetrie- und Thermografie- sowie kombinierten Kamerasystemen. Für einzelne Kameras können die Kameraparameter (bspw. Verzeichnung, Brennweite usw.), für einen Kameraverbund, bspw. bestehend aus zueinander fixierter optischer und Thermokamera, zusätzlich die relative äußere Orientierung der Kameras zueinander ermittelt werden.

## Vorgehensweise

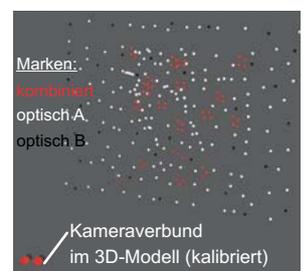
Um den Bildbereich mit Marken abzudecken, ist ein nach den Seiten hin verstreutes Podest auf der Grundplatte des Kalibrierfeldes aufgesetzt. Als Marken für den sichtbaren ("optischen") Spektralbereich dienen verschiedene Arten von Papiermarken (siehe rechts oben). Zusätzlich sind temperaturstabile Maßstäbe (CFK-Stäbe und Rohre) in verschiedenen Richtungen im Kalibrierfeld angebracht. Die Maßstäbe dienen in der Ausgleichsrechnung als Streckennormale mit bekannten Längen.

Um ausreichenden Kontrast für die Kalibrierung im Thermobild zu erreichen, werden beheizbare Aluminiumplatten (walzblank) mit darauf aufgeklebten, kreisrunden, schwarzen Emissionsgradaufklebern oder mit vergossenen Bohrungen als Marken eingesetzt. Die Aluminiumfläche ( $\epsilon \downarrow$ ) reflektiert den kälteren Strahlungshintergrund, während der Aufkleber ( $\epsilon \uparrow$ ) eine höhere Strahlleistungsdichte emittiert.



## Ergebnisse

Da die kombinierten Marken auch im optischen (schwarz auf hellem Hintergrund) gut erkennbar sind, können sie für die Kalibrierung eines Kameraverbundes, bestehend aus Thermografiekamera und optischer Kamera, eingesetzt werden. Über das Modell der optischen Abbildung können die genauigkeitsrelevanten Parameter der Kameras und ihre relative Orientierung ermittelt werden.



3D-Modell des Kalibrierfeldes (aufgenommen mit handgef. Kameraverbund)

## Teilprojekt

Teilprojekt C06: Messtechnische Erfassung von verhaltens- und betriebszustandsrelevanten Größen entlang der thermischen Wirkungskette für Analyse, Simulation und Korrektur an einem spezifischen Versuchsträger

Teilprojektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann, IWM, TU Dresden

# Selektive Thermografie an einem WZM-Ständer C06

## Inhalt

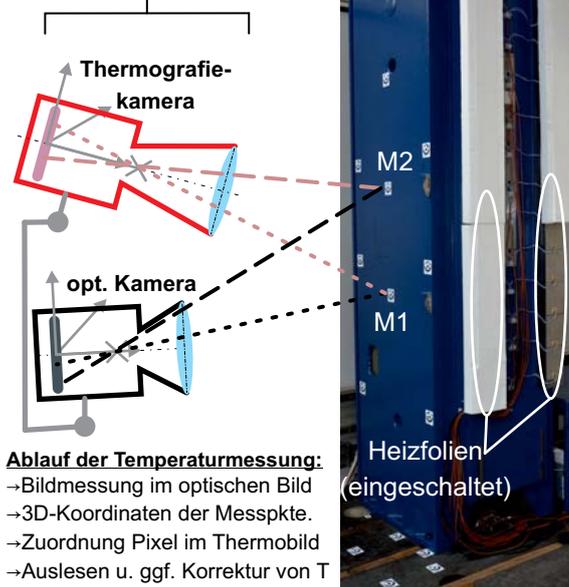
Im Versuchsaufbau wird das Temperaturfeld eines Maschinenständers selektiv thermografisch mit einem handgeführten Kameraverbund, bestehend aus optischer und Thermografiekamera, erfasst. Die thermografische Temperaturmessung erfolgt dabei an den aufgeklebten Photogrammetrie-Marken, wobei die Information über die räumliche Lage der Temperaturmesspunkte aus der photogrammetrischen Auswertung gewonnen wird.

## Vorgehensweise

Voraussetzung für die selektiv thermografische Temperaturmessung ist die Vorkalibrierung des handgeführten Kameraverbundes (Bestimmen der relativen äußeren Orientierung der Kameras).

