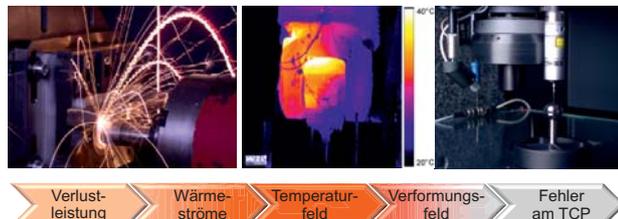

Tagungsband

3. Kolloquium
zum SFB/TR-96

Thermo - Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen -Experimentelle Methodik-

29. / 30.10.2013 in Aachen



Programm

29.10.2013

13:00 Uhr

Begrüßung und Einführung in die Thematik

Großmann, K., Sprecher des SFB/TR 96

Session 1: Ermittlung von thermisch relevanten Prozessparametern

13:15 Uhr

Untersuchungen zur Charakterisierung der Spanbildung bei Einkornritzversuchen (A03)

Klocke, F.; Rasim, M.; RWTH Aachen, Lehrstuhl für Fertigungsverfahren

13:45 Uhr

Grundlagenprüfstand für Spanungsprozesse mit bestimmter Schneide: Aufbau, experimentelle Ergebnisse und Nutzung für die Prozessmodellierung und –simulation (A02, A01)

Brockmann, M.; Klocke F.: RWTH Aachen, Lehrstuhl für Fertigungsverfahren

Schmidt, G.; Semmler, U.: Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik Chemnitz

14:15 Uhr

Experimentelle Untersuchungen am rotierenden Werkzeug für spanbildende Prozesse (A01)

Bräunig, M.; Drossel, W.-G., Wittstock, V.; TU Chemnitz, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse

14:45 Uhr

Kontaktwärmeübergang bei werkzeugmaschinenspezifischen Fugen (B02)

Burghold, M.; Kneer, R.; Vieler, S.: RWTH Aachen, Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung

Session 2: Experimentelle Methodik an Teilsystemen in Werkzeugmaschinen

15:45 Uhr

Thermischer Transport in magnetorheologischen Fluiden (C02)

Drossel, W.-G.; Ohsenbrügge, C.; Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

16:15 Uhr

Reib- und Temperaturverhalten von Profilschienenführungen in Experiment und Simulation (B03, A05)

Brecher, C.; Haber, D.; RWTH Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

Beitelschmidt, M.; Partzsch, M.: TU Dresden, Institut für Festkörpermechanik

16:45 Uhr

Experimentelle Analyse fluidtechnischer Systeme in Werkzeugmaschinen (A04)

Weber, Ju.; Weber, J.: TU Dresden, Institut für Fluidtechnik

17:15 Uhr

Leistungsmessung an Linearmotoren bei hohen Verfahrgeschwindigkeiten (C04)

Werner, R.; Winkler, S.: TU Chemnitz, Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe

30.10.2013

Session 3: Methodische Rahmenbedingungen zur experimentellen Ermittlung von thermisch relevanten Parametern

09:00 Uhr

Modellordnungsreduktion für gekoppelte thermoelastische Systeme (A06)

Benner, P.; Lang, N.; Saak, J.: TU Chemnitz, Professur für Mathematik in Industrie und Technik

09:30 Uhr

Thermoelastische Simulationen gekoppelter Baugruppen (A07)

Naumann, A.; Wensch, J.: TU Dresden, Institut für wissenschaftliches Rechnen

10:00 Uhr

Optimale Platzierung von Temperatursensoren zur Bestimmung von Verlagerungen am TCP (B05)

Herzog, R.; Riedel, I.; TU Chemnitz, Professur Numerische Mathematik

10:30 Uhr

Methoden zur Modellanalyse für die Auslegung von Experimenten zur Parameteridentifikation (B04)

Großmann, K.; Kauschinger, B.; Schroeder, St.; TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik

Session 4: Verfahren zur Verformungs- und Verlagerungsmessung

11:15 Uhr

Charakterisierung komplexer Verformung von Maschinenstrukturen mit strukturintegrierter Sensorik (C03)

Klatte, M.; Wenzel, Ch.: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie Aachen

11:45 Uhr

Volumetrische Vermessung thermo-elastischer Verlagerungen (B06)

Brecher, C.; Wennemer, M.; RWTH Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

12:15 Uhr

Temperatur- und Verlagerungsmessung an einem Versuchsträger mittels selektiver Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie (C06)

Großmann, K.; Merx, M.; Riedel, M.: TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik

12:45 Uhr

Bewertung von Verfahren zur Korrektur bzw. Kompensation thermisch bedingter Verlagerungen von Werkzeugmaschinen (C05)

Wiemer, H.: TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik

Braun, R.; Esswein, W.: TU Dresden, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insb. Systementwicklung

Untersuchungen zur Charakterisierung der Spanbildung bei Einkornritzversuchen

F. Klocke, M. Rasim; WZL RWTH Aachen

Beim Schleifprozess wird ein Großteil der eingebrachten mechanischen Energie in Wärme umgewandelt. Daher ist der Schleifprozess eine der Hauptwärmequellen innerhalb der Werkzeugmaschine. Die Kenntnis der Wärmeströme in die Komponenten Werkzeug, Werkstück und Span/Umgebung ist von signifikanter Bedeutung für die prozessaktuelle Abbildung von Werkzeugmaschinen. Die Energieumsetzung im Schleifprozess findet bei der Interaktion von den sich auf der Schleifscheibe befindlichen Körnern und dem Werkstückwerkstoff statt. Bisherige Ansätze zur Modellierung der Wärmeentstehung im Schleifprozess berücksichtigen die gesamte Schleifscheibe als einen konstanten Eingangsparameter. Dies hat zur Folge, dass die Modelle nur für eine bestimmte Schleifscheibe unter konstanten Abrichtbedingungen gültig sind. Für eine allgemeingültige Modellierung der Wärmeentstehung muss die mit dem Werkstück interagierende Schleifscheibentopographie berücksichtigt werden. Die Schleifscheibentopographie kann als eine Vielzahl von einzelnen Schleifkörnern betrachtet werden, die gleichzeitig mit dem Werkstück interagieren. Jede an den einzelnen Körnern auftretende Spanbildung stellt jeweils eine Wärmequelle dar. Um die Wärmeentstehung im Schleifprozess tiefergehend beschreiben zu können, ist demnach die Kenntnis über die Spanbildung beim einzelnen Korneingriff und die daraus resultierenden Wärmeentstehung erforderlich.

Die hier vorgestellten Untersuchungen zur Charakterisierung der Spanbildung beschäftigen sich mit den Temperaturen und Kräften beim Einkornritzen. Es wird eine neu entwickelte Methodik vorgestellt, Temperaturen und Kräfte beim Einkorneingriff zu messen. Dabei liegt die große Herausforderung in dem aufgrund der Prozesskinematik erforderlichen hohen örtlichen sowie zeitlichen Auflösungsvermögen der Messung. Darüber hinaus stellt die schwierige Zugänglichkeit der Kontaktzone zwischen Korn und Werkstück eine weitere Herausforderung an die Temperaturmesstechnik. Aus diesem Grund wurde eine auf dem Prinzip des Folien-Werkstück-Thermoelements aufbauende Messsensorik entwickelt. Ein Thermoelement besteht aus zwei unterschiedlichen metallischen Leitern, die an einem Ende miteinander verbunden sind. Basierend auf dem Seebeck-Effekt erzeugt eine Temperaturdifferenz zwischen der Verbindungsstelle und einer Vergleichsstelle eine elektrische Spannung, die gemessen werden kann. In definierten Temperaturbereichen ist diese Spannung linear zur Temperaturdifferenz. In der entwickelten Sensorik stellt das Werkstück den einen Leiter und die zwischen zwei Werkstückhälften montierte Konstantanfolie (Dicke 25 μm) den zweiten Leiter dar. Zwischen der Konstantanfolie und dem Werkstück befindet sich jeweils eine Isolatorfolie (Dicke 10 μm). Daher sind die beiden Leiter zu Beginn nicht verbunden. Erst durch den Korneingriff wird Werkstoffmaterial über die Isolierung geschoben und der Kontakt zwischen den beiden Leitern in der Zerspanzone geschlossen, so dass eine Temperatur gemessen werden kann. In den Untersuchungen konnte durch eine angepasste Isolation des Messsystems der Störgrößeneinfluss auf die niedrigen zu erfassenden Thermospannungen minimiert werden, so dass eine stabile Messung möglich wurde. Das Ansprechverhalten der Temperatursensorik wurde durch eine numerische Betrachtung vor dem Hintergrund sehr hoher Temperaturgradienten als ausreichend hoch bewertet.

Neben den gemessenen Temperaturen konnten mittels einer optimierten Kraftmessung die Prozesskräfte über der Kontaktzone aufgelöst erfasst werden. Darüber hinaus erfolgte eine Vermessung und Auswertung der erzeugten Ritzspur sowie der Korngeometrie, so dass deren Einfluss auf die Spanbildung und damit die entstehenden Temperaturen und Kräfte bewertet werden kann. Aus ersten Versuchsergebnissen konnten Zusammenhänge zwischen Korngeometrie, Prozessparametern und entstehenden Temperaturen abgeleitet werden, die in weiteren Untersuchungen erweitert werden.

Kontakt

Dipl.-Ing. Matthias Rasim

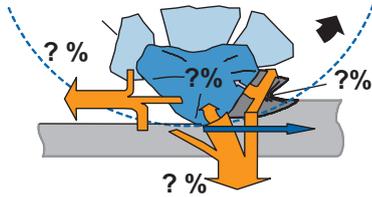
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren

52074 Aachen

Tel.: 0241 – 80 28188

E-Mail: m.rasim@wzl.rwth-aachen.de



Untersuchungen zur Charakterisierung der Spanbildung bei Einkornritzversuchen

*Versuchsmethodik zur Ermittlung von signifikanten
Prozessparametern für die Wärmeentstehung*

Teilprojekt A03 - Energiemodell für Schleifprozesse

Aachen, 29.10.2013

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke
Dipl.-Ing. Matthias Rasim

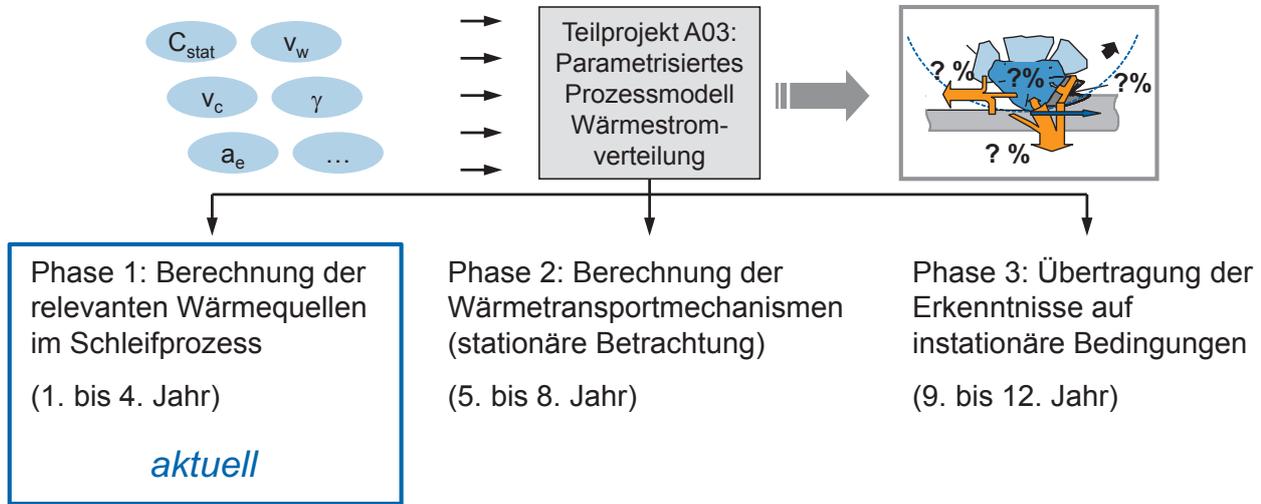
Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren
WZL der RWTH Aachen

1 Einleitung und Motivation

2 Experimentelles Vorgehen

3 Versuchsauswertung & Analyse der Ergebnisse

Gesamtziel des Teilprojektes A03 ist die Modellierung der Wärmestromverteilung für den Schleifprozess.



Wärmeentstehung im Schleifprozess

Bisheriges Vorgehen

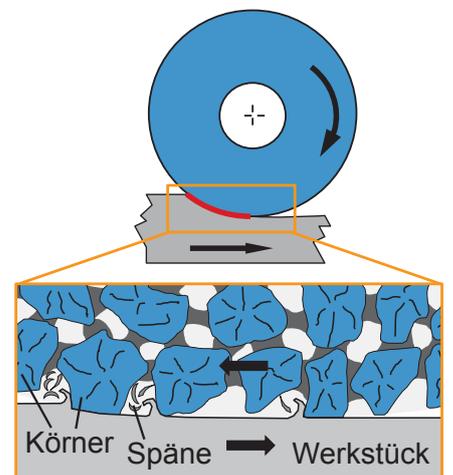


- Schleifscheibenspezifikation
- Kornform(-verteilung)
 - Kornverteilung
 - Kornanteil
 - Bindungsart
 - Bindungsanteil
 - Porenanteil & -verteilung

Schleifscheibentopographie

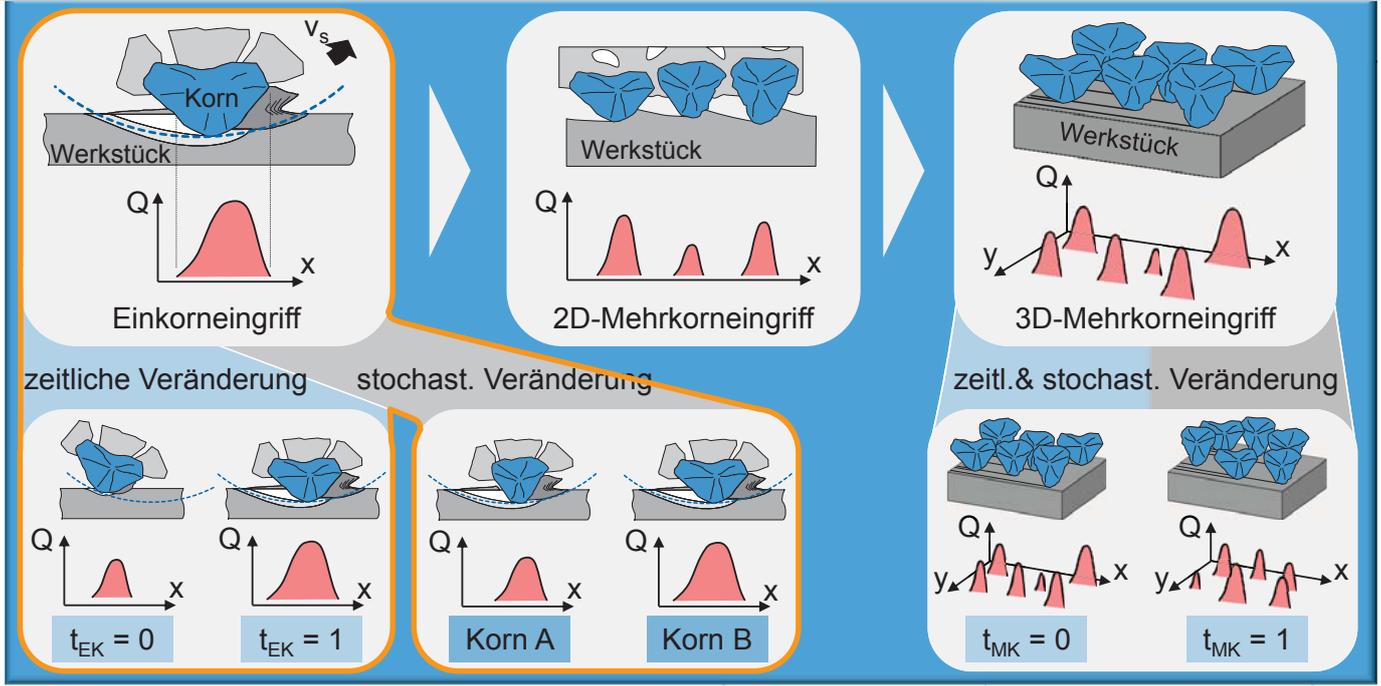
Viele regellos angeordnete Körner

Detaillierte Betrachtung



Für eine allgemeingültigere Modellierung der Wärmeentstehung muss die mit dem Werkstück interagierende Schleifscheibentopographie berücksichtigt werden.

Forschungsansatz: Vom Einkorneingriff zum Kontinuum
 Komplexität der Wärmeentstehung im Schleifprozess



1 Einleitung und Motivation

2 Experimentelles Vorgehen

3 Versuchsauswertung & Analyse der Ergebnisse

Motivation der Versuchsmethodik

Aufgrund der geometrischen Komplexität des Einkorneingriffes mit unregelmäßigen Kornformen und einer Vielzahl an Prozessparametern, ist es erforderlich

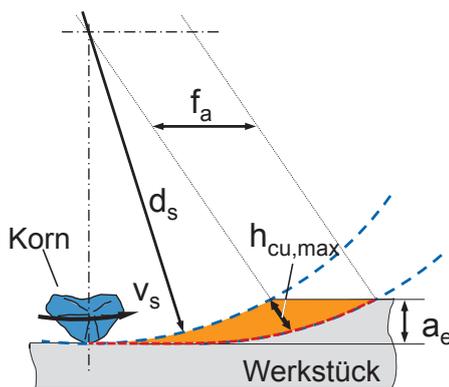
- für die Temperatur- und Wärmeentstehung signifikante Prozessparameter und Korncharakteristika zu ermitteln.

Da die Korncharakteristika in experimentellen Untersuchungen nicht gezielt unabhängig voneinander variiert werden können, ist es erforderlich

- die Spanbildung durch eine thermo-mechanische Simulation mit einem FE-Modell abzubilden,
- zur Validierung der Simulation Temperatur- und Kraftdaten des Einkorneingriffes experimentell zu ermitteln.

Eine experimentelle Temperaturmessung beim Einkornritzen liefert eine wichtige Grundlage für die Beschreibung der Wärmeentstehung bei der Spanbildung am einzelnen Korn.

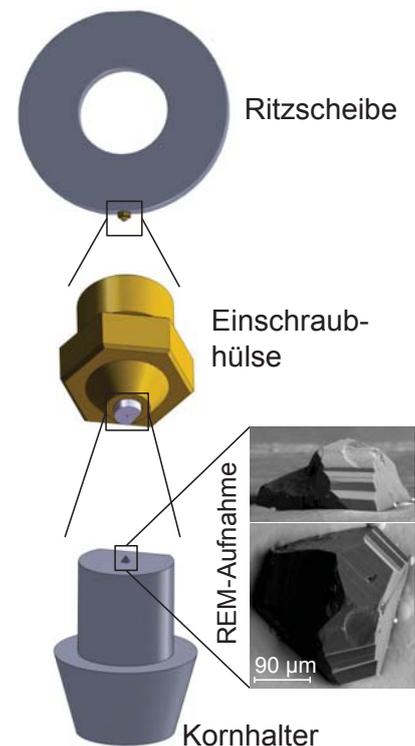
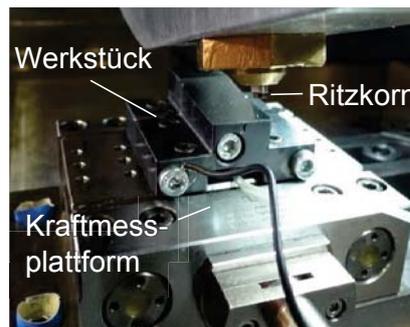
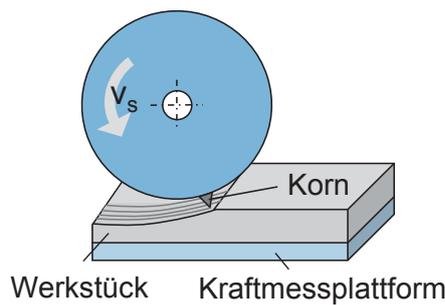
Einkornritzaufbau



$$h_{cu,max} = 2 \cdot \pi \cdot d_s \cdot \frac{v_w}{v_s} \cdot \sqrt{\frac{a_e}{d_s}}$$

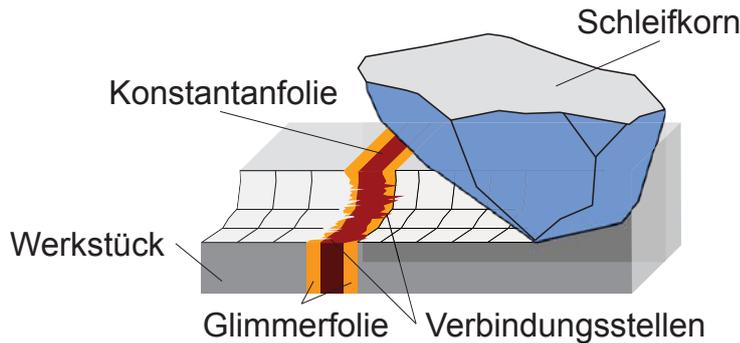
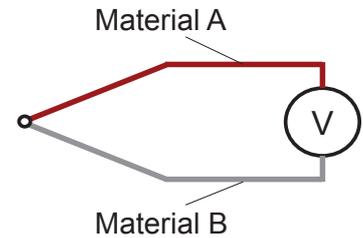
mit

$$v_w = f_a \cdot n_s = f_a \cdot \frac{v_s}{\pi \cdot d_s}$$



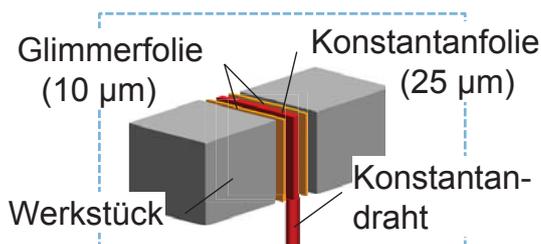
Messprinzip der Temperaturmessung

- Verwendung eines Folien-Werkstück-Thermoelements
- Materialpaarung: Konstantan – 100Cr6 (Eisen)
- Thermoelement vor Versuchsbeginn geöffnet
- Eingreifendes Korn führt zu Mikroverbindungen zwischen der Konstantanfolie und den Werkstückhälften aufgrund von Gratbildung

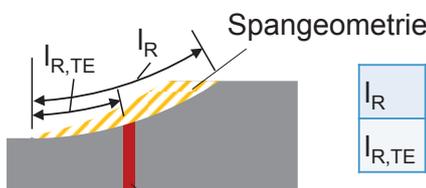


Temperaturmessung innerhalb der Ritzspur

Aufbau der Versuchsbauteile

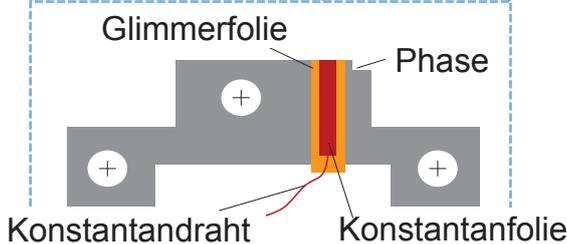


- Der Konstantandraht ist mit der Folie per Kondensator-Impulsschweißen verbunden.
- Die Teilung der verschraubten Bauteilhälften ist an verschiedenen Stellen möglich.

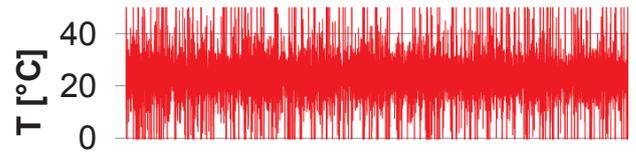
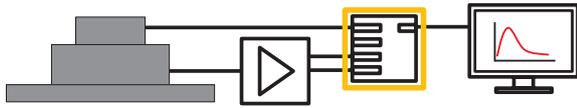


l_R	[mm]	28,3		
$l_{R,TE}$	[mm]	12	20	26

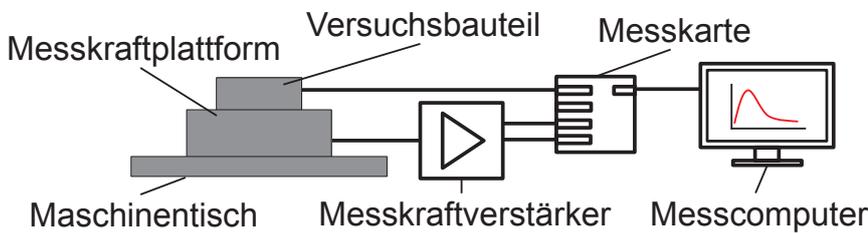
- Die Grate an Konstantanfolie und Bauteilhälften müssen geglättet werden, um die Zerstörung der Glimmerfolie zu vermeiden.
- Die Folien müssen bündig mit der Werkstückoberfläche abschließen.