Die Temperaturmessung mittels selektiver Thermografie ist am Beispiel eines Maschinenständers (Bild rechts) dargestellt. Dieser wird an den Führungsbahnen mittels aufgeklebter Heizfolien erwärmt. Als Temperaturmesspunkte werden die auf dem Ständer aufgeklebten Photogrammetrie-Marken (schwarz bedruckte Papiermarken) genutzt.

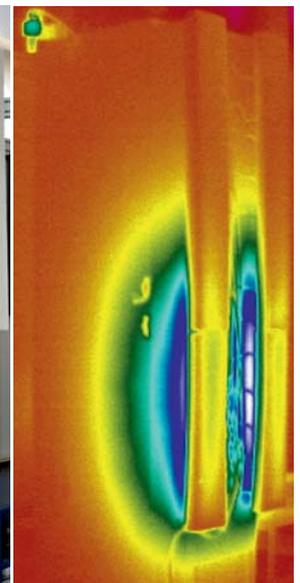
handgeführter Kameraverbund  
(optisch & thermografisch)



**Ablauf der Temperaturmessung:**

- Bildmessung im optischen Bild
- 3D-Koordinaten der Messpunkte
- Zuordnung Pixel im Thermobild
- Auslesen u. ggf. Korrektur von T

Funktionsprinzip der selektiven Temperaturmessung am Beispiel Maschinenständer



Marken M1 und M2 sind im Thermobild nicht erkennbar!

## Ergebnisse

Der handgeführte Kameraverbund (Thermografiekamera Optris PI400 mit 382 x 288 Pixeln; hochauflösende optische Industriekamera AVT Prosilica GX6600 mit 6576 x 4384 Pixeln) wurde aufgebaut (Bild rechts) und am erweiterten Kalibrierfeld kalibriert. Damit ist die relative Orientierung der Kameras bekannt und der Kameraverbund kann für Messungen eingesetzt werden.



handgeführter Kameraverbund

## Teilprojekt

Teilprojekt C06: Messtechnische Erfassung von verhaltens- und betriebszustandsrelevanten Größen entlang der thermischen Wirkungskette für Analyse, Simulation und Korrektur an einem spezifischen Versuchsträger

Teilprojektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann, IWM, TU Dresden

# Photogrammetrisches Tracking

am Beispiel des MiniHex

## Zielstellung

Ziel ist die Bewegungssteuerung einer Maschine durch ein optisches Bildmesssystem.

Dabei erfolgt die Umsetzung der Bildmessung unter den Gesichtspunkten von Anpassbarkeit und Flexibilität sowie Sicherheit der Bewegungssteuerung.

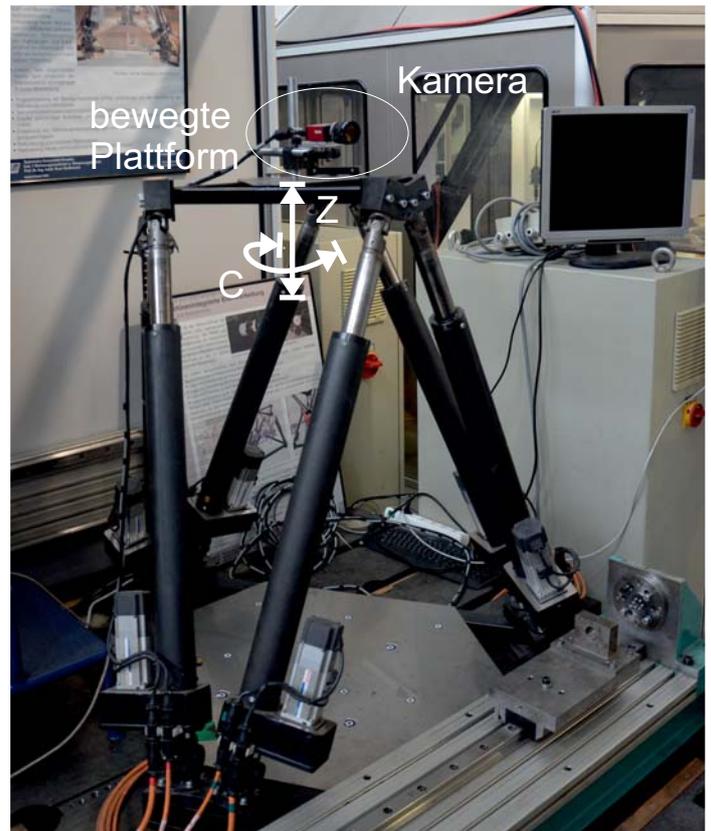


## Vorgehen

Dazu werden von einer fest auf der bewegten Plattform des Hexapod montierten Kamera Bilder aufgenommen und Merkmale (Marken: schwarze Punkte auf weißem Grund) erfasst. Als Kontrollgröße für die Identifikation dient dabei der Markencode. Zur Erzeugung einer Bewegungsvorgabe wird jeweils nur ein bestimmter Code zugelassen.

Als Bewegungsvorgabe zur Steuerung der Maschine wird die Abweichung des Markenmittelpunktes zur Bildmitte verwendet. Aus dieser Abweichung werden Bewegungsvorgaben in Z-Richtung und Rotation um C berechnet und an die Maschine gesendet.

Die Maschine fährt diese Position an und es wird ein neues Bild ausgewertet.



## Ergebnisse

Ergebnis ist eine einfache und robuste bildbasierte Steuerung der Maschine, auf Basis einer optisch erfassten Codemarke. Diese Steuerung benötigt nur ein sehr geringes Vorwissen über Kamera und Objektiv und kann auch unter veränderlichen Bedingungen (z.B. Objektivwechsel oder Änderung von Blende und Fokus) eine zuverlässige Bewegungssteuerung sicherstellen.

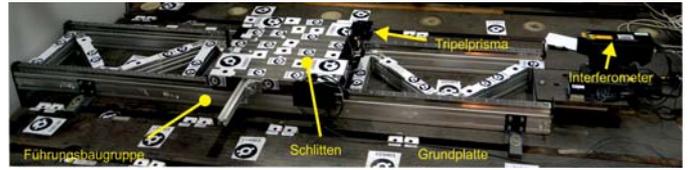


# Photogrammetrische Posemessung

am Beispiel des Linearachs-Versuchsstandes

Zielstellung

Mit diesem Versuchsaufbau soll die Messgenauigkeit unterschiedlicher photogrammetrischer Messkonfigurationen zur Posemessung an einer Linearachse experimentell bestimmt werden.

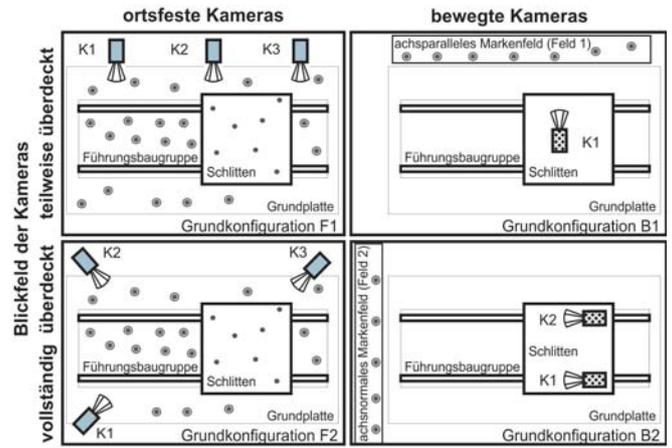


Linearachs-Versuchsstand

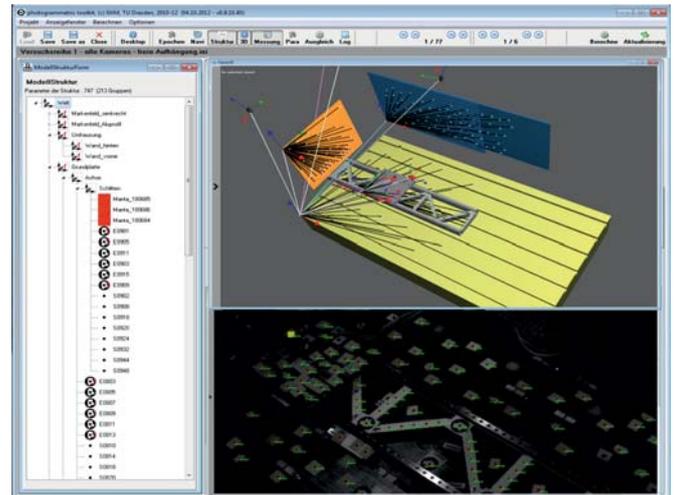
Vorgehen

Dazu werden die Bestandteile der Linearachse (Führungsbaugruppe und Schlitten) sowie ein Bezugssystem (Grundplatte) mit Marken versehen und mit Kameras erfasst.