Auslegung des Messsystems

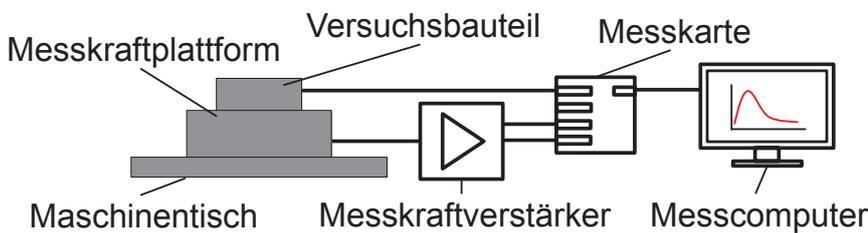
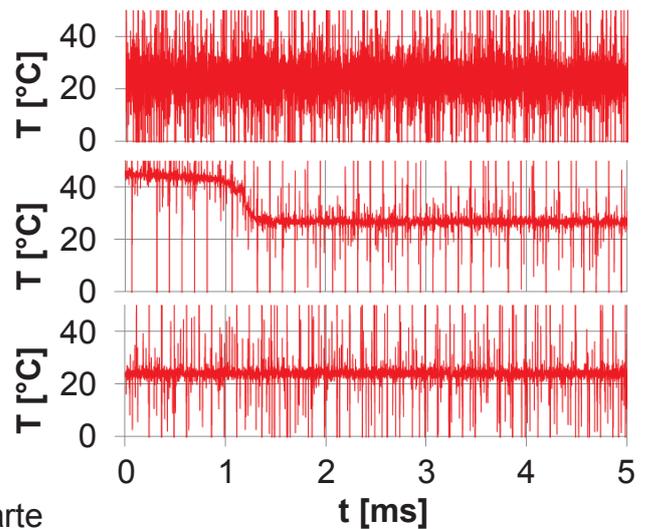
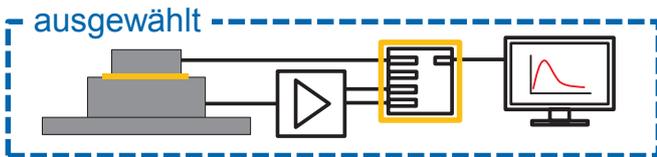
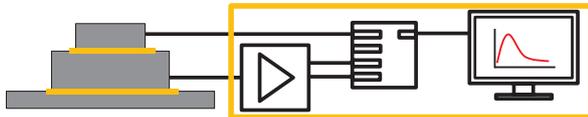


- Geringe Thermospannungen (1,019 mV bei 20 °C) führen zu einer hohen Störanfälligkeit der Temperaturmessung
- Zwei Störungsquellen: Erdungspotentiale und elektromagnetische Strahlung



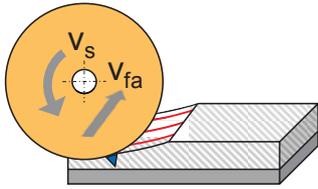
— Isolierung

Auslegung des Messsystems

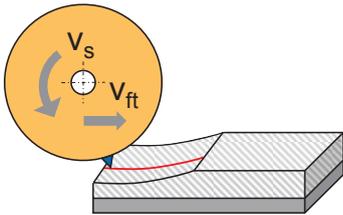


— Isolierung

Versuchsdurchführung



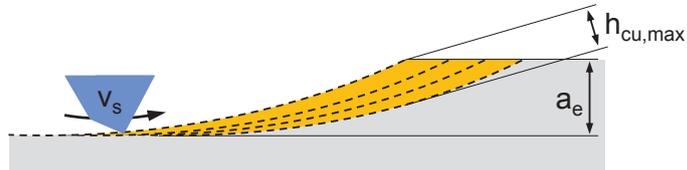
Versuchsvariante 1



Versuchsvariante 2

- Einstechen mit gesamter Zustellung bei axialer Bewegung über das Versuchsbauteil (1)
- Langsames Einstechen bei geringem tangentialen Vorschub pro Umdrehung (2)

Variante	1	2
v_s	10 m/s	10 m/s
a_e	2 mm	2 mm
f_t	0,212 mm	-
v_{ft}	-	0,5 mm/min
$h_{cu,max}$	30 μ m	0,913 μ m



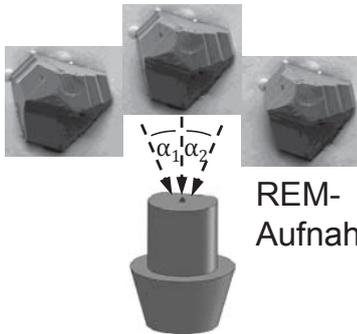
1 Einleitung und Motivation

2 Experimentelles Vorgehen

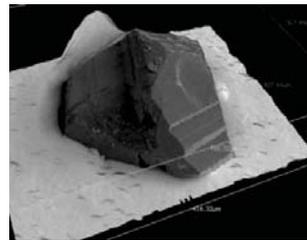
3 Versuchsauswertung & Analyse der Ergebnisse

Ermittlung der Eingriffsgeometrie

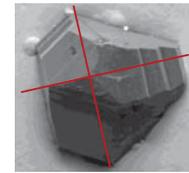
Analyse der Kornform



REM-Aufnahme



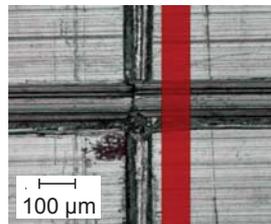
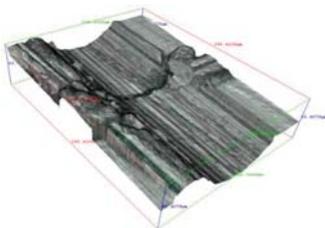
3D-Körper



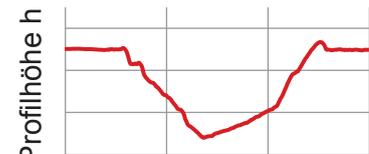
Geometrische Parameter

- Spanwinkel
- Querschnittsfläche

Analyse der Ritzspur



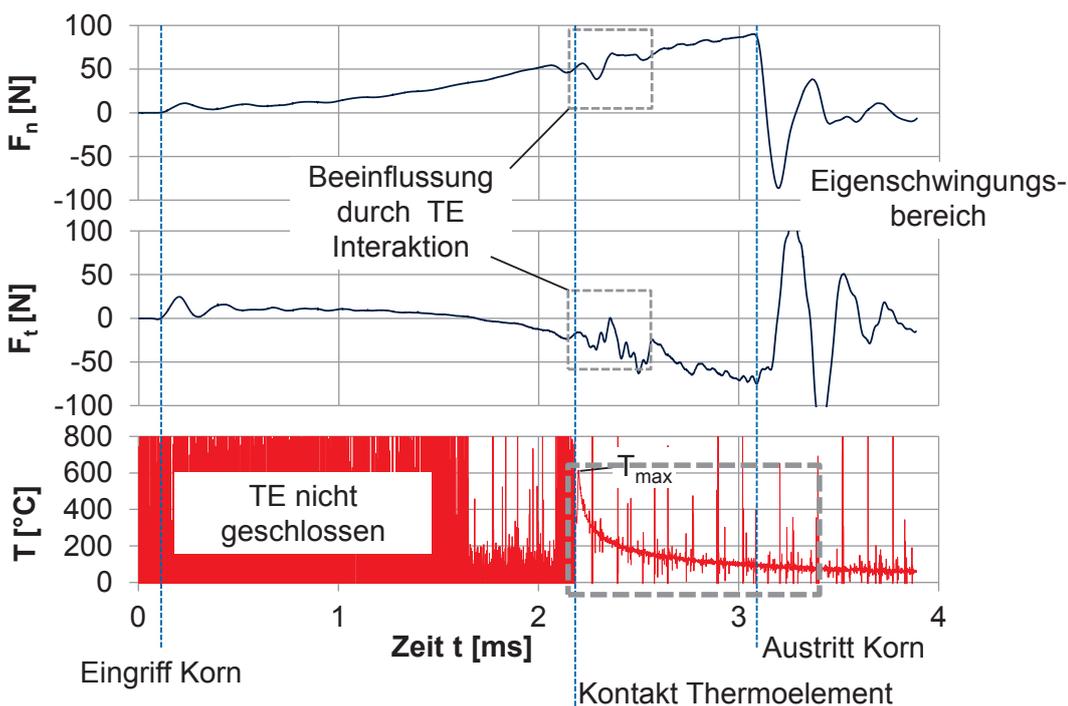
100 µm



Profilbreite b

- Spannungsdicke h_{cu}
- Ritzquerschnittsfläche A_R

Versuchsergebnisse



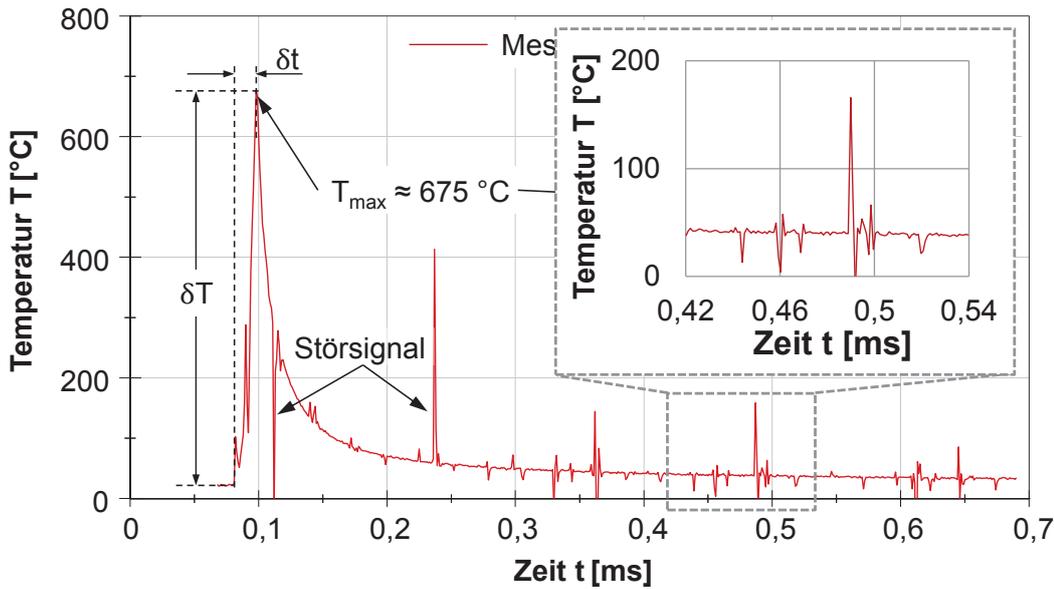
Werkstoff
100Cr6 (60 ± 1 HRC)

Schneidstoff
B213 (ABN600)

Ritzparameter
 $v_s = 10$ m/s
 $v_w = 101$ mm/min
 $a_e = 2$ mm
 $h_{cu,max} = 30$ µm

Versuchsvariante 1

Temperatursignal Einkornritzprozess



Werkstoff
100Cr6 (60 ±1 HRC)
Schneidstoff
B213 (ABN600)

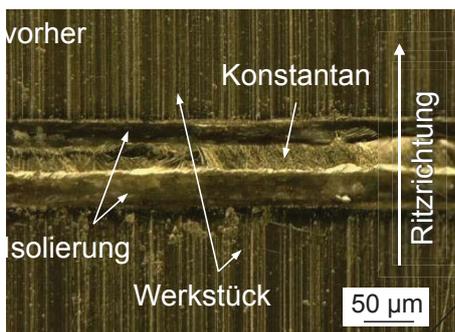
Ritzparameter
v_s = 10 m/s
v_w = 101 mm/min
a_e = 2 mm
h_{cu,max} = 30 μm

Versuchsvariante 1

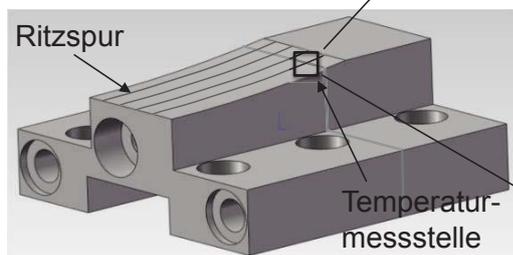
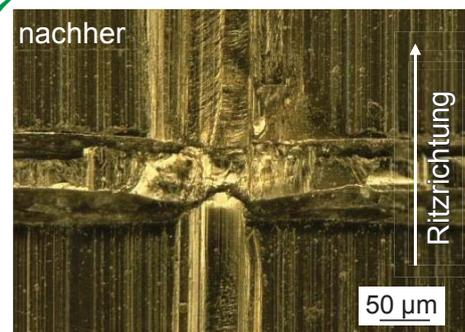
■ Sehr hohe Temperaturänderungsgeschwindigkeit:

$$v = \frac{\delta T}{\delta t} \approx 6 \cdot 10^7 \text{ K/s}$$

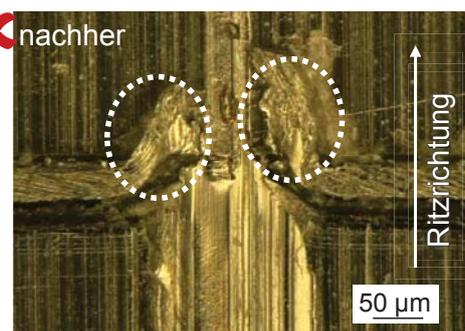
Ausbildung der Temperaturmessstelle



Verbindungsstellen nur innerhalb der Ritzspur ✓

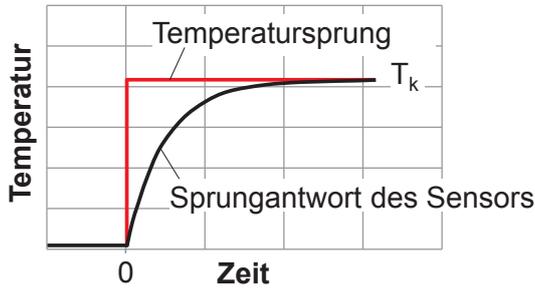


Verbindungsstellen außerhalb der Ritzspur ✗

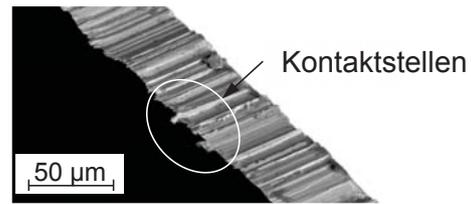


Ansprechverhalten des Thermoelements

Übertragungsfunktion eines Temperatursensors



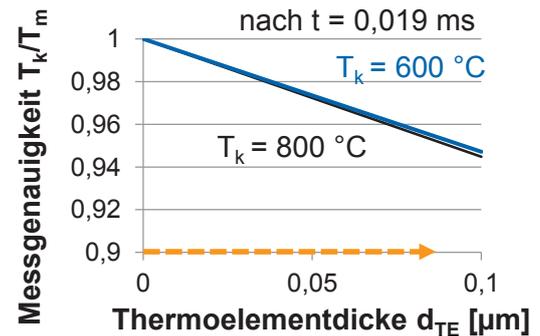
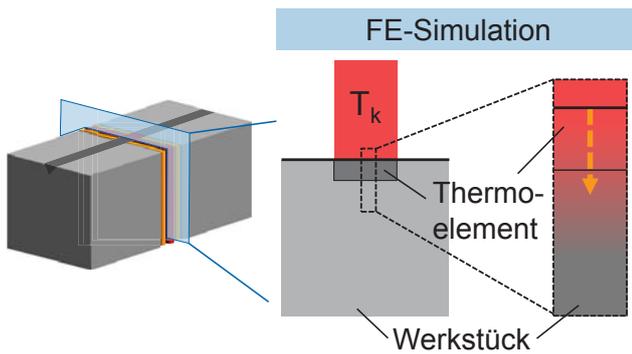
Konstantanfolie nach Einsatz im Schleifprozess



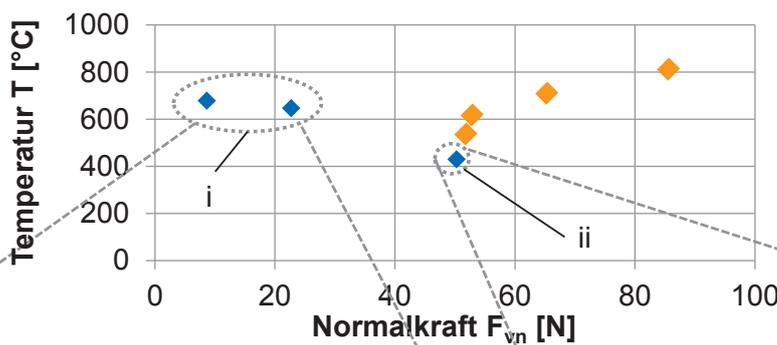
Quelle: Duscha

T_m : mittlere Temperatur des Thermoelements (Messwert)

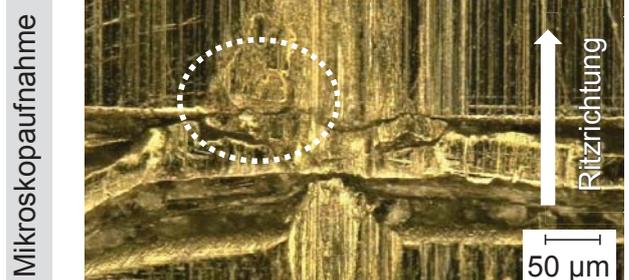
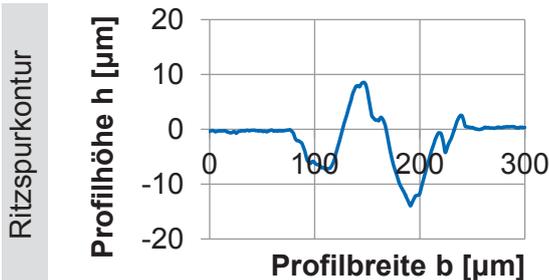
T_k : Temperatur in der Kontaktzone



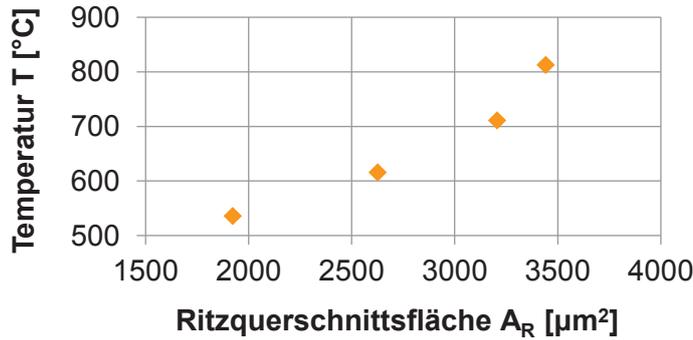
Temperatur – Normalkraft



Werkstoff
100Cr6 (60 ± 1 HRC)
Schneidstoff
B213 (ABN600)
Ritzparameter
 $v_s = 10$ m/s
 $v_w = 101$ mm/min
 $a_e = 2$ mm
 $h_{cu,max} = 30$ µm
Versuchsvariante 1



Temperatur – Ritzquerschnittsfläche



Werkstoff

100Cr6 (60 ± 1 HRC)

Schneidstoff

B213 (ABN600)

Ritzparameter

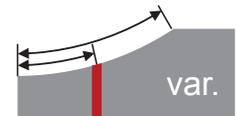
$v_s = 10$ m/s

$v_w = 101$ mm/min

$a_e = 2$ mm

$h_{cu,max} = 30$ μm

Versuchsvariante 1



$l_{R,TE} = \text{var.}$

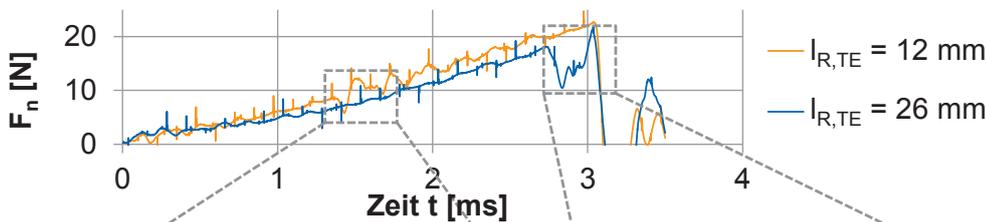
$h_{cu} = \text{var.}$



- Die Ritzquerschnittsfläche variiert aufgrund unterschiedlicher Position des Thermoelements **und** aufgrund unterschiedlicher Kornformen.
- Um beide Einflussfaktoren getrennt voneinander zu untersuchen, muss eine Größe jeweils konstant gehalten werden.

Einfluss der Eindringtiefe

- Verwendung desselben Korns bei unterschiedlichen Bauteilen



Werkstoff

100Cr6 (60 ± 1 HRC)

Schneidstoff

B213 (ABN600)

Ritzparameter

$v_s = 10$ m/s

$v_{ft} = 0,5$ mm/min

$a_e = 2$ mm

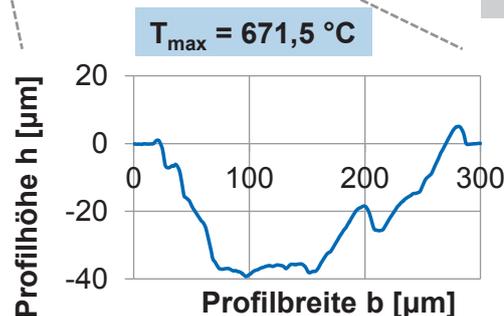
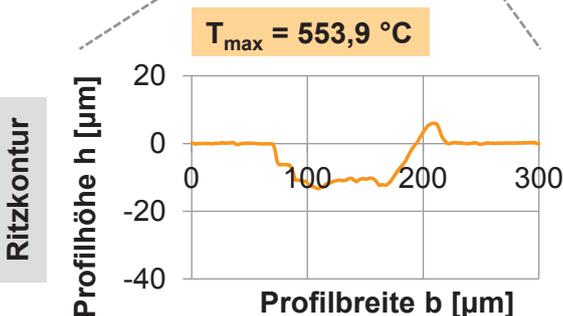
$h_{cu,max} = 0,91$ μm

Versuchsvariante 2

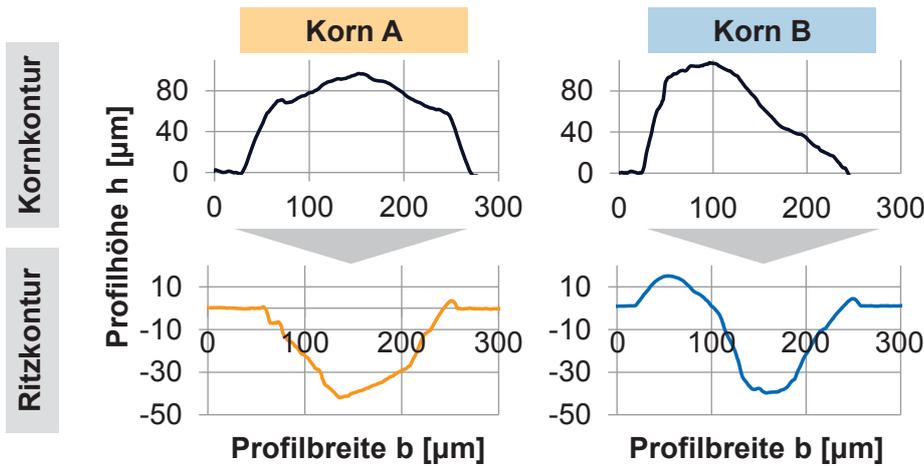


$l_{R,TE} = \text{var.}$

$h_{cu} = \text{var.}$



Einfluss des Kornprofils



Werkstoff

100Cr6 (60 ± 1 HRC)

Schneidstoff

B213 (ABN600)

Ritzparameter

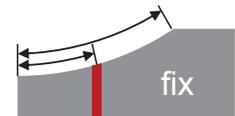
$v_s = 10$ m/s

$v_{ft} = 0,5$ mm/min

$a_e = 2$ mm

$h_{cu,max} = 0,91$ µm

Versuchsvariante 2



$l_{R,TE} = \text{konst.}$

$h_{cu} = \text{konst.}$

Spanwinkel
 $\gamma = -35^\circ$



Normalkraft	$F_n = 11,6$ N	$F_n = 4,5$ N
Tangentialkraft	$F_t = 10,9$ N	$F_t = 5,0$ N
Temperatur	$T_{max} = 338,4$ °C	$T_{max} = 374,2$ °C

Seite 23

Zusammenfassung und Ausblick

- Die umgesetzte Temperaturmessung mit dem Folien-Werkstück-Thermoelement ermöglicht es, die Temperaturentstehung beim Einkorneingriff zu erfassen.
 - Das Ansprechverhalten der Thermoelemente ist ausreichend schnell, um die auftretenden Temperaturgradienten von bis zu $6 \cdot 10^7$ K/s zu erfassen.
 - Es wurden erste Ergebnisse zum Einfluss der Eingriffsgeometrie auf die entstehenden Temperaturen und Kräfte gewonnen.
-
- Erweiterung der bisher gewonnenen Erkenntnisse durch weitere Untersuchungen bei Variation der Prozessparameter wie der Schnittgeschwindigkeit

Seite 24

Grundlagenprüfstand für Spannungsprozesse mit bestimmter Schneide: Aufbau, experimentelle Ergebnisse und Nutzung für Prozess-modellierung und –simulation

*M. Brockmann, F. Klocke; WZL RWTH Aachen
G. Schmidt, U. Semmler; Fraunhofer IWU Chemnitz*

Für die Zielstellung des SFB/Transregio 96 sind die Wärmeströme von Interesse, die, ausgehend von der Zerspanungswärmequelle (Fräsen, Drehen, Bohren), über das Werkzeug und dessen Spannhalter in die Spindel und über das Werkstück und dessen Spannvorrichtung in den Maschinentisch gehen. Diese Wärmeströme beeinflussen die Lage des TCP (Tool Center Point) infolge thermischer Dehnungen sowohl auf der Werkzeug- als auch auf der Werkstückseite. Ihre genaue Kenntnis ist folglich für die Genauigkeit der Maschine als auch für notwendige Kompensationsstrategien von großer Bedeutung. Der vorgestellte, am Fraunhofer IPT in Aachen entwickelte Grundlagenversuchsstand und die dort eingesetzten Messmethoden für Temperatur und Schnittkraft ermöglichen einen Abgleich und eine Verbesserung der im Vortrag dargelegten analytischen Modellansätze für die Zerspanungswärmequelle. Als Modell wurde hier eine auf der Potenzialtheorie basierende Lösung der Wärmeleitungsdifferentialgleichung abgeleitet. Die durchgeführten Versuche dienen hierbei zur Parametrierung und Validation des entwickelten Modells.