Dafür stehen prinzipiell eine Vielzahl von möglichen Anordnungen der Kameras zur Verfügung. Deshalb wurden im Vorfeld mit Hilfe einer Simulation diejenigen identifiziert, mit denen ein hohes Genauigkeitspotenzial erreichbar ist. Diese Messkonfigurationen bestehen sowohl aus mit dem Schlitten bewegten als auch ortsfesten Kameras. Diese Messkonfigurationen sowie der Einfluss der Kameraauflösung wurden experimentell in Hinblick auf die erreichbare Messgenauigkeit untersucht. Zur Referenzierung der Messergebnisse wurde ein hoch genaues 6D-Laserinterferometer verwendet. Als Bewertungskriterium dient die Abweichung der photogrammetrischen Messung gegenüber der Referenzmessung.



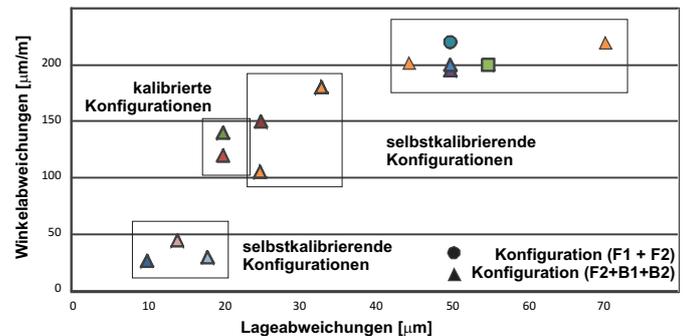
Untersuchte Messkonfigurationen (Kameraanordnungen)



Auswertesoftware

Ergebnisse

Es wurden Abweichungen der photogrammetrischen Messungen gegenüber den Lasermessungen von unter 10  $\mu\text{m}$  (Lage) sowie 40  $\mu\text{m}/\text{m}$  (Winkel) an der Linearachse experimentell nachgewiesen, wobei auch Konfigurationen identifiziert werden konnten, die sich vollständig selbst kalibrieren.



# Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

## Generierung effizienter Netzwerkmodelle aus FE-Modellen am Beispiel einer Gestell-Struktur

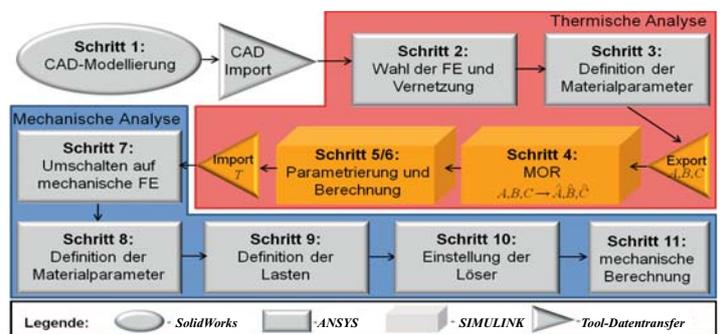
### Inhalt

Zu den Forschungszielen des SFB/Transregio 96 gehört die Entwicklung und die Anwendung von thermischen Netzwerkmodellen der gesamten WZM für schnelle Variantenrechnungen sowie zur steuerungintegrierten Korrektur thermo-elastischen Fehler im Betrieb. Zur Generierung rechenzeiteffizienter Netzwerkmodelle wurden sog. Modellordnungsreduktions- (MOR)-Techniken eingesetzt. Dies ermöglicht die Erstellung von kleindimensionalen Modellen der Komponenten und Baugruppen der WZM direkt aus dem originalen FE-Modell.

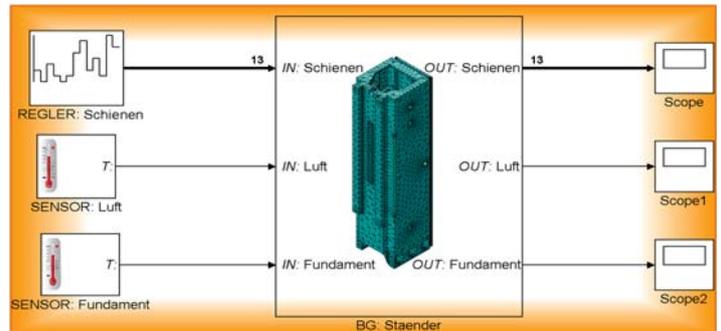
### Vorgehensweise

Im Einzelnen wurden folgende Teilschritte realisiert:

- problemspezifische Adaptation und Weiterentwicklung bekannter MOR-Verfahren
- Entwicklung einer Datenschnittstelle zwischen der FE-Plattform ANSYS und der Programmumgebung SIMULINK
- Integration der entwickelten Algorithmen in ein Schema zur effizienten thermo-elastischen Simulation von WZM-Baugruppen
- Aufbau einer eigenen Simulink-Bibliothek "MOR\_WZM\_THM"
- Verifikation des Simulink-Modells

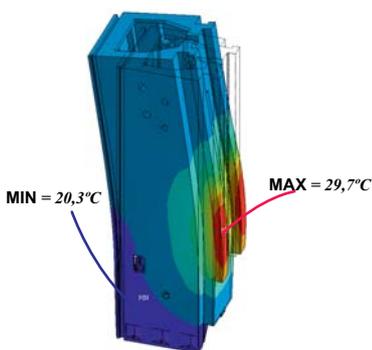


Schema der thermo-elastischen Simulation unter Einbeziehung der MOR

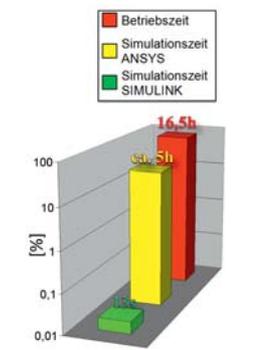


In Simulink realisiertes thermisches Netzwerkmodell

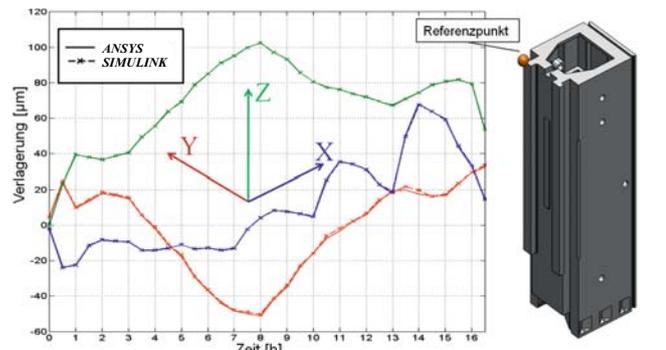
### Ergebnisse



Temperaturfeld und Verformung bei maximaler Deformation



Real- und Simulationszeiten



Berechnete Verlagerungen am Referenzpunkt in X-, Y- und Z-Richtung

**Teilprojekt A06:** Systemsimulation des prozessaktuellen Werkzeugmaschinenabbildes

Teilprojektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann, IWM, TU Dresden

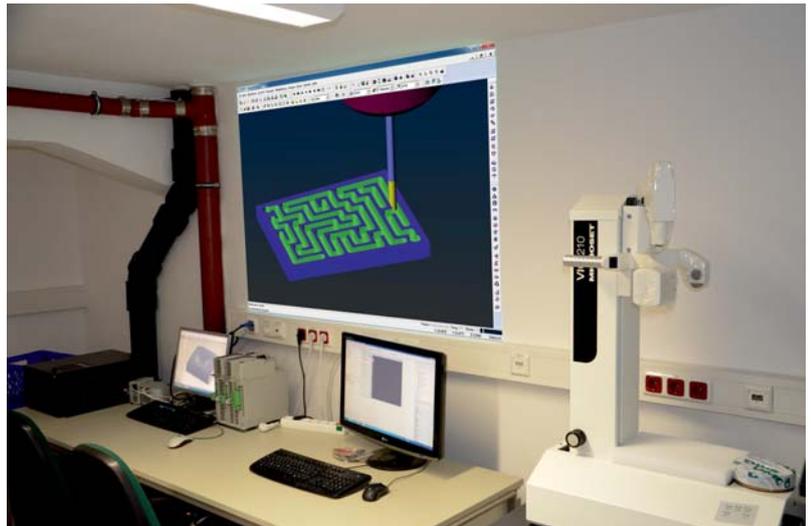
Prof. Dr.-Ing. M. Beitelschmidt, IFKM, TU Dresden