Experiment

Das Messen von Temperaturen in der Zerspanung ist aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Temperaturgradienten, der sehr kleinen Zeitkonstanten des Prozesses, der kleinen Dimensionen der Spanbildungszone und deren begrenzter Zugänglichkeit eine Herausforderung, verbunden mit einem großen experimentellen Aufwand.

In dem Vortrag werden der Grundlagenversuchsstand und die in ihm realisierte Messmethode vorgestellt. Sie kombiniert Infrarotkamera- mit Pyrometermessungen, verbindet damit die Vorteile beider Messmethoden und erlaubt die Ermittlung der Temperaturverteilung mit genauer Erfassung der Absoluttemperatur ohne explizite Kenntnis des Emissionsgrades.

Simulation

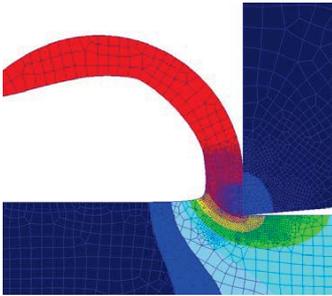
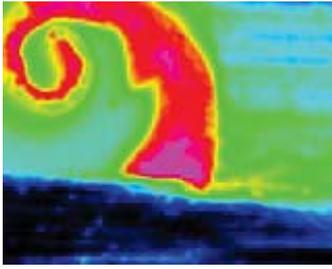
Über die analytische Modellierung hinausgehend können numerische Simulationsmodelle des Zerspanungsprozesses eine höher aufgelöste Temperaturverteilung in der Spanbildungszone und im Werkzeug und Werkstück liefern und zu weiterer Präzisierung der Modellansätze für die Wärmequellen beitragen. Im zweiten Teil des Vortrages werden für diese Simulationsmodelle dargelegt,

- wie aus diesen Modellen die interessierenden Wärmeströme in das Werkzeug und in das Werkstück für unterschiedliche Werkstoffe und Schneidstoffe, Prozessparameter und Schnittbedingungen ermittelt werden können und
- wie für den Abgleich der Modelle die Temperatur- und Kraftmessungen aus dem Grundlagenversuchsstand genutzt werden.

Weiterhin wird kurz anhand von Messungen und Simulationen gezeigt, welche Wärmedehnungen der ins Werkzeug gehende Wärmestrom verursacht und wie er damit die Lage des TCP beeinflusst.

Kontakt

*Dipl.-Ing. Matthias Brockmann
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren
52074 Aachen
Tel.: 0241 –80 20255
E-Mail: m.brockmann@wzl.rwth-aachen.de*



GRUNDLAGENPRÜFSTAND FÜR SPANUNGSPROZESSE MIT BESTIMMTER SCHNEIDE

Aufbau, Experimentelle Ergebnisse und Nutzung für Prozessmodellierung und -simulation (A01, A02)

3. Kolloquium zum SFB/TR-96
29.10 - 30.10.2013, Aachen

Autoren:

Dipl.-Ing. Matthias Brockmann, Prof. Fritz Klocke
WZL RWTH Aachen

Dr. Ulrich Semmler, Dr. Gerhard Schmidt
Fraunhofer IWU Chemnitz

Forschungsziele der TP A01/A02

Ziel des Teilprojektes A01 ist die Beschreibung der thermo-energetischen Wirkungen auf spanende Werkzeuge und Werkstückspannmittel



Wärmequelle
auf das Werkzeug,
das Werkstück und
dessen Spannmittel

Ziel des Teilprojektes A02 ist die parametrisierte Modellierung der Wärmeströme und deren Aufteilung beim Fräsen.



Bestimmung der Wärmequelle über numerische Simulation des Zerspanungsprozesses

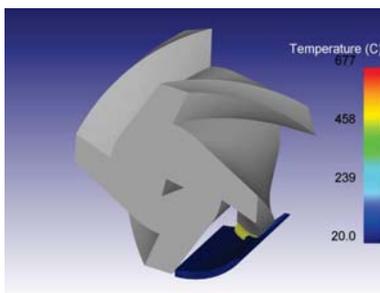
Beschreibung der Wärmequelle über parametrisches Modell

Nutzung des Grundlagen- versuchsstandes für Modell- und Parameterabgleich

Agenda

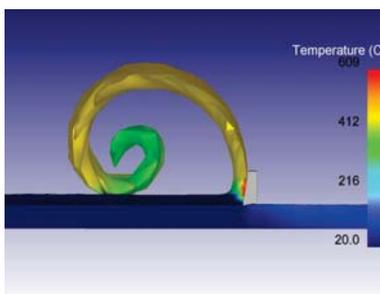
- 1 Vorstellung Grundlagenprüfstand
- 2 Messsensoren und Methodik
- 3 Nutzung für Prozessmodellierung
- 4 Nutzung für Prozesssimulation
- 5 Zusammenfassung und Ausblick

Realprozess und Analogieprozess



Realbedingungen Fräsen

- Keine in-situ Fotografie am Ort der Zerspaltung möglich
- Keine Temperaturmessung am Ort der Zerspaltung möglich
- Grundlagenuntersuchungen zur Zerspaltung innovativer Materialien werden bislang nur durch kontinuierliche Drehprozesse abgebildet

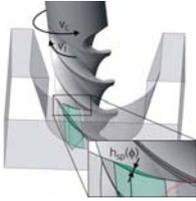


Translatorische Zerspaltung

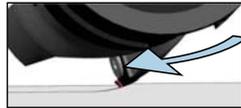
- Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Temperaturmessung werden in der Zerspaltung mit unterbrochenem Schnitt ermöglicht
- Systematische Untersuchung der Interaktion Schneide – Werkstück im Hinblick auf Verschleißeffekte und Werkstückrandzonenbildung
- Optimierung der strategiespezifischen Parameter und der Schneidenmikrogeometrie

Spanabwicklung – Überführung in linearen Schnitt

»Eingriffsbedingungen
5-Achs-Fräsen«



»Realer Fräsprozess«



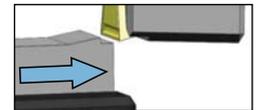
»Reale Spanungsgeometrie«



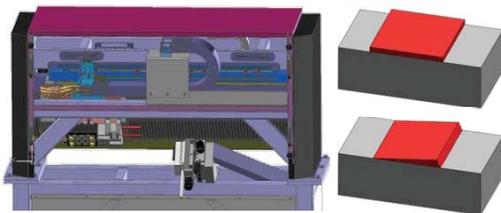
»Vereinfachte Spanungsgeometrie«



»Analogie Fräsprozess«

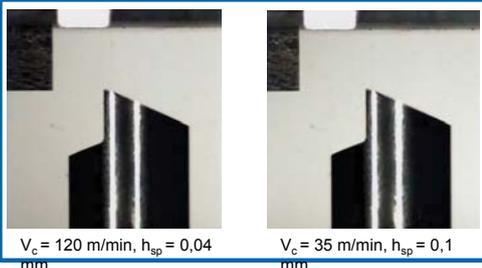


Analogieprüfstand für Fräsprozesse



- Geschwindigkeit 10 – 140 m/min
- Genauigkeit 2 µm
- Spanungsdicke 5 – 250 µm
- Prozesskräfte bis 2000 N
- Variable Spanungsgeometrie
- Variable Werkzeuggeometrie
- Quick-Stop Fähigkeit, definiert einstellbar
- Gute Zugänglichkeit und Implementierbarkeit für Messtechnik:
 - Kraftmessplattform
 - Hochgeschwindigkeitskamera
 - Pyrometer
 - Infrarotkamera

Orthogonalschnitt - Böhler S790



$V_c = 120 \text{ m/min}$, $h_{sp} = 0,04$
mm

$V_c = 35 \text{ m/min}$, $h_{sp} = 0,1$
mm

Agenda

- 1 Vorstellung Grundlagenprüfstand
- 2 Messsensoren und Methodik
- 3 Nutzung für Prozessmodellierung
- 4 Nutzung für Prozesssimulation
- 5 Zusammenfassung und Ausblick

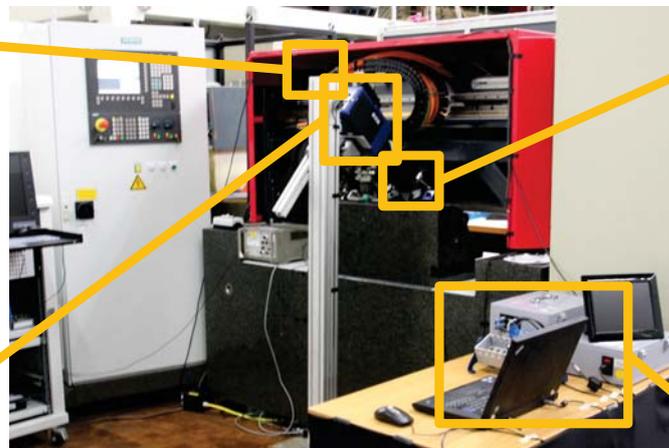
Versuchsaufbau



Lichtschranke



Infrarotkamera



Grundlagenprüfstand

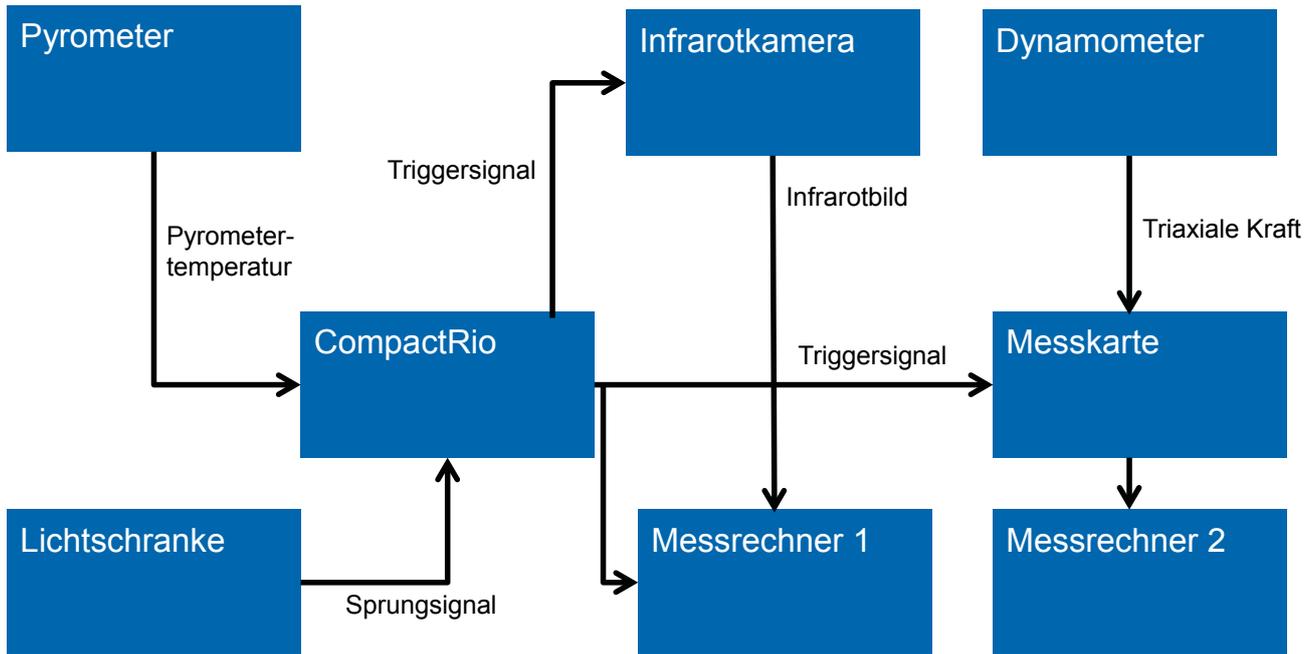


Pyrometer & Dynamometer

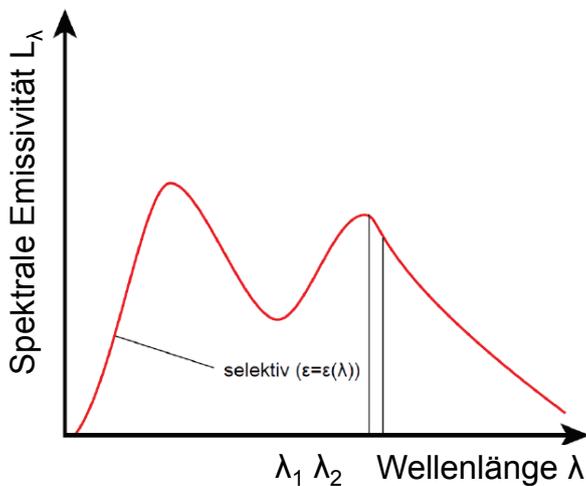


Daten Akquisition

Messkette



Arbeitsweise des Zweifarbenpyrometers



- Emission der Teilfläche

$$\dot{q}''_{\lambda,real}(T) \approx \epsilon_{\lambda} \cdot \dot{q}''_{\lambda,schwarz}(T)$$

- Pyrometersignal (λ -abhängig)

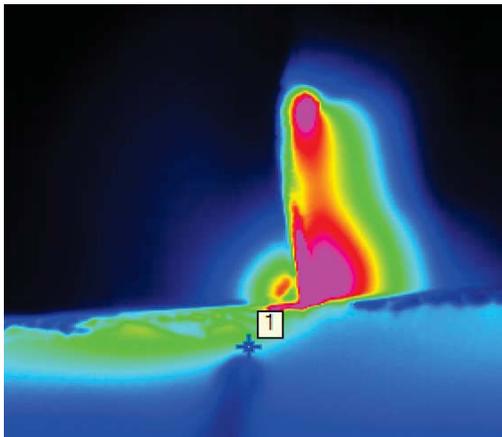
$$U_{\lambda,i}(T) = K_{\lambda,i} \cdot \epsilon_{\lambda,i} \cdot \dot{q}''_{\lambda,i,schwarz}(T)$$

- Wert der Temperaturberechnung

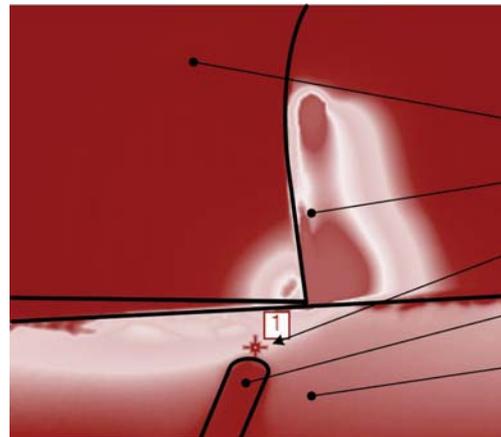
$$R = \frac{U_{\lambda,1}(T)}{U_{\lambda,2}(T)} = \frac{K_{\lambda,1} \cdot \epsilon_{\lambda,1} \cdot \dot{q}''_{\lambda,1,schwarz}(T)}{K_{\lambda,2} \cdot \epsilon_{\lambda,2} \cdot \dot{q}''_{\lambda,2,schwarz}(T)}$$

Kombination von Zweifarbenpyrometer und Infrarotkamera

Polychromatische Skala



Monochromatische Skala



Schneidkante
Span
Messpunkt (2-Farben Pyrometer)
Optische Faser
Werkstück

- Infrarotkamera: Kalibrierter Temperaturbereich von 0°C bis 1000°C, Temperaturverteilung sichtbar, aber keine absoluten Werte (aufgrund unbekannter Emissivität)
- Zweifarbenpyrometer: Kalibrierter Temperaturbereich ~200°C bis 2000°C, absolute Temperatur, aber nur an einem Punkt

Ergebnisse der Infrarotkameranmessung

Bild 369

Bild 370

Bild 371

Bild 372

Bild 373



- Abtastrate Infrarotkamera: 250 Bilder/s
- Abtastrate wird durch die geringste verwendete Integrationszeit bestimmt

Info: Die SC7600 Infrarotkamera kann mehrere Integrationszeiten verwenden, um verschiedene Temperaturbereiche abzudecken

- Diskrete Messwerte erreichen nicht immer das gleiche Digitale Level (Temperatur) für jede Schneide

Zeitsignale der Infrarotkamera und des Zweifarbenpyrometers 1/2

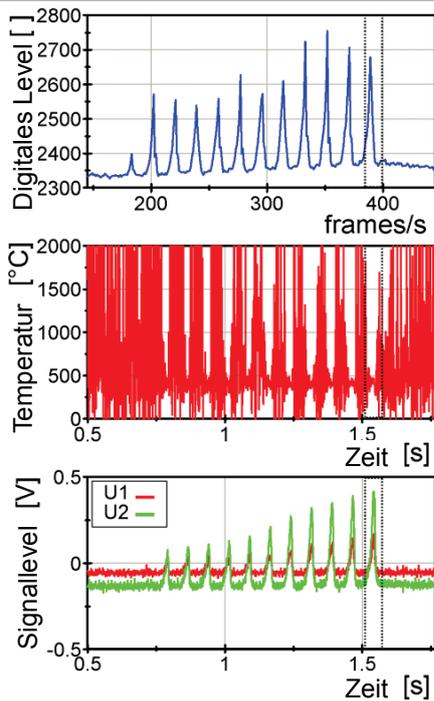
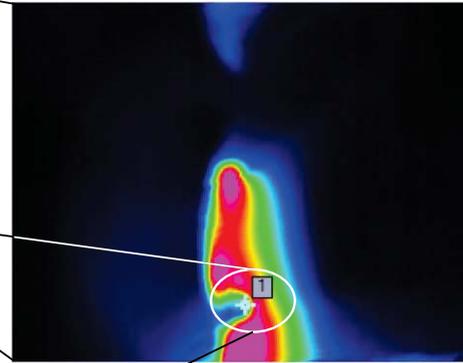
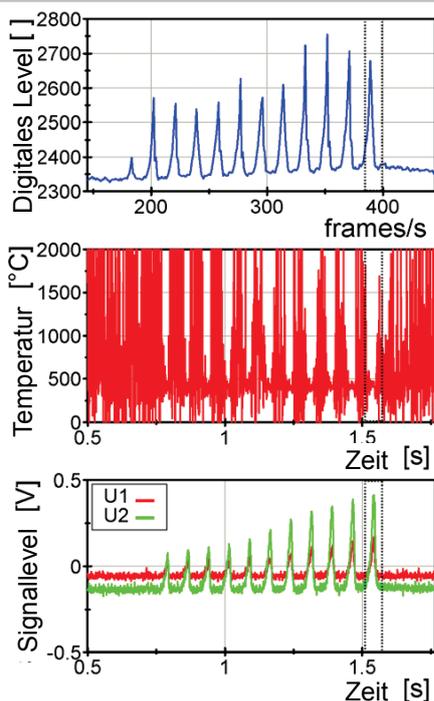


Bild 371



- Signal der Infrarotkamera (Auszüge des Zeitverlaufs)
- Signal des Zweifarbenpyrometers
 - a) Temperatursignal
 - b) Detektorspannungen U_1 und U_2

Zeitsignale der Infrarotkamera und des Zweifarbenpyrometers 2/2

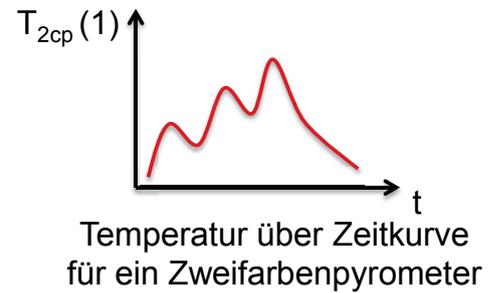
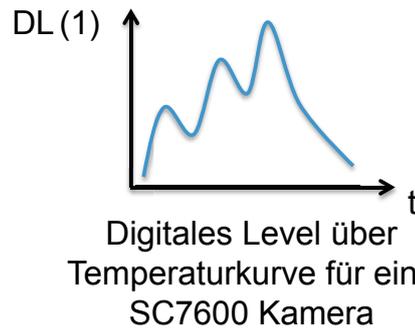
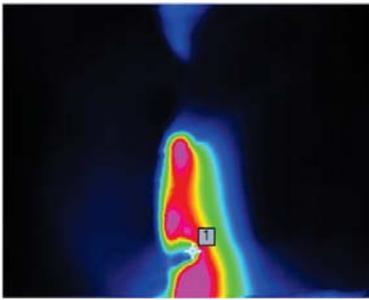


- Das Infrarotkameranabild liefert Informationen über die Verteilung
- Wenn keine Informationen über den Emissionsgrad des Objektes vorliegen, kann das Digitale Level nicht in Temperaturdaten umgeformt werden.
- Die Daten des Zweifarbenpyrometers sind absolute Temperaturwerte, allerdings nur für einen einzelnen Punkt

Frage:

- Wie kann das Infrarotbild kalibriert werden?