### Zielstellung

- Durchführung von Studentenpraktika in der LV Bewegungssteuerung
- Rechnergestützte Erzeugung von NC-Programmen (bis 5achs-simultan)
- Rechnergestützte Simulation und Optimierung der NC-Bearbeitung
- Fertigung von Demonstrator-Werkstücken auf der Modellfräsmaschine
- Entwicklung spezifischer Postprozessoren für CAM-Systeme

### Vorgehen

- Ausrüstung:
  - CAD/CAM PCs
  - CAD-Software SolidWorks
  - CAM-Software ESPRIT und CAMWorks
  - CNC-Modellfräsmaschine EMCO PC-Mill 50
    - Arbeitsraum: 190mm x 90mm x 190mm
    - Vorschub:  $v_{\max} = 750 \text{ mm/min}$ ,  
 $F_{\max} = 600\text{N}$
    - Spindel:  $n_{\max} = 2500 \text{ U/min}$   
 $M_{\max} = 4 \text{ Nm}$
    - Kühlung: Druckluft
    - Werkstoffe: Kunststoff, Aluminium, Stahl
    - Steuerung: Siemens 810 (PC-Emulation)
  - Werkzeug-Voreinstellgerät DMG VIO 210 Microset
  - Netzwerkanbindung an das Institutsnetz und an NC-Maschinen im Werkstattbereich
  - Beamer, Whiteboard
- manuelle und rechnergestützte NC-Programm-Erstellung nach DIN 66025 (G-Code)
- Bearbeitungssimulation
- Test der NC-Programme



Bearbeitungssimulation eines NC-Programms mit dem CAM-System ESPRIT



Modellfräsmaschine EMCO PC MILL 50 mit Steuerung und Werkzeugen

### Ergebnisse

- Praktische Erfahrungen bei der manuellen und rechnergestützten NC-Programmierung
- Fertigung von Demonstratorteilen für die 3-5achsige Bearbeitung in mehreren Arbeitsgängen (Fräsen, Schruppen, Schlichten)
- Veranschaulichung von Bewegungserzeugung und Bearbeitungstechnologien
- Unterstützung der Öffentlichkeitsarbeit (z.B. Lange Nacht der Wissenschaften)

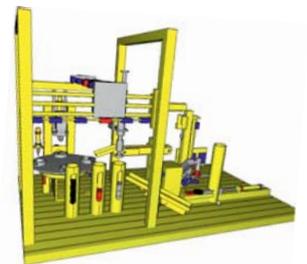
- Durchführung von Praktika in der LV Funktionssteuerung
- Systematische Umsetzung einer Automatisierungsaufgabe
- Entwicklung und Test von SPS-Programmen nach IEC 61131-3

- Ausrüstung:
  - FESTO-Modell einer Fertigungsanlage mit 6 Stationen, Master-SPS und Entwicklungs-PC
  - 7 SPS BoschRexroth IndraLogic L20 mit Engineering-Framework IndraWorks
  - 6 SPS-Programmier-Arbeitsplätze mit Entwicklungs-PC, Slave-SPS und Testpult
  - 3D-Simulation der Fertigungsanlage als HIL - Modell mit SPS-Anbindung per Ethernet
  - ProfiBus DP als Feldbus
  - Netzwerkanbindung, Beamer, Whiteboard
- Erstellung und Test von SPS-Programmen nach IEC 61131-3 für die Funktionsrealisierung von jeweils 1 der 6 Fertigungsstationen
- Slave-SPS der einzelnen Arbeitsplätze wahlweise an Master-SPS zuschaltbar
- Programmtest an realer Anlage oder per 3D-Simulation (HIL)

- Praxis-Erfahrungen bei der Programmierung und dem Test von SPS-Software nach IEC 61131-3
- Unterstützung der Öffentlichkeitsarbeit (z.B. Lange Nacht der Wissenschaften, Schnupperstudium)



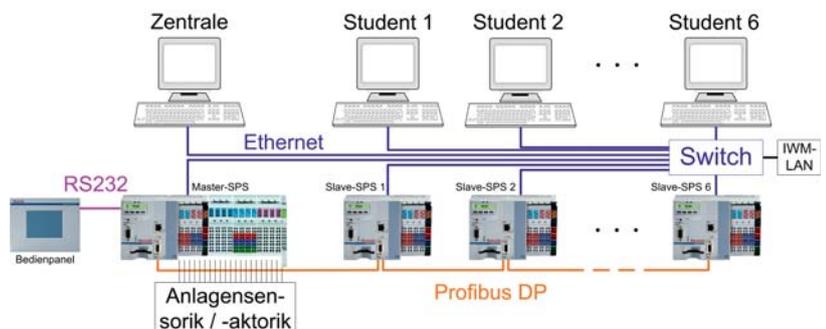
SPS-Labor mit 6 Programmier-Arbeitsplätzen und Fertigungsanlage



FESTO-Fertigungsanlage: reale Anlage (links) und HIL - Simulation (rechts)

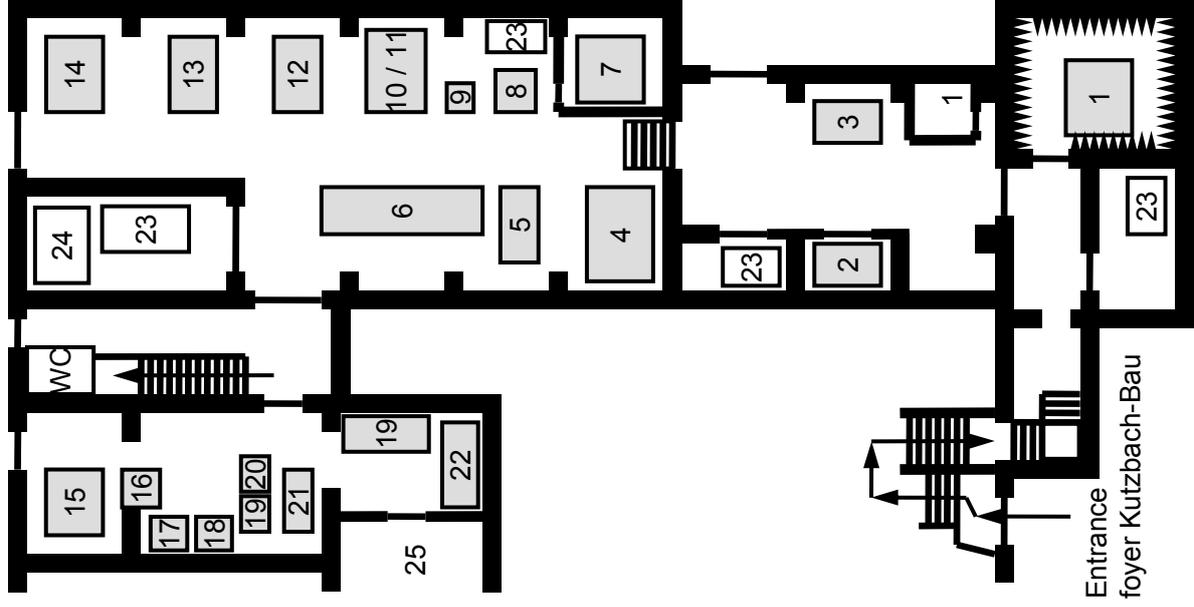


Programmierarbeitsplatz mit Slave-SPS und Testpult



Vernetzung der Arbeitsplätze mit Master-SPS und Fertigungsanlage im SPS-Labor

Test stands IFD



**Testing field hydraulics**

- 1 Anechoic test room according to ISO 3745
- 2 Long term investigations of hydraulic pumps
- 3 Pneumatic handling device
- 4 Valve- and displacement controlled hydraulic actuators
- 5 Electro-hydraulic load-sensing systems
- 6 Electric-hydrostatic injection molding machine
- 7 Reverberation test room according to ISO 3741
- 8 Valves and pumps for automotive hydraulics
- 9 Hardware-in-the-loop test stand
- 10 Hydrostatic bearings
- 11 Valve controlled hydraulic actuators
- 12 Proportional directional control valves
- 13 Proportional pressure control valves
- 14 Educational test stand - hydraulic actuators

**Testing field pneumatics**

- 15 Educational test stands - pneumatic drives and controls
- 16 Pneumatic vacuum ejectors
- 17 Flow measuring setup according to ISO 6358
- 18 Visualization of compressible air flow
- 19 Electromagnetic valve actuators
- 20 Membrane cylinders
- 21 Closed loop pneumatic cylinder drive
- 22 Miniature fluid power
- 23 Hydraulic power unit
- 24 Cooling central unit
- 25 Workshop and store area