Kalibrierungskonzept für Infrarotkamerabild



$$DL = W \cdot k$$

$$W = \varepsilon(T) \cdot \tau \cdot \sigma \cdot T^4$$

↓

$$DL = k \cdot \varepsilon(T) \cdot \tau \cdot \sigma \cdot T^4$$

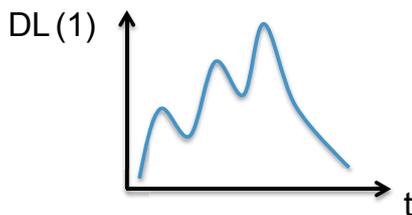
$$\dot{q}_{\lambda,real}''(T) \approx \varepsilon_{\lambda} \cdot \dot{q}_{\lambda,schwarz}''(T)$$

$$U_{\lambda,i}(T) = K_{\lambda,i} \cdot \varepsilon_{\lambda,i} \cdot \dot{q}_{\lambda,i,schwarz}''(T) \quad \varepsilon_{\lambda,1} \equiv \varepsilon_{\lambda,2}$$

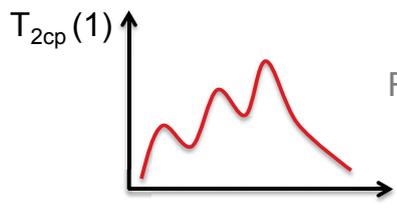
↓

$$T_{2cp} = \frac{U_{\lambda,1}(T)}{U_{\lambda,2}(T)} = \frac{K_{\lambda,1} \cdot \cancel{\varepsilon_{\lambda,1}} \cdot \dot{q}_{\lambda,1,schwarz}''(T)}{K_{\lambda,2} \cdot \cancel{\varepsilon_{\lambda,2}} \cdot \dot{q}_{\lambda,2,schwarz}''(T)}$$

Kalibrierungskonzept für Infrarotkamerabild

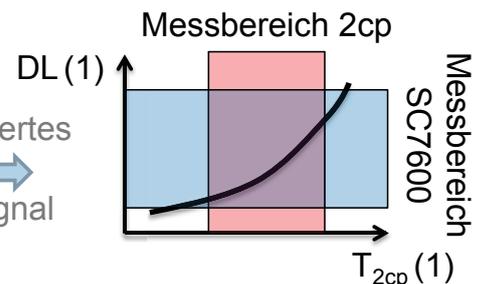


Digitales Level über Temperaturkurve für eine SC7600 Kamera



Temperatur über Zeitkurve für ein Zweifarbenpyrometer

Reduziertes Zeitsignal



Digitales Level (SC7600) über Temperatur (Zweif.pyr.)

- Schritt 1: Synchronisation der Daten von IR-Kamera und Zweifarbenpyrometer
- Schritt 2: Auftragen des DL über „realem“ Temperaturverlauf des Zweifarbenpyrometers
- Schritt 3: Nutzung dieser Kalibrierungskurve, um DL in Temperatur zu wandeln

Beschränkungen:

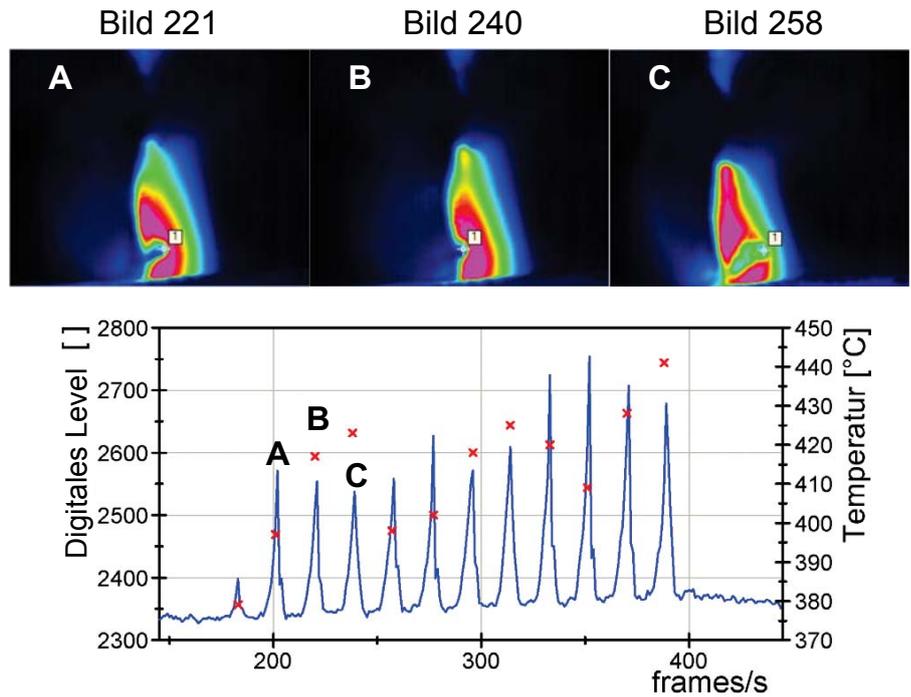
- Überschreiten der Objektgrenzen resultiert in geänderter Emissivität (!)

Arbeiten mit den realen Daten

- Problem mit realen Daten: Synchronisation der Abtastrate und der Zahneingriffsfrequenz
- Für unterschiedliche Zahneingriffe werden verschiedene maximale Temperaturen gemessen

Frage:

- Wie können die Messdaten korrigiert werden?

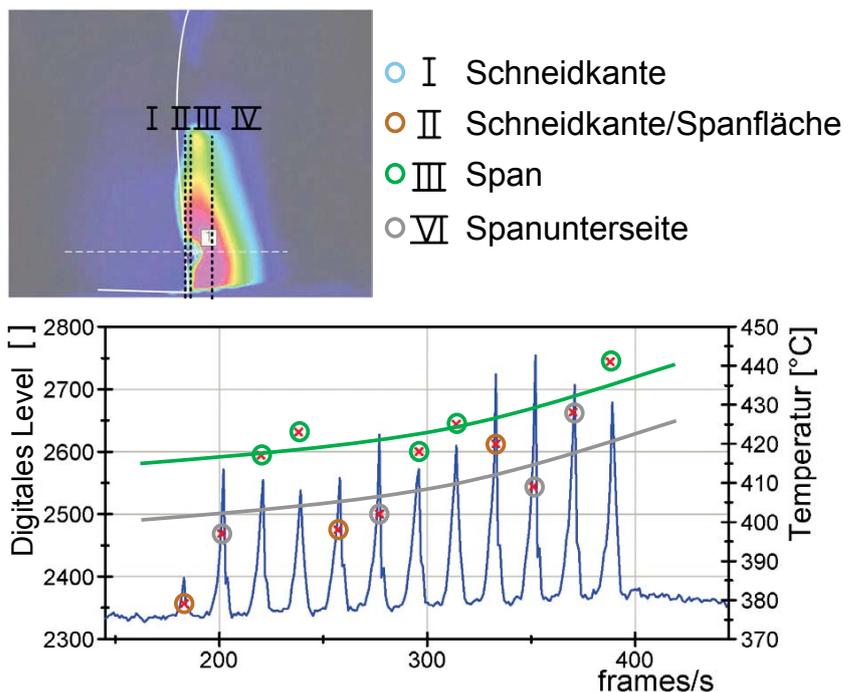


Arbeiten mit den realen Daten

- Verschiedene Kategorien für die Synchronisation der optischen Fasern und der Kamerabilder
- Es wird eine Kategorie für eine Kalibrierungskurve betrachtet

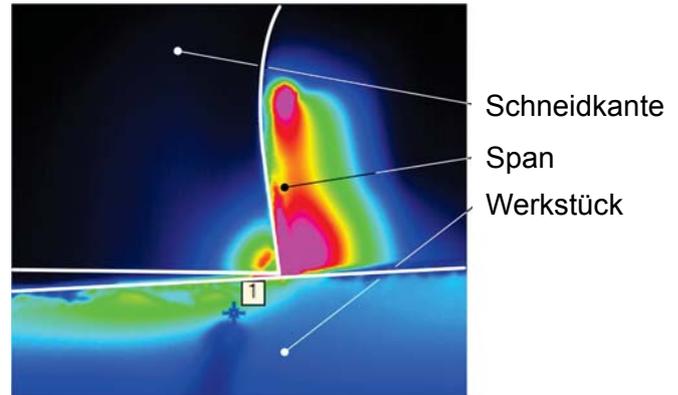
Ergebnis:

- Geringere Abweichung der Messwerte und präzisere Kalibrierungskurve



Gültigkeitsbereich

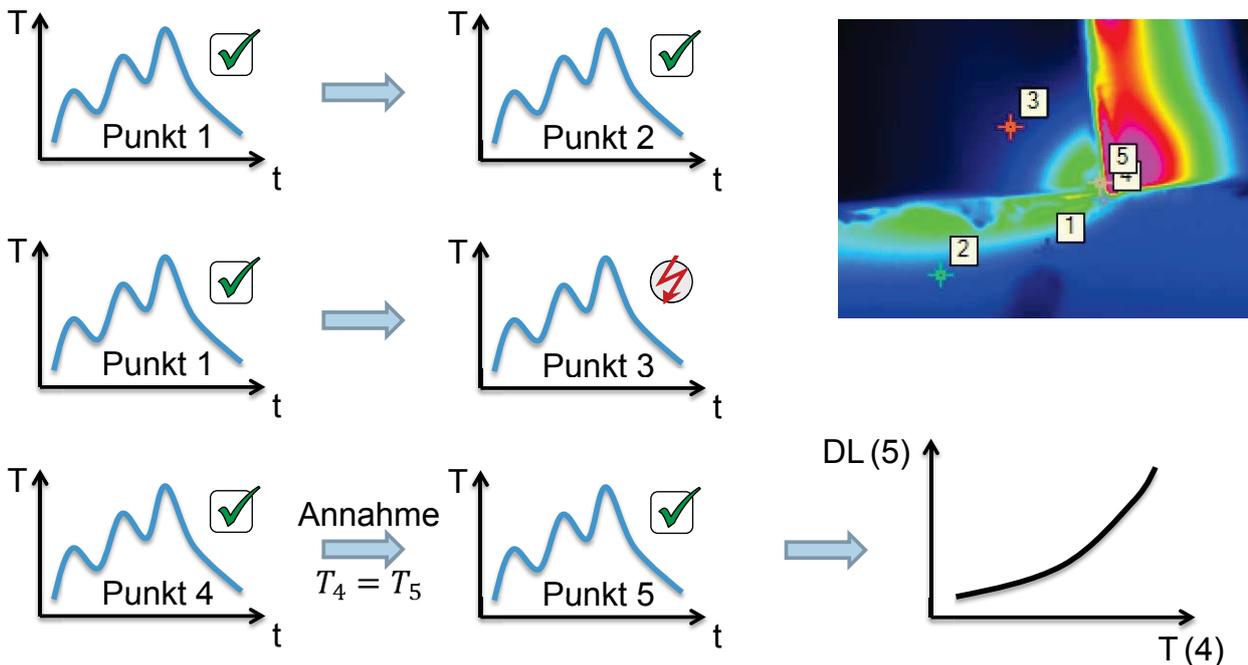
- Durch die Verwendung eines absoluten Messprinzips (Zweifarbpyrometer) in Verbindung mit einem IR-Bild wird die Emissivität des betrachteten Objektes bekannt und das Digitale Level kann in eine Temperaturinformation umgewandelt werden.
- Die gilt, solange valide Daten über das gleiche Objekt in beiden Systemen vorhanden sind



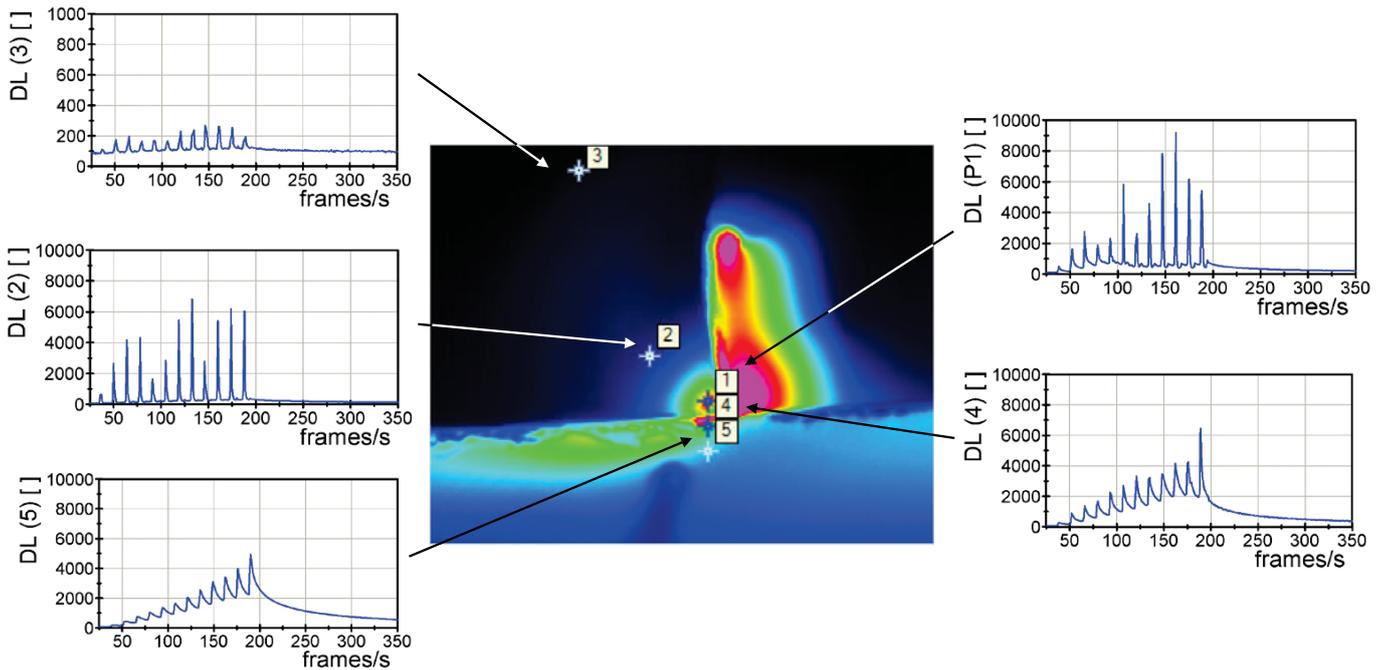
Beschränkungen:

- Wenn die Objekttemperatur außerhalb des Messbereiches ist, muss ein anderes Kalibrierungsprinzip verwendet werden. Dies ist der aktuelle Stand der Technik (!)

Kalibrierungskonzept aus dem Vollbild



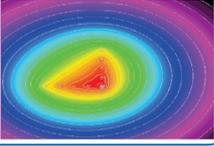
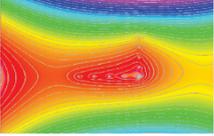
Information über beliebige Punkte im Kamerabild



Agenda

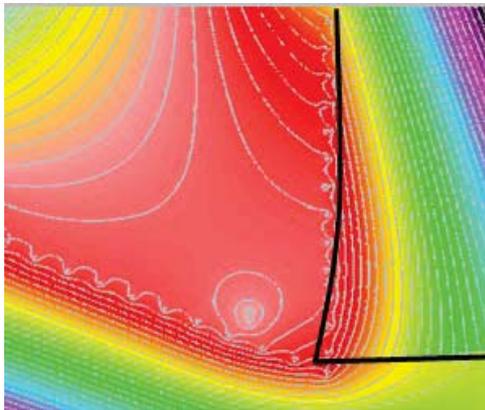
- 1 Vorstellung Grundlagenprüfstand
- 2 Messsensoren und Methodik
- 3 Nutzung für Prozessmodellierung
- 4 Nutzung für Prozesssimulation
- 5 Zusammenfassung und Ausblick

Potenzialtheoretisches Modell Temperaturverteilung

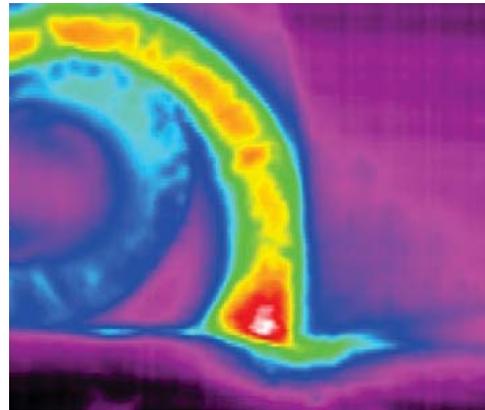
Parallelströmung + Potenzialwirbel + Eckströmung = Potenzialtheoretisches Modell	$F_{uniform} = A z e^{-i\alpha}$	A : 0.111 ... 1.0 α : 0.523 ... 1.26	
	$F_{vortex} = \frac{B i}{2 \pi} \ln (z + z_{sum})$	B : 11.5 ... 14.0 z _{sum} : Vortex location	
	$F_{corner} = C z_{rot}^k$	C : 0.208 ... 0.263 k : 1.85 θ : 0.025π ... 0.05π	
	$F_{total} = A z e^{-i\alpha} + \frac{B i}{2 \pi} \ln (z + z_{sum}) + C z_{rot}^k$		

Vergleich Infrarotkameraaufnahme und Modell

Modell



Infrarotkameraaufnahme

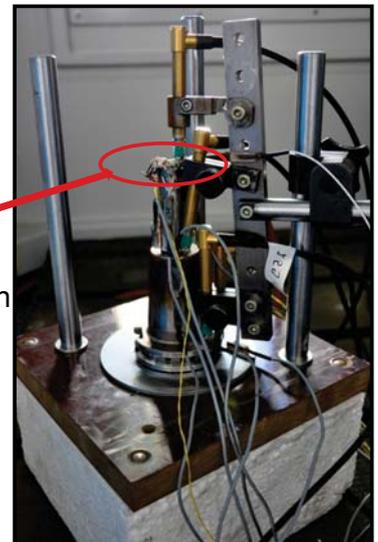


Agenda

- 1 Vorstellung Grundlagenprüfstand
- 2 Messsensoren und Methodik
- 3 Nutzung für Prozessmodellierung
- 4 Nutzung für Prozesssimulation
- 5 Zusammenfassung und Ausblick

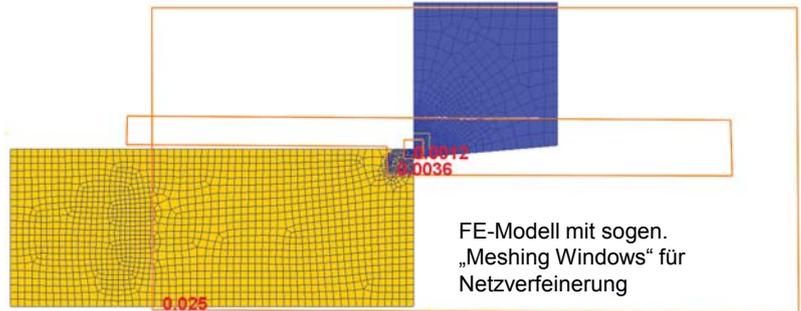
Bestimmung der Wärmequelle mittels numerischer Simulation: Zielstellung

- **Umform- und Reibungswärme** ist die Hauptwärmequelle in den Systemen Werkzeug – Spannfutter und Werkstück – Spannvorrichtung
- Kenntnis der **Größe und der Verteilung der Wärmeströme** ist Voraussetzung zur Bestimmung der aus dem Zerspanungsprozess resultierenden **thermischen Deformationen** im System Werkzeug – Werkstück (Lage des TCP)
- **Größe der in den Versuchen** für die thermo-energetische Betrachtung von Werkzeugen und Werkzeugspannvorrichtungen (Inhalt TP A01) verwendeten Heizungsquellen muss **realistischen Zerspanungswärmen** entsprechen



Bestimmung der Wärmequelle mittels numerischer Simulation: Vorgehensweise (I)

- **FE-Modell** des Zerspanungsprozesses unter gleichen Parametern wie auf dem Grundlagenversuchsstand
- **Hier: 2D-Zerspanung** (Einstechen in 1 mm dicke Scheibe)



- Schnitttiefe $h_{cut}=f_z=0.3$ mm
- Spanwinkel $\gamma=2^\circ$
- Schneidkantenradius $r=5$ μ m
- $v_c=10 \dots 560$ m/min (in Versuchen 10, 35, 70 und 140 m/min realisiert)

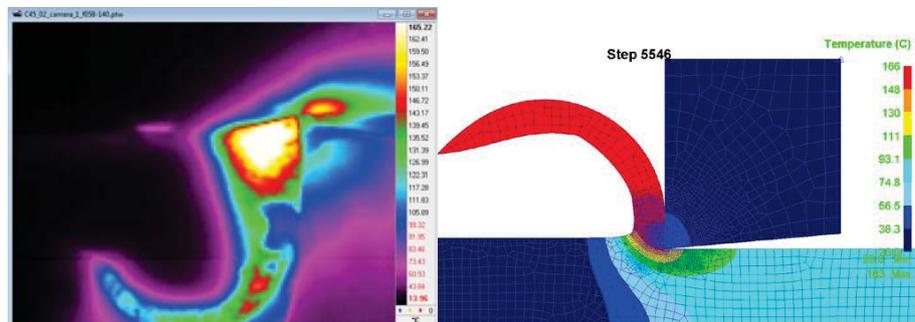
Nutzung der FE-Programme MSC.MARC/Mentat und DEFORM

- Ergebnisse gut übereinstimmend (Nutzung für Vergleich)
- **Hier nur DEFORM-Ergebnisse dargestellt**

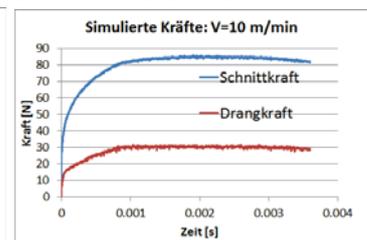
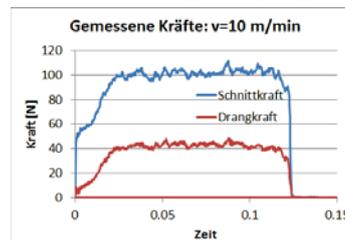
Bestimmung der Wärmequelle mittels numerischer Simulation: Vorgehensweise (II)

Validierung der Modelle durch Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messwerten vom Grundlagenversuchsstand bzgl.

- **Temperatur** (punktuell, nur grob möglich)



- **Zerspanungskräfte**



- **Spanform** (noch nicht erfolgt)

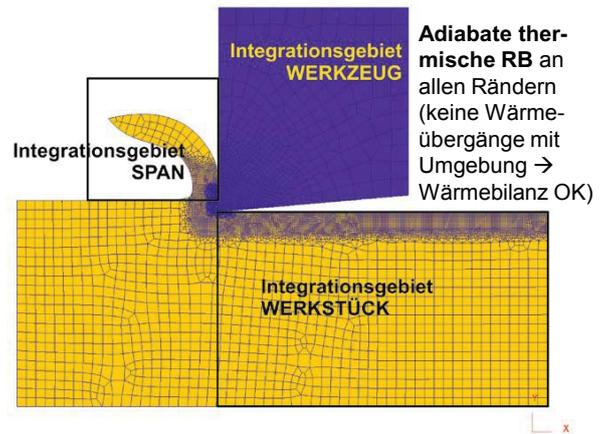
Bestimmung der Wärmequelle mittels numerischer Simulation: Vorgehensweise (III)

- Wärmeerzeugung durch
 - Umformwärme (Dissipation mech. Energie in Wärme) in primärer und sekundärer Scherzone
 - Reibungskontakt an Span- und Freifläche
- Bestimmung der Wärmemengen in Werkstück, Werkzeug und Span zu allen Zeitpunkten der Simulation

$$W_{WZ} = \sum_{e_{WZ}} \int_{\Omega_e} \rho(T) c_p(T) T d\Omega$$

(analog für W_{Span} und W_{WS})

- Wärmeströme ins Werkstück, Werkzeug und Span zu allen Zeitpunkten der Simulation

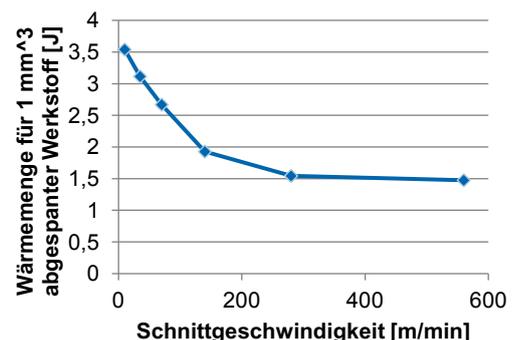
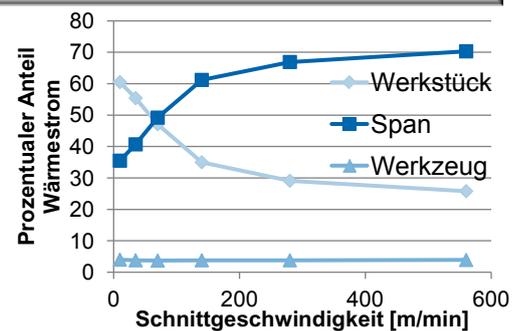
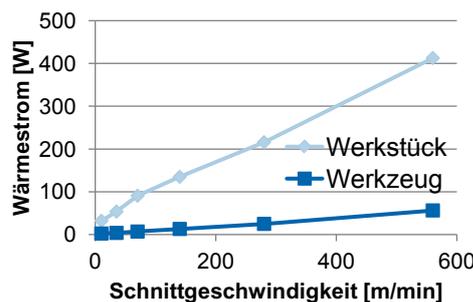


$$P_{WZ}(t_i) \approx \frac{W_{WZ}(t_i) - W_{WZ}(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}$$

(analog für P_{Span} und P_{WS})

Bestimmung der Wärmequelle mittels numerischer Simulation: Ergebnisse

- Wärmeströme und deren prozentuale Aufteilung sowie Wärmemengen ins Werkstück und Werkzeug für unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten (C45, $f_z=0.3$ mm, $r=5$ μ m, Bauteildicke 1 mm)



Bestimmung der Wärmequelle mittels num. Simulation: Stand / nächste Schritte

■ Stand:

- Konstante Schnitttiefe (kontinuierlicher Schnitt, d.h. Drehen)
- Werkstoff C45
- 2D-Prozess
- Temperaturmesswerte für höhere Schnittgeschwindigkeiten und Kraftsignale z.T. im Widerspruch zu Simulationsergebnissen

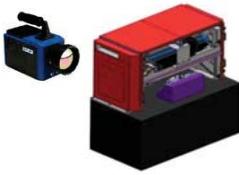
■ Nächste Schritte:

- Klärung der Widersprüche
- Simulation und Modellabgleich für andere Werkstoffe (Inconel718, ...)
- Simulation des Fräsens (veränderliche Schnitttiefe)
- Übertragung auf 3D-Prozesse (Bestimmung und Berücksichtigung der Veränderungen 2D → 3D)

Agenda

- 1 Vorstellung Grundlagenprüfstand
- 2 Messsensoriken und Methodik
- 3 Nutzung für Prozessmodellierung
- 4 Nutzung für Prozesssimulation
- 5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung



- Versuche am Grundlagenprüfstand unter Nutzung der Messsensoriken Infrarotkamera und Zweifarbenpyrometer wurden durchgeführt.
- Die Messergebnisse wurden zur Validation eines potenzialtheoretischen Modells der Zerspanung genutzt.
- Die Messergebnisse wurden zum Abgleich von Simulationsmodellen genutzt.
- Simulation genutzt zur Bestimmung der Wärmeströme ins Werkzeug und ins Werkstück

Ausblick



- **Übertragung der Messmethode:** Die entwickelte Messmethode wird auf andere Prüfstände übertragen und getestet.
- **Validation des Modells:** Die gefundene Parametrierung des Modells soll an weiteren Zerspanungsprozessen validiert werden.
- **Simulation:** Klärung der Unterschiede Messung – Simulation, Übertragung auf andere Werkstoffe, andere Zerspanungsprozesse (Fräsen) und 3D-Geometrien

Vielen Dank

3. Kolloquium SFB/TRANSREGIO 96
29.10. – 30.10.2013, Aachen

Dipl.-Ing. Matthias Brockmann
WZL RWTH Aachen

Dr. Ulrich Semmler
Fraunhofer IWU Chemnitz

Experimentelle Untersuchungen am rotierenden Werkzeug für spanbildende Prozesse

M. Bräunig, W.-G. Drossel, V. Wittstock; Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, TU Chemnitz

Mit der Beschreibung der Bearbeitungsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen ist es unvermeidbar, die thermoelastischen Verformungen am Werkzeug und dessen Einspannung in die Betrachtung einzubeziehen, da die Prozesswärme zu einem Teil in das Werkzeug abgeleitet wird. Die Erfassung und Einschätzung der resultierenden thermoelastischen Verformungen ist für den Abgleich von Simulationen und die Möglichkeiten der Kompensation sowie der Korrektur von wesentlicher Bedeutung, die in erheblichen Steigerungen der Fertigungsqualität münden können.

Das Teilprojekt A01 untersucht die Auswirkungen der Prozesswärme auf das Werkzeug und zeigt mit dem vorliegenden Vortrag, wie die Prozessparameter experimentell erfasst werden können. Mit aufwendigen Versuchsaufbauten wird das Werkzeug für spanbildende Prozesse modellhaft abgebildet.

In einer ersten Versuchsreihe konnte die transiente Wärmeleitung im stehenden Werkzeug und Spannsystem, entkoppelt von der Motorspindel, erfasst werden. Zudem wurden Spannprinzipien miteinander verglichen. Darauf aufbauend werden nunmehr im Vortrag die Temperaturfelder und die daraus resultierende Verlagerung bei rotierendem Werkzeug erfasst. Die selbsterregten Strömungen sowie der Wärmeübergang an der Schnittstelle Spannsystem / Motorspindel sind bspw. wesentliche Kenngrößen, welche im Rahmen der Parameteridentifikation, selektiert werden.

Ein Großteil der eingesetzten Messtechnik erfasst berührungslos die Parameter in ausreichender Genauigkeit. Die Prozesswärme muss in das drehende Werkzeug geleitet werden, wobei im Falle des Versuchsaufbaus ebenso eine berührungslose Methodik genutzt wird. Für lokal platzierte Sensorik müssen Übertragungsmethoden gefunden werden, damit ein rauschfreies Signal für verschiedene Drehgeschwindigkeiten ermittelt werden kann.

Die jeweilige Messmethodik sowie Modellierung der Prozessparameter werden für ausgewählte Prozessabläufe exemplarisch gezeigt. Offene Fragestellungen bei der Versuchsdurchführung sowie Fehlerquellen werden beschrieben. Die Ergebnisse werden mit Simulationsmodellen auf Basis numerischer Strömungsmechanik wie auch der Finiten Elemente validiert und kritisch bewertet.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Michael Bräunig

TU Chemnitz

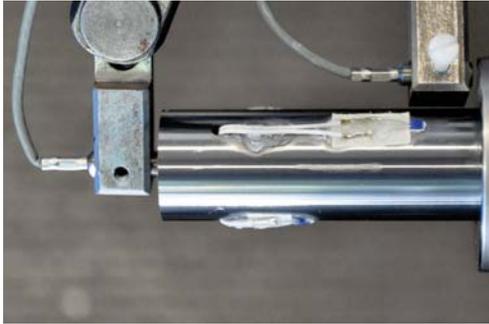
Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse

09107 Chemnitz

Tel.: 0371- 531 32499

E-Mail: michael.braeunig@mb.tu-chemnitz.de

Experimentelle Untersuchungen am rotierenden Werkzeug für spanbildende Prozesse



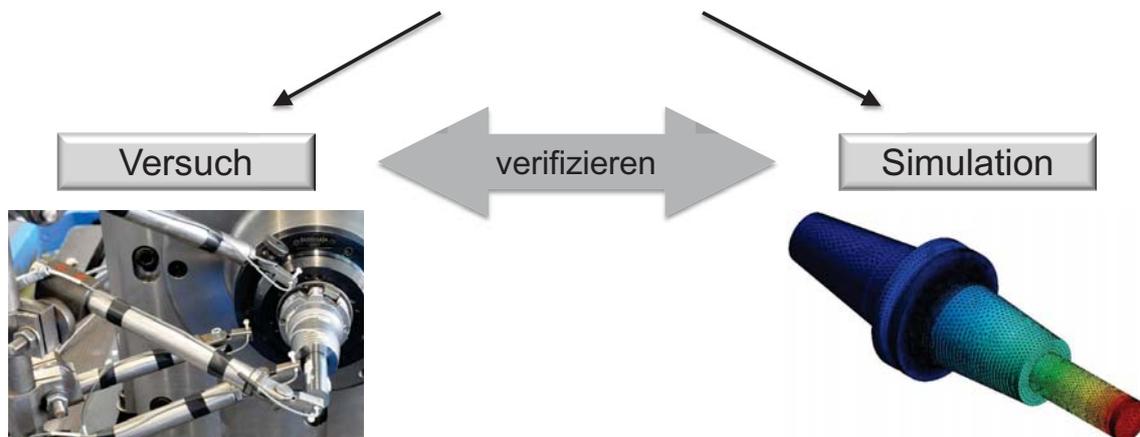
3. Kolloquium SFB/TRANSREGIO 96
29.10. – 30.10.2013, Aachen

Dipl.-Ing. Michael Bräunig
Institut für Werkzeugmaschinen und
Produktionsprozesse
TU Chemnitz

Zielstellung

Thermisches Verhalten von Werkzeug und Werkzeugaufnahme

- Identifizierung des Wärmestroms unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs an den Schnittstellen
- Bestimmung der thermo-elastischen Verformung



Inhalt

■ Experimentelle Methoden

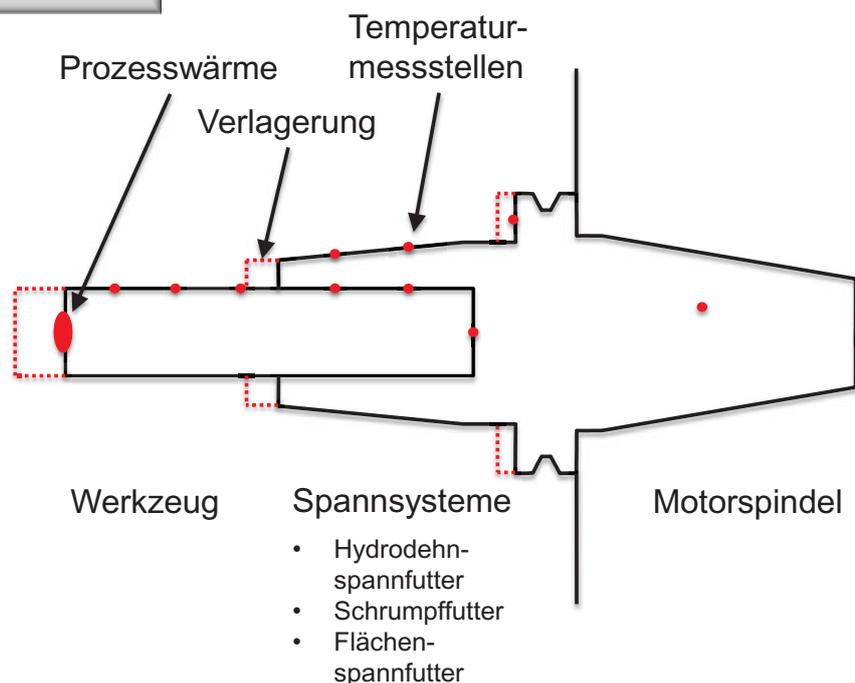
■ Versuchsaufbau

■ experimentelle Untersuchungen

■ Zusammenfassung und Ausblick

Untersuchungsgegenstand

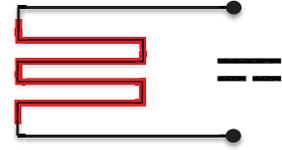
- Prozesswärme zuführen
- Temperaturfelder erfassen
- Verlagerung messen
- Versuchsaufbau rotierend
- Einsatz von kühlenden Fluiden



Wärmequellen

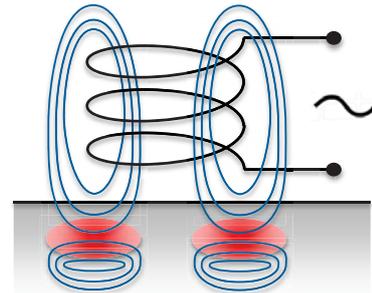
Heizwiderstand

- Erwärmung durch den Spannungsabfall am elektrischen Widerstand
- Wärme muss in das Werkzeug geleitet werden
- direkte Erwärmung der Umgebung
- berührende Erwärmung



Induktive Erwärmung

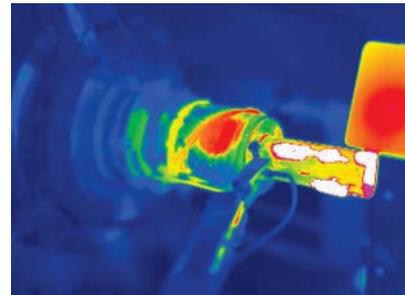
- Erwärmung durch Wirbelstromverluste
- Wärme entsteht im Werkzeug
- Indirekte Erwärmung der Umgebung
- berührungslos



Temperaturmessung

Thermografie

- Intensität der Infrarotstrahlung proportional zur Temperatur
- Unter Einsatz von Kühlmittel schwierig
- Nur Oberflächentemperaturen ermittelbar



Widerstandsthermometer

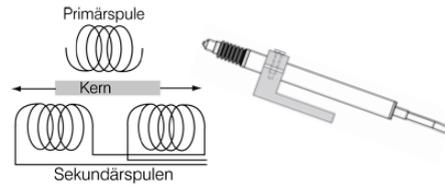
- Elektrische Widerstand ist Temperaturabhängig
- Pt100 Messfühler, Pt1000 Dünnschichtsensorik
- Sensorik muss Bauteil kontaktieren
- Messungen an schwer zugänglichen Stellen
- Signale müssen aus Rotation übertragen werden (Telemetrie / Schleifringübertrager)



Verlagerungsmessung

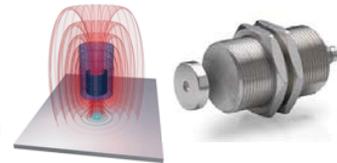
Induktive Wegaufnehmer

- Linearer Variabler Differential Transformator
- Berührend, kompakt, verschleißfrei



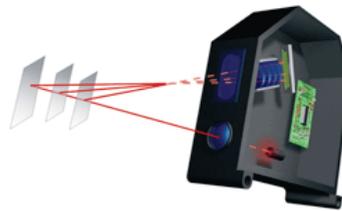
Wirbelstromsensorik

- Resultierender Wechselstromwiderstand ist zum Messabstand Messobjekt / Sensorspule proportional
- Berührungslos, hohe Präzision, schmutzunempfindlich



Lasersensor

- Triangulationsmessverfahren
- Hohe Auflösung

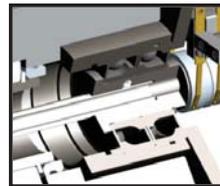
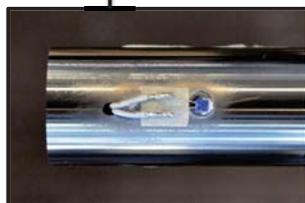


Bilderquelle: micro-epsilon.de

Signalübertragung



Pt1000



Messverstärker



Inhalt

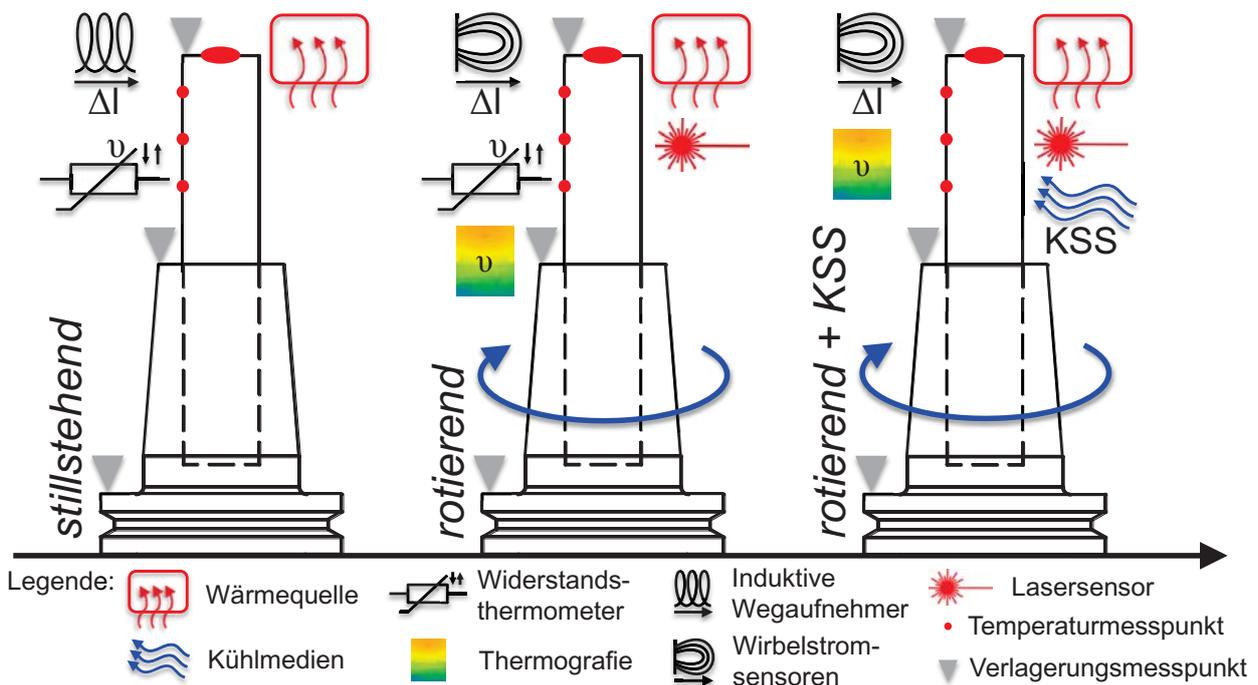
■ Experimentelle Methoden

■ **Versuchsaufbau**

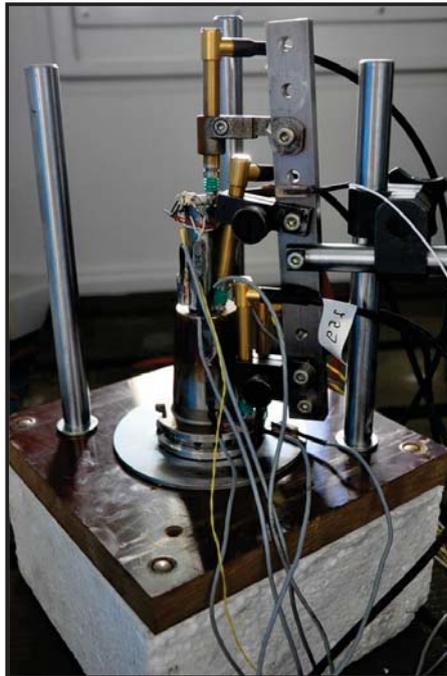
■ experimentelle Untersuchungen

■ Zusammenfassung und Ausblick

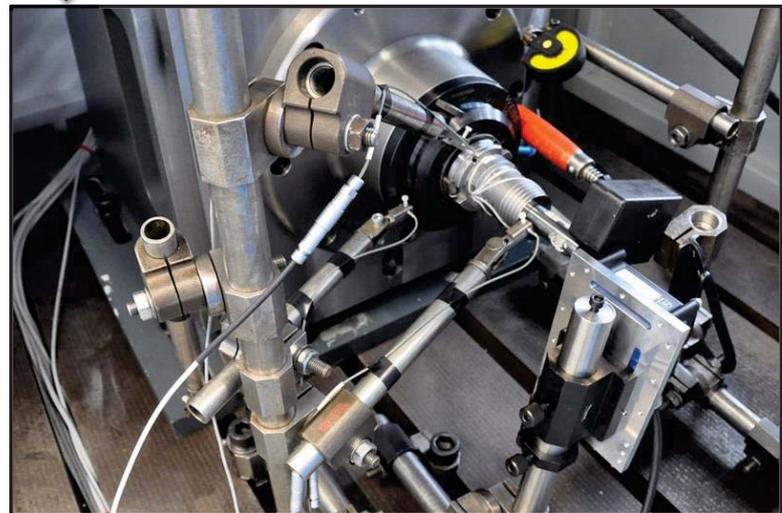
Messprinzipien



Versuchsaufbau



„feststehend“

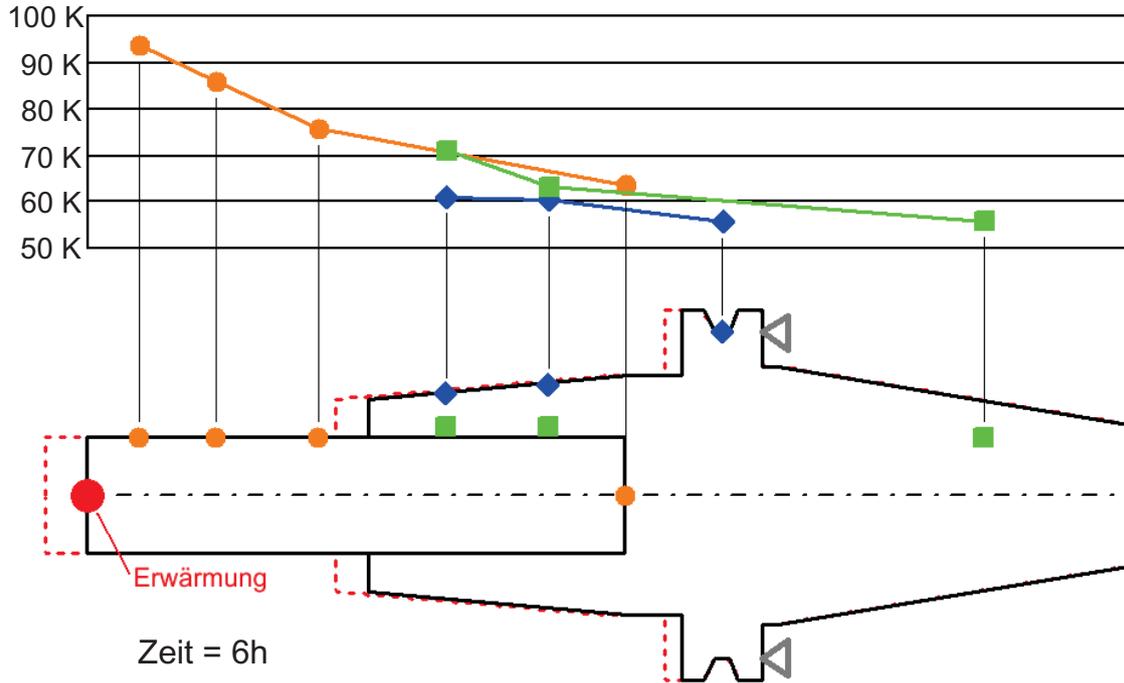


„rotierend“

Inhalt

- Experimentelle Methoden
- Versuchsaufbau
- **experimentelle Untersuchungen**
- Zusammenfassung und Ausblick

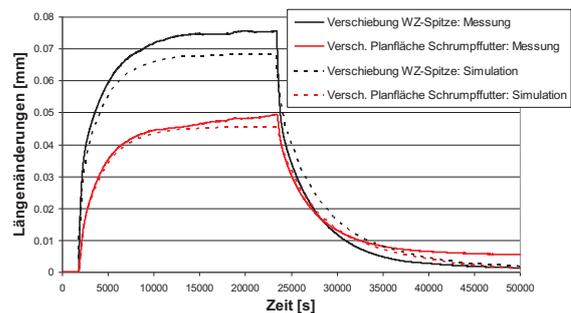
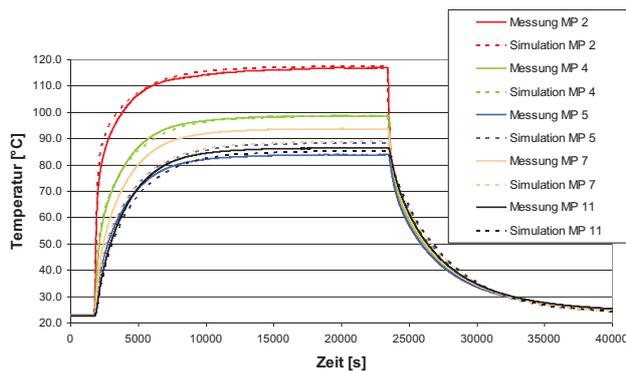
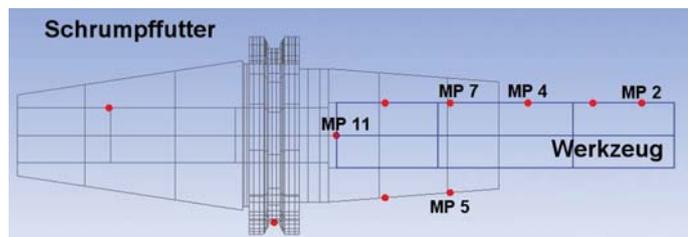
Parameteridentifizierung

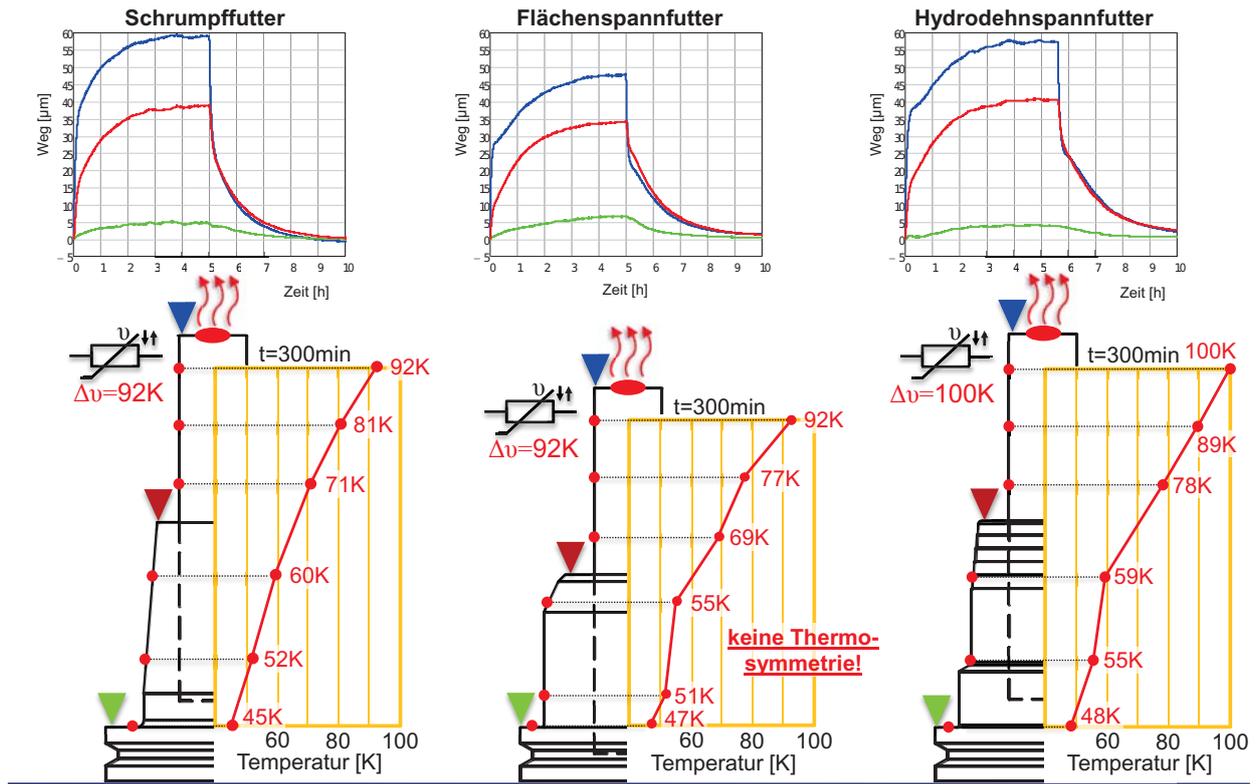


Parameteridentifizierung

Vergleich der Messergebnisse mit FE-Simulation

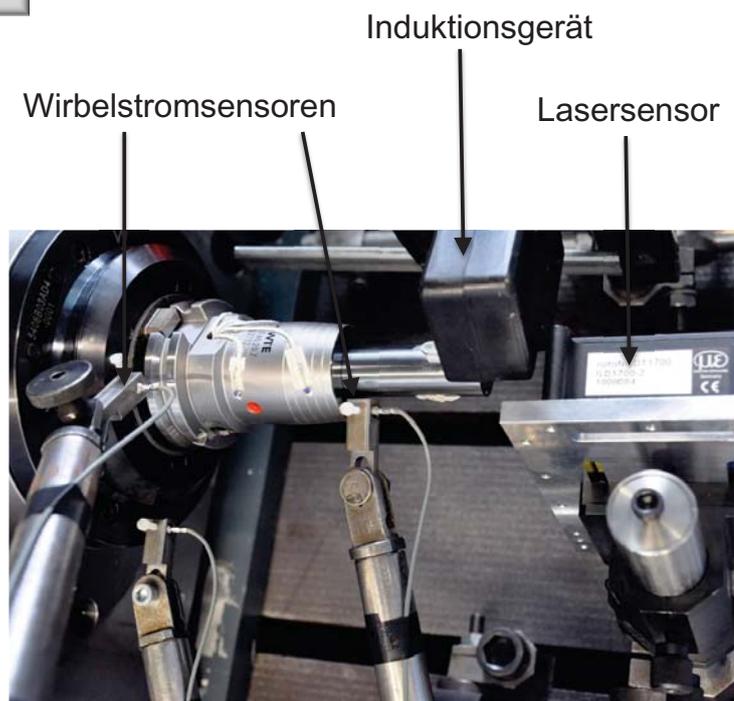
- Gute Übereinstimmung
- Wärmeübergänge wurden berechnet
- Zusammenarbeit mit TP B02



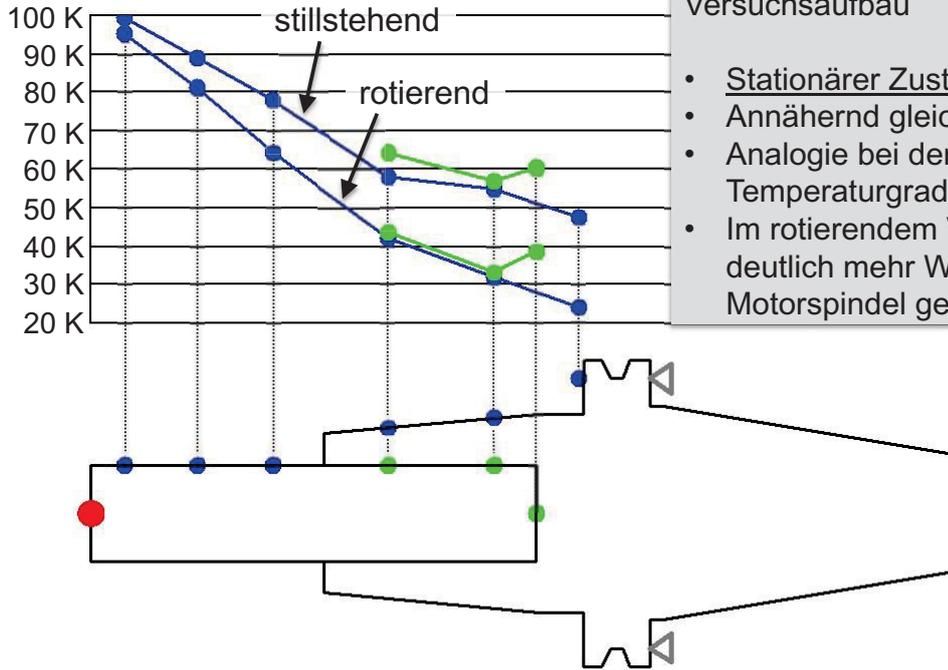


Versuchsaufbau „rotierend“

- Wärme wird nicht von außen in das Werkzeug geleitet sondern im Werkzeug selbst erzeugt
- Einfluss der Motorspindelkühlung wird berücksichtigt
- Selbsterregte Strömungen kühlen Werkzeug und Spannsystem
- Bei der natürlichen Konvektion ist zwischen horizontalen und vertikalen Aufbau zu unterscheiden



Ergebnisse

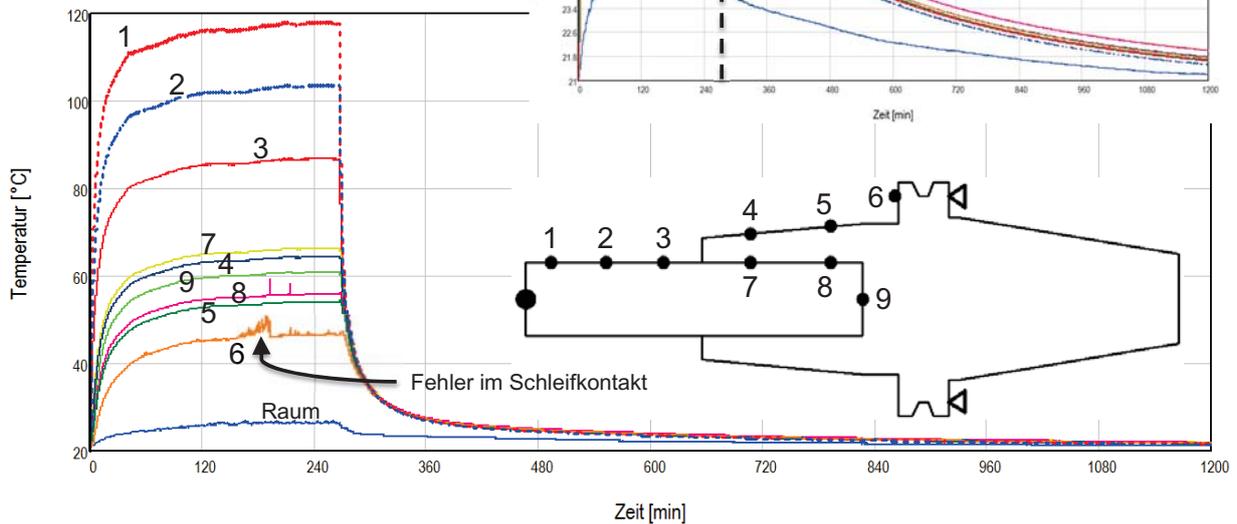


Vergleich der Temperaturmessstellen zwischen stehendem und rotierendem Versuchsaufbau

- Stationärer Zustand
- Annähernd gleiche Prozesswärme
- Analogie bei den Temperaturgradienten
- Im rotierendem Versuchsaufbau wird deutlich mehr Wärme in die Motorspindel geleitet

Ergebnisse

- Rotierender Versuchsaufbau
- Hoher Temperaturabfall
- Hoher Wärmeeintrag
- Signalübertragungsfehler



Bemerkungen

- Die Kühlschmierstoffanlage temperiert die Motorspindel auf eine Temperatur von ca. 30°C. Dadurch wird viel Wärme in die Motorspindel vom Werkzeug abgeleitet.
- Um den Einfluss selbsterregter Strömungen zu untersuchen sollten für die stillstehenden Versuche eine kleine Drehzahl gewählt werden. Der Wärmeeintrag erfolgt sonst nicht rotationssymmetrisch.
- Es folgen umfangreiche Untersuchungsreihen hinsichtlich kritischer Drehzahlen, bzw. Drehzahlen bei denen die Signale anfangen zu rauschen.
- Die positionierte Dünnschichtsensorik am Werkzeug sowie die angestellte Messtechnik begünstigen Turbulenzen. Diese sind in der Simulation schlecht abbildbar.
- Wärmeeintrag an der Schneidkante ist nicht trivial. Die Möglichkeiten der Einstellung sowie der messtechnischen Erfassung sind sehr begrenzt.

Inhalt

■ Experimentelle Methoden

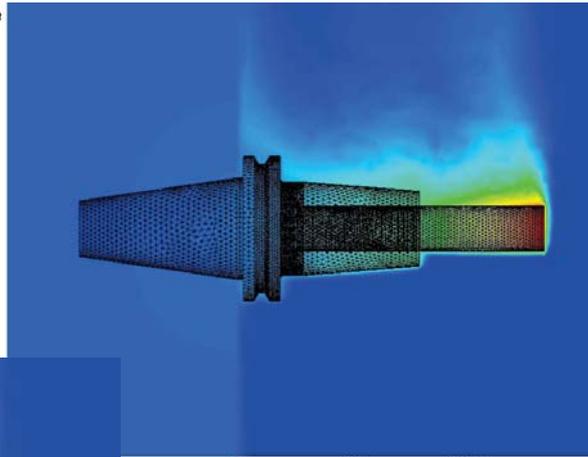
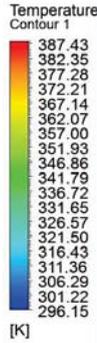
■ Versuchsaufbau

■ experimentelle Untersuchungen

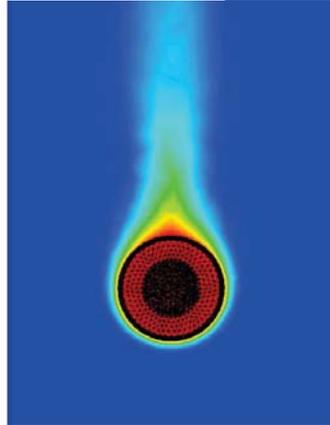
■ **Zusammenfassung und Ausblick**

Strömungssimulation

- Einfluss der natürlichen Konvektion durch aufsteigende Luft
- Einfluss der selbsterregten Strömung um das Werkzeug und Spannsystem



- Luft- und Werkzeugtemperatur am rotierenden Werkzeug:
- Werkzeugdrehzahl: 1000 1/min (ruhende Luft)
 - Schneidentemperatur: ca. 114°C

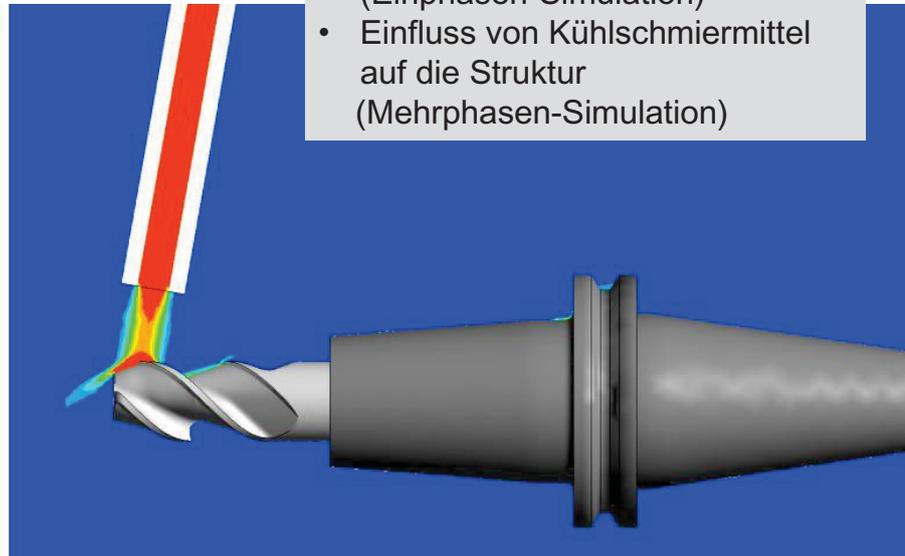
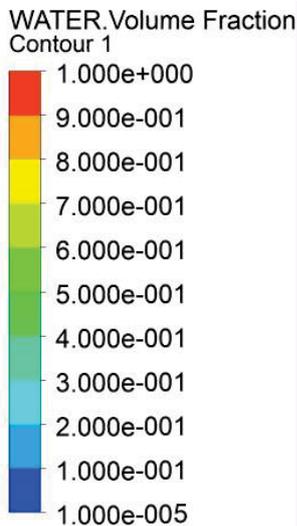


Strömungssimulation

Mehrphasen-Simulation mit Kühlschmiermittel und Luft:

- Werkzeugdrehzahl: 1000 1/min
- Ausströmungsgeschwindigkeit des Kühlmittels: ca. 10 m/s

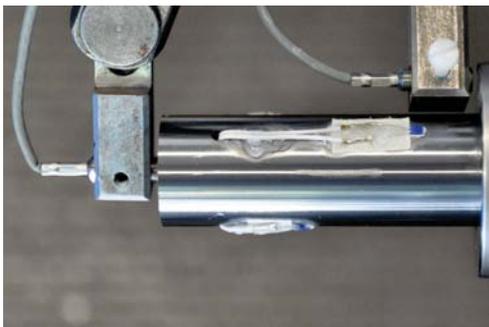
- Einfluss fremderregter Strömungen
- Kühlwirkung angeströmter Luft (Einphasen-Simulation)
- Einfluss von Kühlschmiermittel auf die Struktur (Mehrphasen-Simulation)



Zusammenfassung

- Die Versuchsreihe für das stillstehende Werkzeug konnte abgeschlossen werden. Spannsysteme wurden miteinander verglichen.
- Der Versuchsstand für das rotierende Werkzeug konnte erfolgreich in Betrieb genommen werden.
- Für die Signalübertragung wurde ein Schleifringübertrager in den Messaufbau integriert. Damit kann an ausgewählten Stellen Dünnschichtsensorik positioniert und Signale übertragen werden.
- Die Wiederholgenauigkeit zum stehendem Versuchsaufbau ist ausreichend genau, wobei weitere Randbedingungen im Messaufbau berücksichtigt werden können.
- Bisherige Versuchsergebnisse werden mit Simulationen verifiziert.
- Fremderregte einphasige Strömungen sollen im Versuchsaufbau integriert werden.

Vielen Dank



3. Kolloquium SFB/TRANSREGIO 96
29.10. – 30.10.2013, Aachen

Dipl.-Ing. Michael Bräunig
Institut für Werkzeugmaschinen und
Produktionsprozesse
TU Chemnitz

Kontaktwärmeübergang bei werkzeugmaschinenspezifischen Fugen

M. Burghold, Y. Frekers, R. Kneer, S. Vieler; Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung, RWTH Aachen

Die verlässliche Vorhersage der thermischen Ausdehnung von Werkzeugmaschinen während des Fertigungsprozesses ist eine der Grundvoraussetzungen für deren erfolgreiche Modellierung. Damit einher geht die Kenntnis der auftretenden Wärmeströme und -flüsse innerhalb der Maschine. Neben dem Phänomen der Wärmeleitung in einem einzelnen Bauteil spielen die Fugen zwischen den Komponenten eine große Rolle, da sie einen Wärmeübergangswiderstand darstellen und so den Wärmefluss signifikant beeinflussen. Die Bestimmung dieser von den lokalen Druck- und Oberflächenverhältnissen abhängigen Größe ist Aufgabe des Teilprojekts B02.

Die Nachbildung einer Fuge im Experiment erfolgt über zwei unterschiedlich temperierte Versuchskörper, die mit einer definierten Oberflächenrauheit und einem festgelegten Druck aneinander gepresst werden. Wie auch bei der Werkzeugmaschine ist der darauf folgende Temperatenausgleich durch den vorliegenden Wärmeübergangswiderstand limitiert, so dass eine messtechnische Erfassung des Temperaturverlaufs über der Zeit eine transiente Bestimmung des Widerstands ermöglicht. Der Schritt zwischen Messung und dem fertigen Ergebnis ist die Lösung des entsprechenden inversen Wärmeleitungsproblems (engl.: *Inverse Heat Conduction Problem*, IHCP), da von der Folge (Temperaturverteilung) auf die Ursache (Wärmeübergangswiderstand) geschlossen wird. Dieses ergibt sich hier als ein mehrstufiges Optimierungsproblem, da die zu bestimmende Größe des Wärmeübergangswiderstands nicht stetig von den gemessenen Temperaturdaten abhängt.

Zur Maximierung der räumlichen sowie zeitlichen Auflösung kommt im Rahmen dieses Teilprojekts eine Hochgeschwindigkeitsinfrarotkamera zum Einsatz. Die Temperaturgenauigkeit einer solchen Kamera wird über die sogenannte *Noise Equivalent Temperature Difference* spezifiziert. Diese erlaubt eine erste Fehlerabschätzung der ermittelten Größen.

Kontakt

Dipl.-Ing. Michael Burghold

RWTH Aachen

Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung

52056 Aachen

Tel.: 0241 – 80 97529

E-Mail: burghold@wsa.rwth-aachen.de

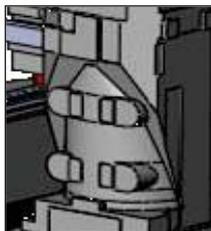
Kontaktwärmeübergang bei werkzeugmaschinenspezifischen Fugen

M. Burghold, Y. Frekers, S. Vieler, R. Kneer
3. Kolloquium zum SFB Transregio96

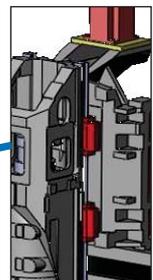
Aachen, 29. Oktober 2013

Fugen in Werkzeugmaschinen

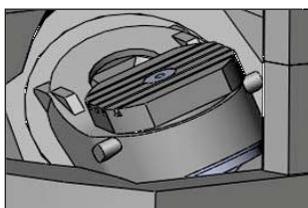
Spindel



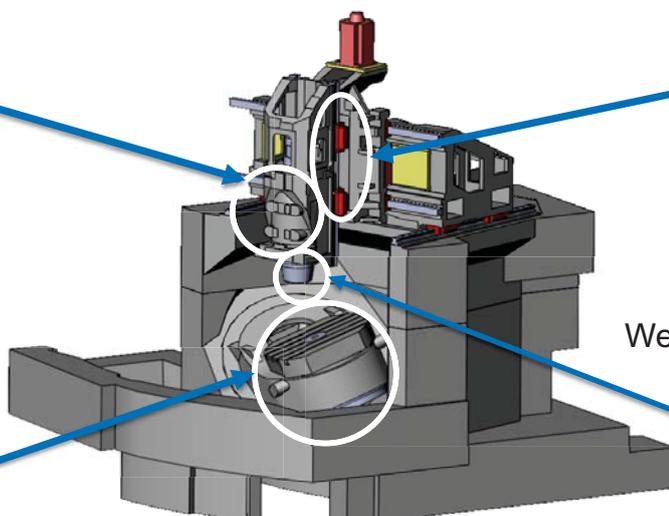
Führungselemente



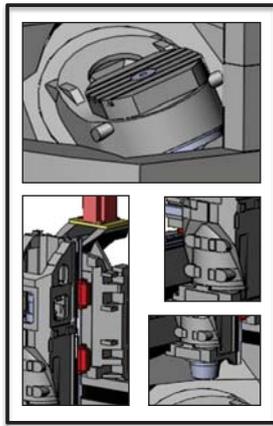
Maschinentisch



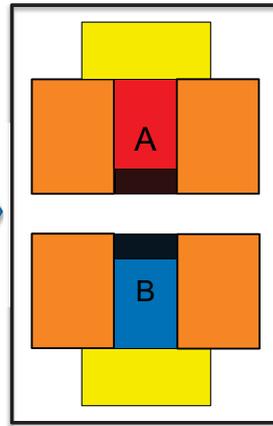
Werkzeugaufnahme



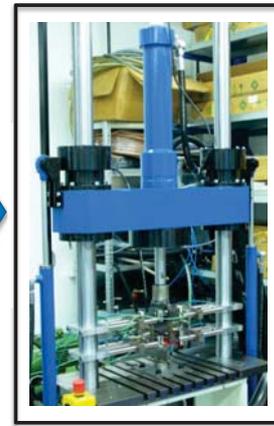
Abstraktion zum Experiment



1. Reale Fugen



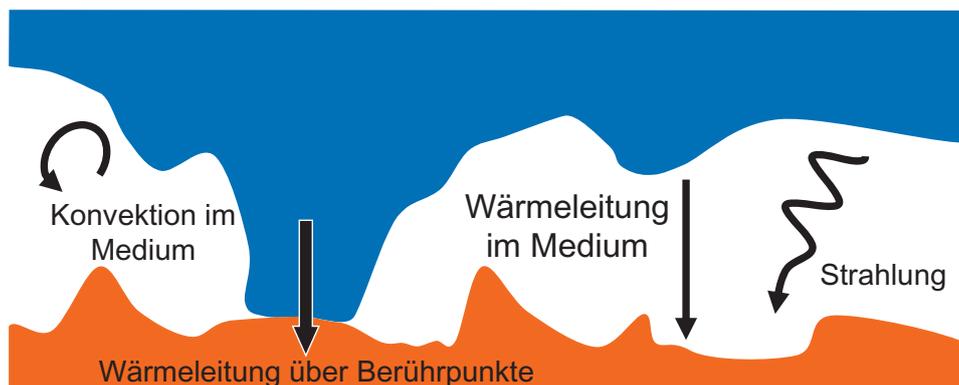
2. Konzept



3. Versuchsstand

Kontaktwärmeübertragung

- Wärmeübergang zwischen festen Körpern
- Problem der technisch rauen Oberflächen
- Anstelle reiner Wärmeleitung ebenfalls Konvektion und Strahlung

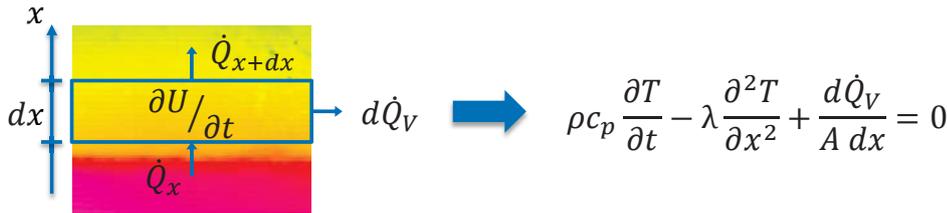


Experimentablauf

- **Problem:** Wärmeströme lassen sich nicht direkt bestimmen

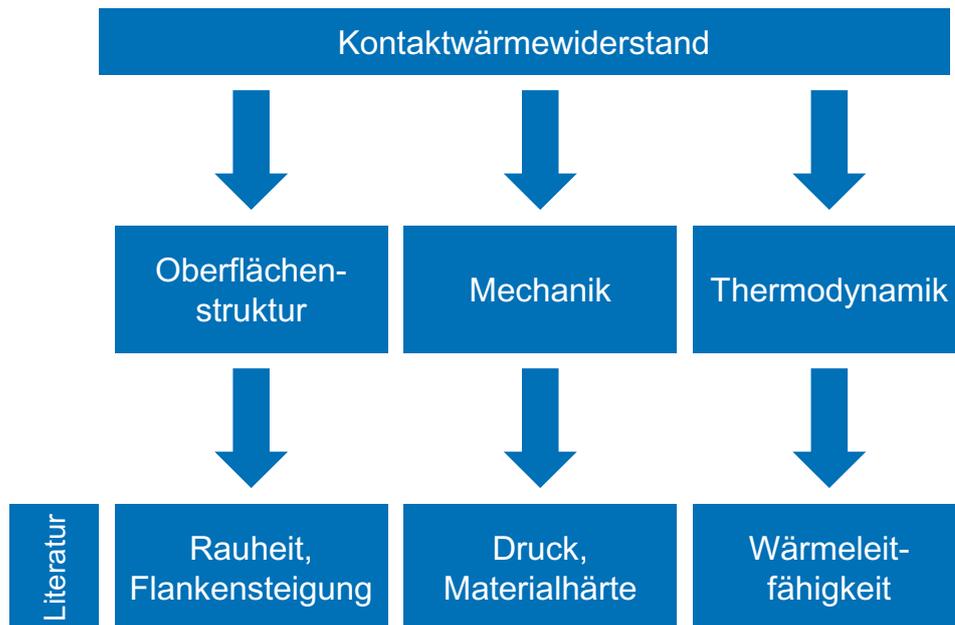


Messen von Temperaturen für den Kontaktwiderstand (inverses Vorgehen)

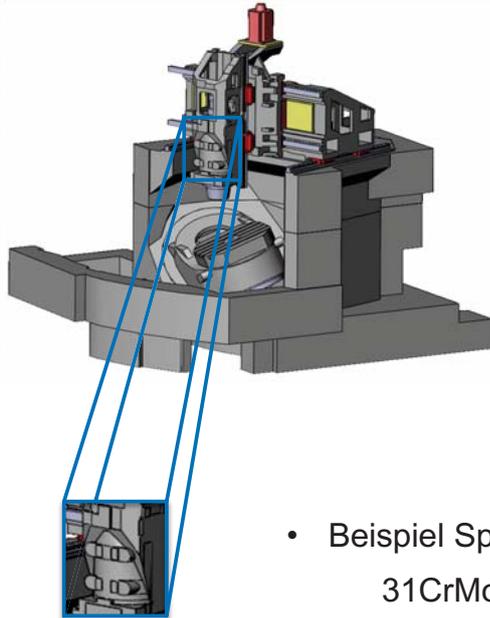


- **Annahmen:** eindimensionale Wärmeleitung, adiabate Probenenden

Einflussgrößen



Versuchsmatrix

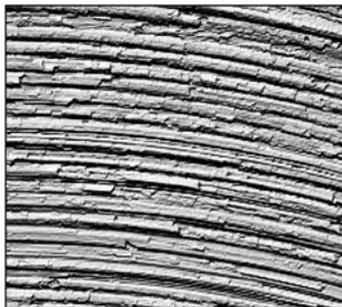


Parameter		
Material	<ul style="list-style-type: none"> • C45, • 31CrMoV9, • 16MnCr5, • S325G, • ... 	unter Umständen Schätzungen
Rauheit R_a	von 0,2 bis 12 μm	
Anpressdruck	von 5 bis 100 MPa	

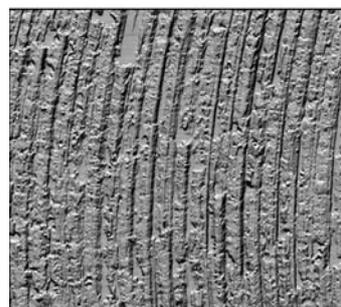
- Beispiel Spindel:
31CrMoV9, 16MnCr5, 56Mn4, 102Cr6 mit $R_a = 0,2 \mu\text{m}$

Topographie technischer Oberflächen

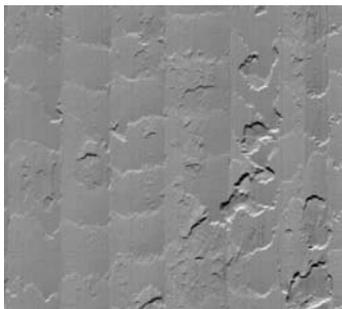
- Reale Probenoberfläche (Ausschnitt von 2mm x 2mm)



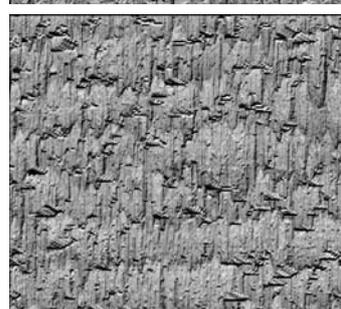
S235JRG2
 $R_a = 0,95 \mu\text{m}$
 $\sigma = 1,19 \mu\text{m}$



S235JRG2
 $R_a = 1,38 \mu\text{m}$
 $\sigma = 1,63 \mu\text{m}$



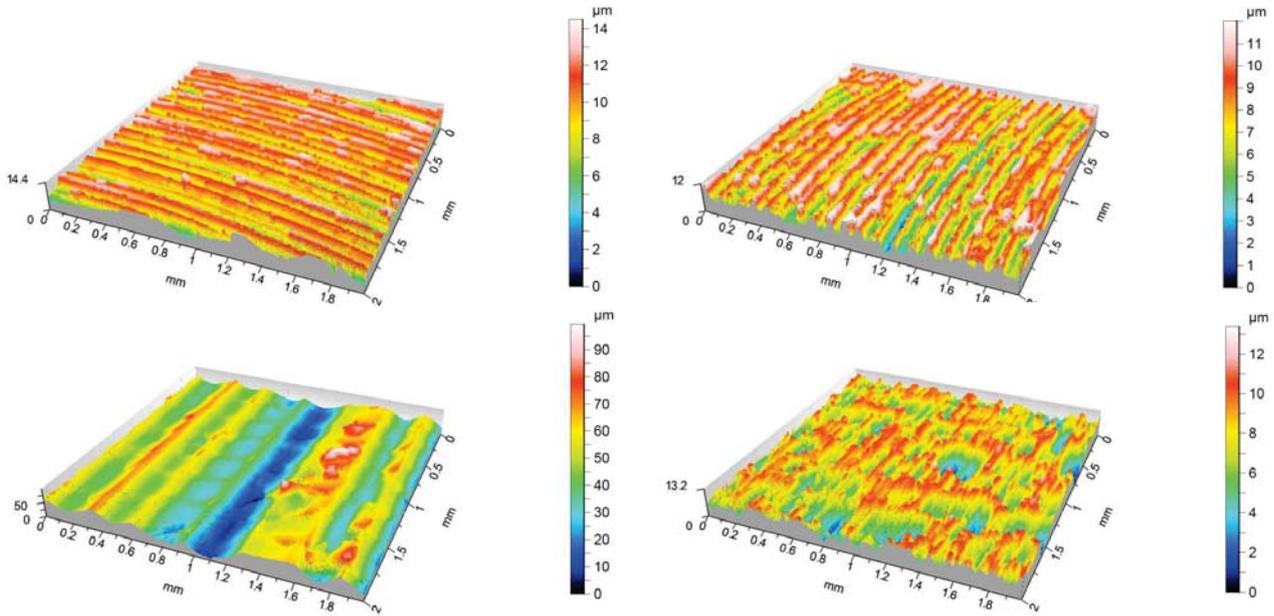
S235JRG2
 $R_a = 6,94 \mu\text{m}$
 $\sigma = 8,12 \mu\text{m}$



S325G
 $R_a = 1,05 \mu\text{m}$
 $\sigma = 1,30 \mu\text{m}$

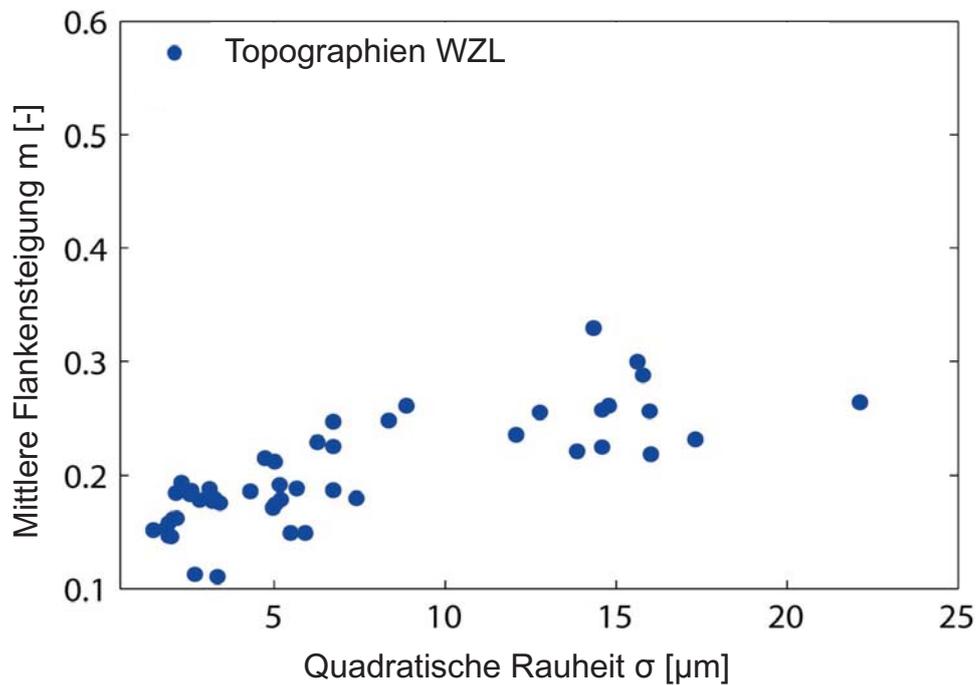
Topographie technischer Oberflächen

• 3D Ansicht

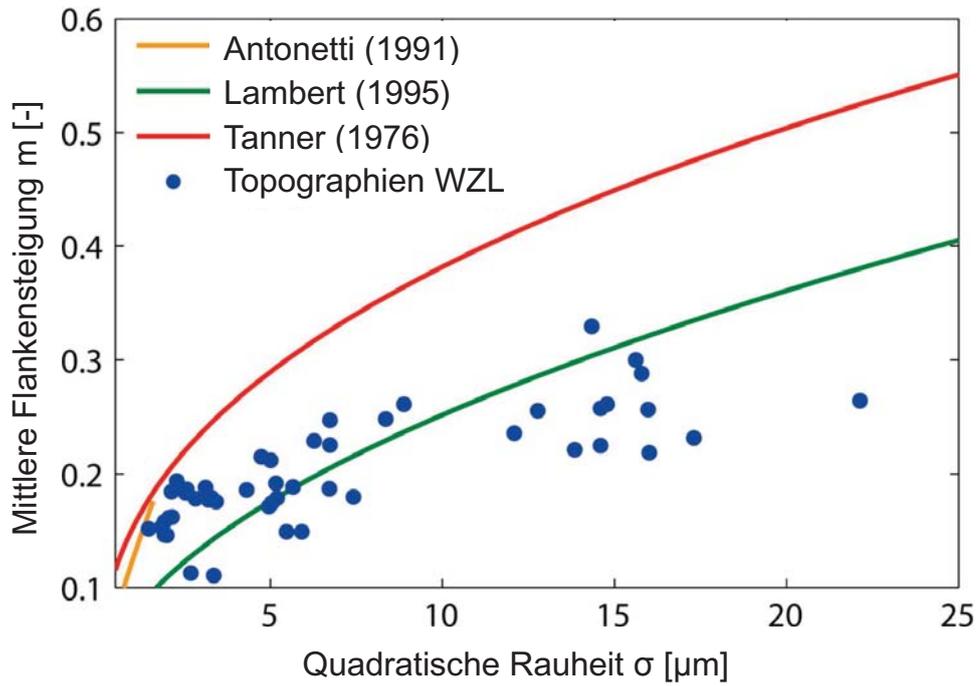


Unterstützung durch den Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement (WZL)

Topographieauswertung

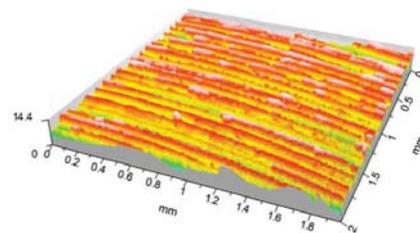
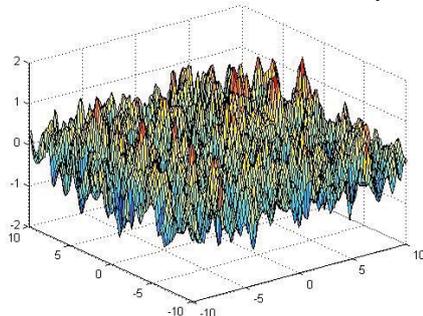


Topographieauswertung



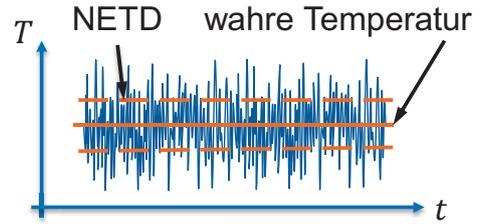
Relevanz der Oberflächen

- Bestehende Modelle für α_K benutzen diese Größen, d.h. $\alpha_K = f(p, H, \lambda, m, \sigma)$
- **Problem:** Annahme von isotropen und normalverteilten Oberflächen

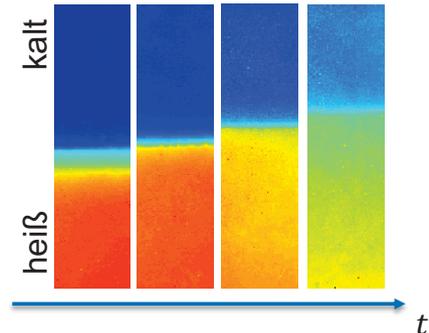


Fehlerquellen

- Messgenauigkeit der IR Kamera
 - Noise Equivalent Temperature Difference
 - Quadratischer Mittelwert der scheinbaren Temperaturschwankungen
 - Im Falle normalverteilten Rauschens: Standardabweichung

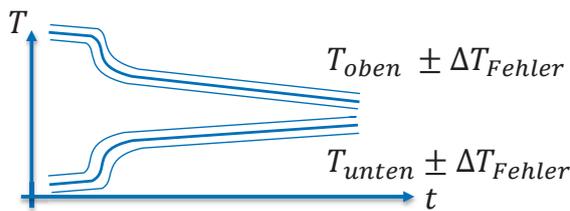


- Druckabhängige Verformung der Proben
 - Benötigt Algorithmus, der die Kontaktkante verfolgt
 - Diskrete Pixelgröße, „Rauschen“ des Algorithmus
 - Führt zu scheinbaren Temperatursprüngen

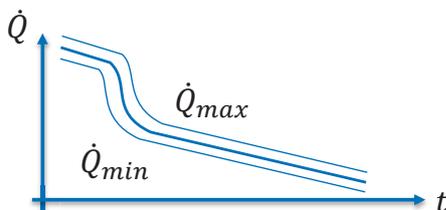


- Stoffwerte, Umgebungsstrahlung, Wärmeverluste, ...

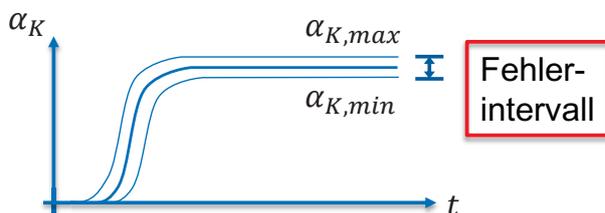
Fehlerabschätzung - Konzept



- Messfehler ergeben Temperaturintervalle, ...



- bzw. Wärmestromintervalle, ...



- und damit obere und untere Schranken für den Wärmeübergangskoeffizienten.

Zusammenfassung

- Kontaktwärme ist bei allen technischen Oberflächen von Bedeutung
 - Widerstand leitet sich von den Oberflächenstrukturen, sowie den mechanischen und thermodynamischen Eigenschaften ab
 - Existierende Modelle setzen unrealistische Annahmen voraus
 - Erstmaliges Konzept zur Fehlerabschätzung über das Messrauschen
-

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

DFG

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Thermischer Transport in Magnetorheologischen Fluiden

A. Bucht, W.-G. Drossel, C. Ohsenbrügge; Fraunhofer IWU Chemnitz

Ein Ansatz zur gezielten Beeinflussung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen ist die aktive oder passive Steuerung von Wärmeströmen. Sie ermöglicht eine Verbesserung des thermo-elastischen Gesamtverhaltens der Maschine, indem die Auswirkung transienter thermischer Vorgänge wie Lastspitzen oder stark variierende Wärmeeinträge beeinflusst wird. Insbesondere sollen schaltbar wärmeübertragende Strukturen der bedarfsgerechten Ankopplung von thermischen Speichern beziehungsweise temperierenden Elementen dienen.

Um den Wärmestrom durch Strukturen gezielt zu beeinflussen, wird das Potential aktiver Werkstoffe untersucht. Neben thermischen Formgedächtnislegierungen bilden magnetorheologische Fluide (MRF) einen Schwerpunkt der Untersuchungen. Als MRF werden Suspensionen ferromagnetischer Partikel in einem Trägerfluid bezeichnet. Durch Einprägen eines Magnetfeldes bilden sich Partikelketten entlang der Feldlinien, was eine anisotrope Wärmeleitfähigkeit des Fluids zur Folge hat. Durch die sehr großen Unterschiede in den Wärmeleitfähigkeiten der eingesetzten Materialien (z. B. Eisen mit 80 W/mK in Silikonöl mit 0,12 W/mK) sowie die Möglichkeit, zwischen einer gleichmäßigen Partikelverteilung und Kettenbildung durch Magnetfeldeinfluss zu schalten. Durch fehlenden mechanischen Verschleiß und Reversibilität des Effektes sind hohe Zyklenzahlen bei konstantem Effekt möglich.

Zur Beschreibung des thermischen Verhaltens der MRF sind insgesamt drei mögliche Zustände zu betrachten: das isotrope Verhalten im Falle gleichmäßiger Verteilung der Partikel, das anisotrope Verhalten unter Magnetfeldeinfluss sowie bei Sedimentierung durch Einfluss der Schwerkraft.

Die effektive Wärmeleitfähigkeit eines mit Partikeln angefüllten Fluids ist mit Theorien von Maxwell und Bruggeman [1] beschreibbar. Für den anisotropen Fall der Kettenbildung haben Reinecke et al. [2] einen Ansatz entwickelt, der im ersten Schritt die Wärmeleitfähigkeit der Kettenstrukturen ermittelt und dann über eine Parallelschaltung thermischer Widerstände das thermische Gesamtverhalten des Fluides beschreibt. Dieser Ansatz lässt sich auch auf die Schichtstruktur im sedimentierten Fall übertragen, wo eine Reihenschaltung thermischer Widerstände entsteht.

Stationäre Vermessungen von magnetorheologischen Fluiden mit einem Partikelvolumenanteil von 30 % ergaben eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von über 70 % durch Aktivierung eines Magnetfeldes in Richtung des Wärmestromes.

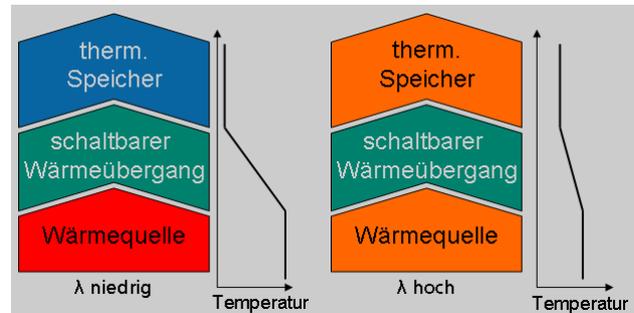


Abbildung 1: schaltbarer Wärmeübergang zur Ankopplung eines thermischen Speichers

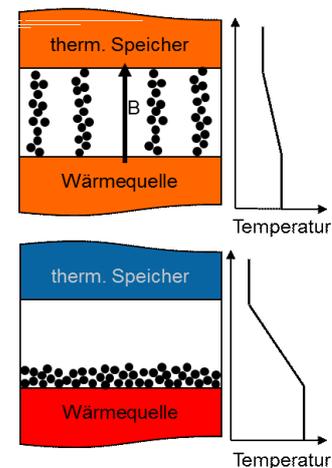


Abbildung 2: oben: Kettenbildung unter Magnetfeldeinfluss.
 unten: Schichtbildung durch Sedimentierung

[1] Bruggeman, D. A. G. (1935), Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. *Ann. Phys.*, 416: 665–679.

[2] Reinecke, B. N. (2008), On the anisotropic thermal conductivity of magnetorheological suspension. *J. Appl. Phys.* 104:

Kontakt

Dipl.-Ing. Christoph Ohsenbrügge
 Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
 Nöthnitzer Str. 44, 01187 Dresden
 Tel.: 0351- 4772 2342
 E-Mail: christoph.ohsenbruegge@iwu.fraunhofer.de

Thermische Leitfähigkeit magnetorheologischer Fluide

TP C02: gesteuerter Wärmefluss

W.-G. Drossel, A. Bucht, C. Ohsenbrügge

Fraunhofer IWU, Chemnitz

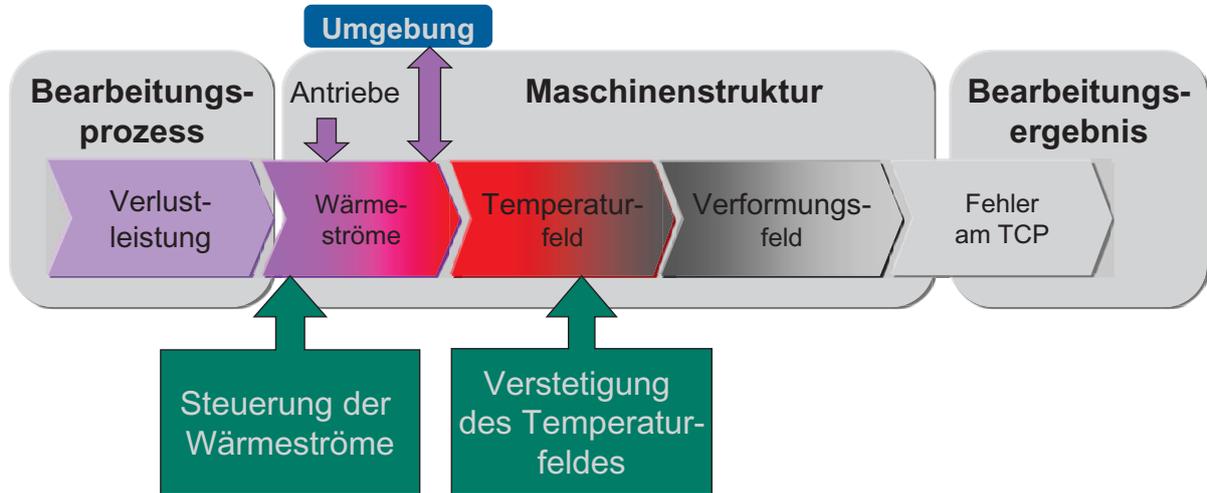
3. Kolloquium, Aachen, 29.10.2013

Gliederung

1. Einordnung
2. Modellierung der thermischen Transporteigenschaften
 - a) Isotrop
 - b) Anisotrop
3. Modellierung des schaltbaren Wärmewiderstandes
4. Messung der Wärmeleitfähigkeit
 - a) Messmethoden
 - b) Aufbau
 - c) Ergebnisse
 - d) Abgleich
5. Zusammenfassung

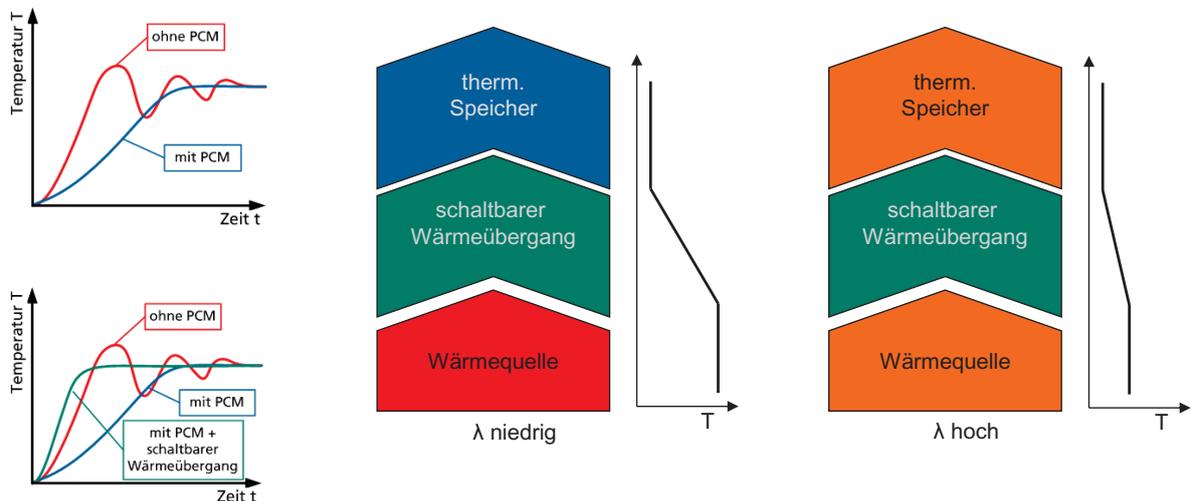
Einordnung

Eingriff in die thermo-elastische Wirkungskette



Einordnung

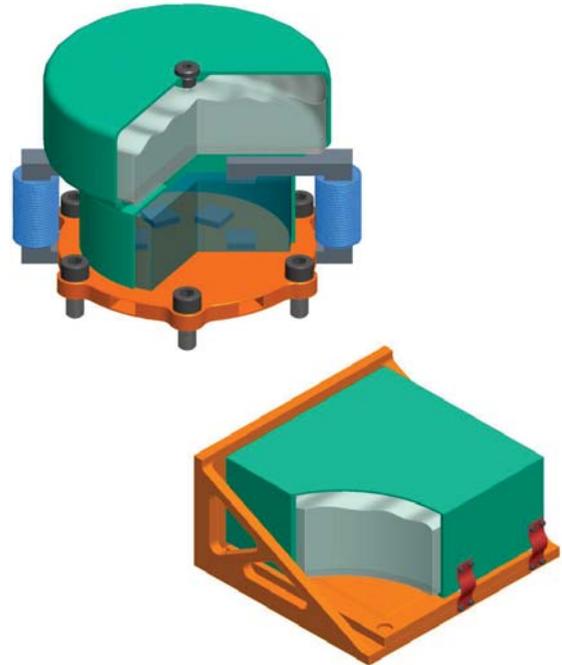
Schematische Wirkung der untersuchten Ansätze



Einordnung

Betrachtete Werkstoffe

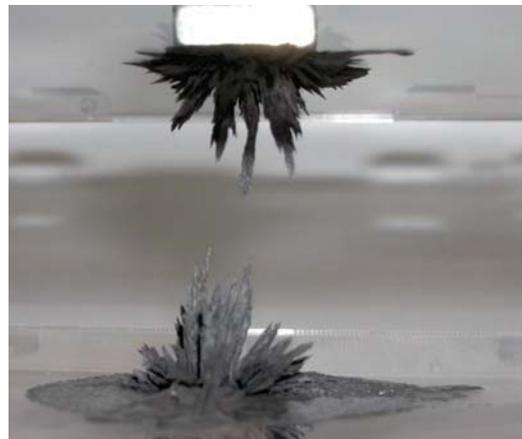
- Thermischer Speicher
 - Phase-Change-Material als zusätzliche thermische Trägheit
 - Metallschaum als Trägerstruktur
- Schaltbare Wärmeleitung
 - Formgedächtnislegierungen
 - **Magnetorheologische Fluide**



Einordnung

Magnetorheologische Fluide

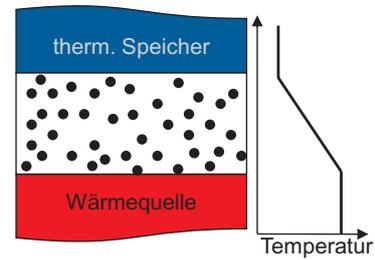
- Suspension ferromagnetischer Partikel in Trägerfluid
- Durch externes Magnetfeld werden Partikel polarisiert und bilden Ketten entlang der magnetischen Feldlinien
- Kommerziell eingesetzt als Fluid mit einstellbaren mechanischen Eigenschaften
- Entlang der Partikelketten erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit



Modellierung des thermischen Transports

Isotrop

- Beschreibt Verhalten im unbeeinflussten Zustand (gleichmäßige Verteilung der Partikel im Trägerfluid)



Maxwell:
$$k_e = k_f \frac{2 k_f + k_s + 2 \Phi (k_s - k_f)}{2 k_f + k_s - \Phi (k_s - k_f)}$$

- Berücksichtigt keine thermische Interaktion zwischen einzelnen Partikeln
- Obere Grenze der Gültigkeit: $\Phi = 0,3$

k_e :	WLF effektiv
k_f :	WLF Fluid
k_s :	WLF Partikel
Φ :	Volumenanteil Partikel

Modellierung des thermischen Transports

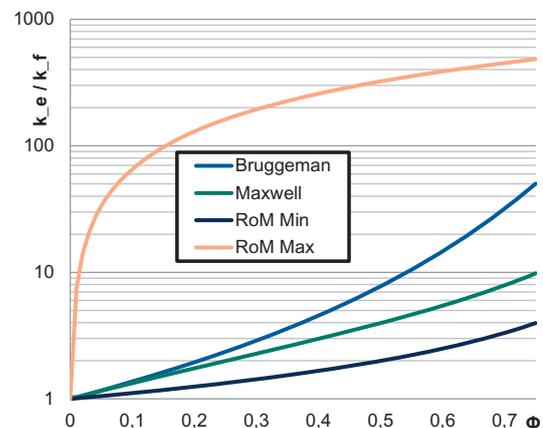
Isotrop

Rule of Mixture:

- Minimum und Maximum basierend auf Reihen- / Parallelschaltung thermischer Widerstände

Bruggeman:
$$\left(\frac{k_e - k_s}{k_f - k_s} \right) \left(\frac{k_f}{k_e} \right)^{1/3} = 1 - \Phi$$

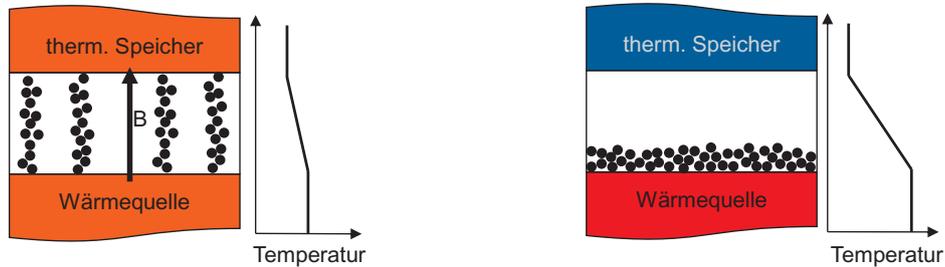
- geeigneter bei hohen Partikel-Volumenanteilen
- Berücksichtigt thermische Interaktion zwischen Partikeln
- Obere Grenze ist mögliche Packungsdichte (Kugeln: $\Phi \cong 0,74$)



Modellierung des thermischen Transports

Anisotrop

- Zwei Fälle : Kettenbildung und Sedimentierung



- Kettenbildung: Partikel mit unendlichem Seitenverhältnis (Nan et. al.)

$$k_{\parallel} = k_f(1 - \Phi) + \Phi k_{chain}$$

- Sedimentierung: Reihenschaltung thermischer Widerstände:

$$\frac{1}{k_{\parallel}} = \frac{\Phi}{k_{layer}} + \frac{(1-\Phi)}{k_f}$$

Modellierung des thermischen Transports

Anisotrop

- Reinecke et. al.: zweistufiges Modell für MRF unter Magnetfeld:

- Partikelketten durch Modell von Bruggeman (mit $k_p \gg k_f$)
- Gesamtfluid durch EMT

$$\frac{k_{\parallel}}{k_f} = \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_{int}}\right) + \left(\frac{\Phi}{\Phi_{int}}\right) (1 - \Phi_{int})^{-3}$$

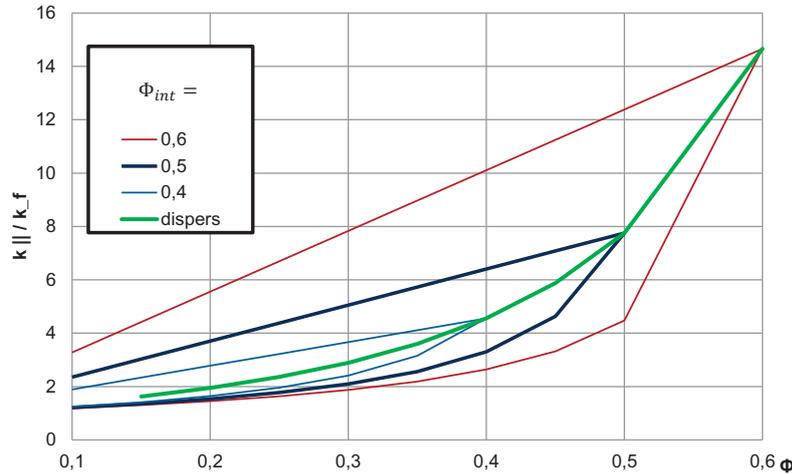
Φ :	Volumenanteil Partikel gesamt
Φ_{int} :	Volumenanteil Partikel in Ketten
Φ_{chains} :	Volumenanteil Ketten gesamt

- Variabler Parameter: Volumenanteil an Partikeln innerhalb der Ketten (Φ_{int})
- Volumenanteil der Ketten ergibt sich dann aus $\Phi = \Phi_{int} \Phi_{chains}$
- Abgleich mit Messungen ergab $\Phi_{int} = 0,495$ und damit $\frac{k_{chain}}{k_f} = 7,78$

Modellierung des schaltbaren Wärmewiderstandes

Anisotrop

- Nutzung des nicht vereinfachten zweistufigen Modells nach Reinecke et. al. sowohl für Ketten als auch für Schichten



Modellierung des schaltbaren Wärmewiderstandes

Anisotrop

- Bei konstantem Φ_{int} werden zwei extreme Schaltzustände betrachtet: **vollständige Sedimentation** und **vollständiger Kettenbildung**
- Mit $\Phi_{int} = 0,5$ ergeben sich somit folgende Wärmeleitfähigkeiten für unterschiedliche Gesamt-Partikelanteile Φ (jeweils in W/mK)

Φ	$k_{ min}$	k_e	$k_{ max}$	Δk
0,2	0,19	0,24	0,46	142 %
0,3	0,26	0,36	0,63	142 %
0,4	0,41	0,57	0,80	95 %
0,5	0,96	0,96	0,96	0 %

Messung der Wärmeleitfähigkeit

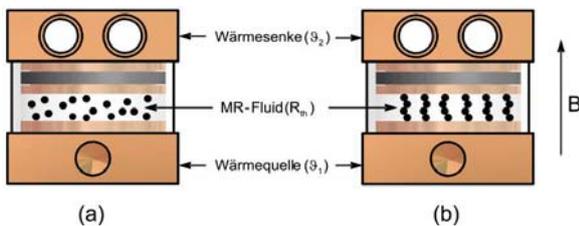
Messmethoden

- Bisherige Arbeiten: transientes Hitzdraht-Verfahren (Reinecke et. al.) oder transientes hot-Disk-Verfahren (Cha et. al.)
- Aufbau eines Versuchsstands mit stationärer Messung
 - Messung erfolgt im Beharrungszustand
 - Transiente Prozesse können betrachtet werden
- Parallel Aufbau eines FE-Modells der Anordnung
 - Iterativer Abgleich Versuchsergebnisse mit Simulation

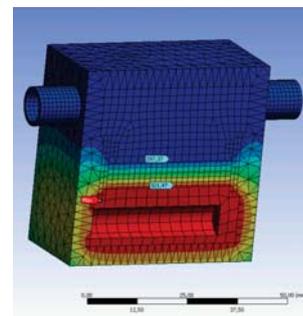


Messung der Wärmeleitfähigkeit

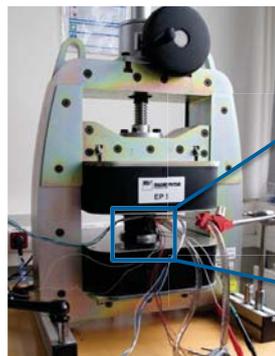
Messaufbau



Messprinzip



FE-Modell



Permagraph zur Magnetfelderzeugung

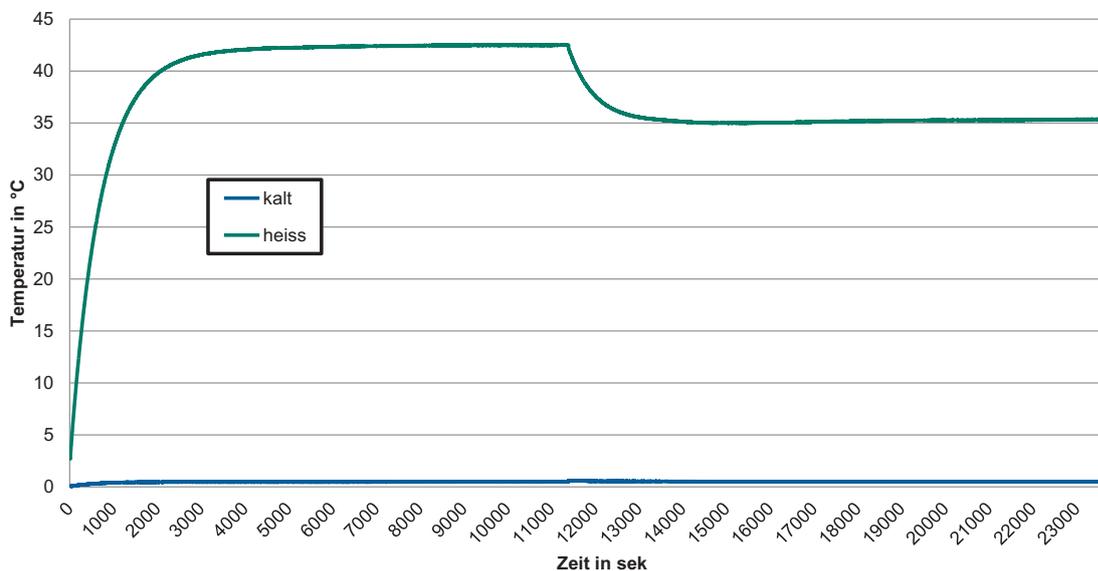
Messung der Wärmeleitfähigkeit

Randbedingungen

- Untersuchte Fluide:
 - Suspension von Carbonyleisenpulver in Silikonöl (20 %, 30 %, 35 %, 45 %)
- Vorversuche mit beschichtetem und unbeschichtetem CEP → kein Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit
- Magnetfeld: etwa 100 mT
- Messung von ΔT in Feldrichtung
- Thermische Last: 2 – 4 W über Heizpatrone
- Kühlung durch Wasser mit $\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$

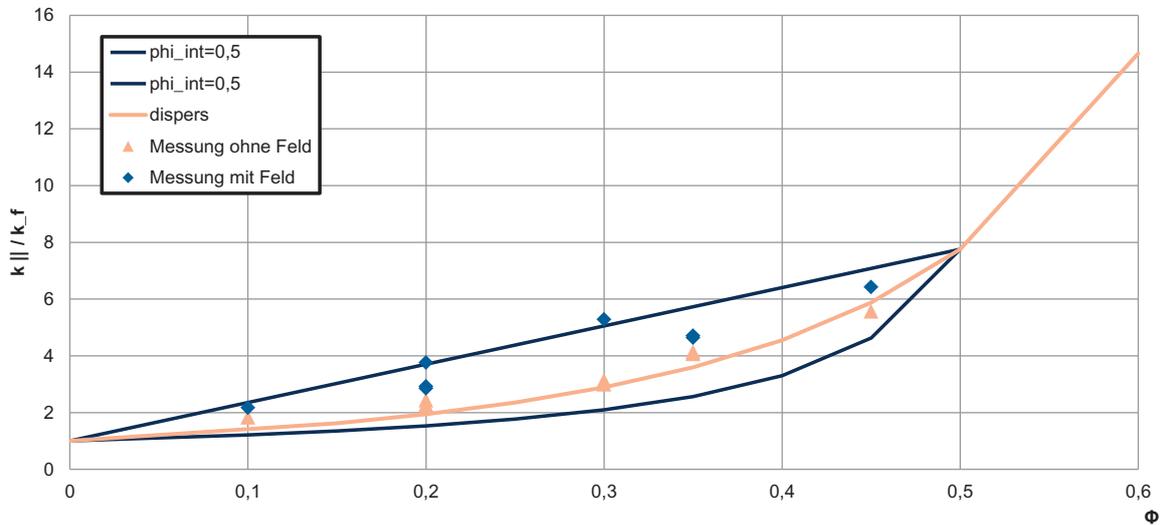
Messung der Wärmeleitfähigkeit

Beispielmessung (20 % CEP) über 6,5 h



Messung der Wärmeleitfähigkeit

Messergebnisse



Zusammenfassung

- Vorausgesagter Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit konnte nachgewiesen werden
- Ergebnisse liegen im Bereich der erwarteten Werte
- Beste Ergebnisse bei Volumenanteilen von 20 bis 30 %

Reib- und Temperaturverhalten von Profilschienenführungen in Experiment und Simulation

C. Brecher, D. Haber; Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen, RWTH Aachen

M. Beitelschmidt, M. Partzsch; Institut für Festkörpermechanik, TU Dresden

Die Anforderungen an Produktivität, Fertigungsgenauigkeit und Effizienz steigen im Werkzeugmaschinenbau. Diesbezüglich gewinnt das thermische Verhalten durch die zunehmende Beherrschbarkeit von Geometrie und Dynamik zunehmend an Bedeutung.

In Führungssystemen entsteht durch mechanische Reibung Wärme. Einerseits durch die Reibung zwischen Rollen und Schienen bzw. Schuhen und andererseits durch die Reibung zwischen der Schiene und den Dichtungen. Durch die Erwärmung wird sowohl Wärme an die Umgebung als auch an die angrenzenden Bauteile abgegeben. Zusätzlich dehnen sich die Komponenten aus und tragen so zu einer Verschiebung zwischen Werkstück und Werkzeug bei. Um die sich daraus ergebende Fertigungsungenauigkeit vorherzusagen und korrigieren zu können, muss das thermoelastische Verhalten von Führungssystemen hinreichend genau untersucht und in Modellen beschrieben werden.

Als Grundlage für die Modellierung werden Führungssysteme auf einem Prüfstand untersucht. Dort können durch eine Verspannungseinheit verschiedene Lasten auf die Schuhe aufgebracht und damit unterschiedliche Einbaubedingungen nachgebildet werden. Über einen Kraftsensor wird die Reibkraft gemessen, die – verbunden mit der Geschwindigkeit – elementar für die Bestimmung der Verlustleistung und damit der entstehenden Wärmeleistung ist. Weiterhin werden sowohl mit Thermoelementen (Typ K) im Prüfschuh und der -schiene als auch mit einer Wärmebildkamera Temperaturen an definierten Punkten des Systems gemessen. Durch ein Versuchsprogramm, bestehend aus verschiedenen Verfahrgeschwindigkeiten, verschiedenen Belastungen, Messungen mit und ohne Abstreifer, wird eine Datenbasis zur Erstellung und Validierung eines Modells geschaffen.

Um den Einfluss der Umgebung zunächst auszuklammern und das Modell möglichst einfach zu halten, wird das System in einer Klimakammer untersucht, in der eine konstante Umgebungstemperatur herrscht.

Im Weiteren wird ein numerisches Modell der Versuchsanordnung in mittlerer Detailtiefe vorgestellt. Dieses wird ausgehend von bekannten, methodischen Ansätzen zum Einbezug von translatorischen Strukturvariabilitäten in thermische FE-Analysen entwickelt und mit den aufgenommenen Messdaten an ausgewählten Arbeitspunkten abgeglichen.

Der Fokus liegt dabei auf der geeigneten Beschreibung der im Betrieb entstehenden Reibwärme. Diese soll im Modell als NEUMANN-Randbedingungen in den Kontaktbereichen zwischen Schuh und Schiene, genauer gesagt an den Laufflächen der Zylinderrollen sowie in den Kontaktzonen der Abstreifer, aufgebracht werden. Zudem wird über eine geeignete Geometriehomogenisierung und Parametrierung des Schienenkörpers erreicht, dass das resultierende Temperaturfeld mittels geringen Aufwands ebenfalls entsprechend den Messdaten abgebildet werden kann.

Kontakt

Dipl.-Ing. Dorothea Haber

RWTH Aachen

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

Steinbachstraße 19

52074 Aachen

Tel.: 0241 – 8020609

E-Mail: d.haber@wzl.rwth-aachen.de

Dipl.-Ing. Marian Partzsch

TU Dresden

Professur für Dynamik und Mechanismentechnik

01062 Dresden

Tel.: 0351 – 46337958

E-Mail: marian.partzsch@tu-dresden.de

Reib- und Temperaturverhalten von Profilschiene Führungen in Experiment und Simulation

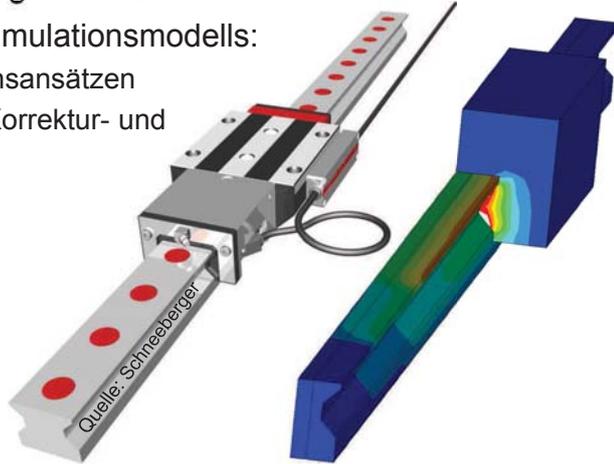
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher, Dipl.-Ing. D. Haber; Werkzeugmaschinenlabor
(WZL) der RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. M. Beitelschmidt, Dipl.-Ing. M. Partzsch; Institut für
Festkörpermechanik (IFKM) an der TU Dresden

- 1** Einleitung - Führungssysteme
- 2** Messtechnische Untersuchung
- 3** Ergebnisse
- 4** Aufbau der Simulation
- 5** Ergebnisse
- 6** Zusammenfassung und Ausblick

Einleitung und Zielstellung

- Profilschienenführungen (PSF) sind Koppelbaugruppen zwischen stehenden und bewegten Baugruppen
→ speziell im Rahmen der Ziele des SFB/TR96 von besonderem Interesse
- Ziel: Zuverlässige Simulation der PSF als Komponente von Werkzeugmaschinen in Abhängigkeit verschiedener Parameter
- Verwendung des detaillierten Simulationsmodells:
 1. Umsetzung von Kompensationsansätzen
 2. Referenz zur Erprobung von Korrektur- und Reduktionsansätzen
- Zum Abgleich der Modelle sind umfassende experimentelle Untersuchungen notwendig
- Prüfstand muss relevante Last- und Temperaturverläufe auswerten können



1 Einleitung - Führungssysteme

2 Messtechnische Untersuchung

3 Ergebnisse

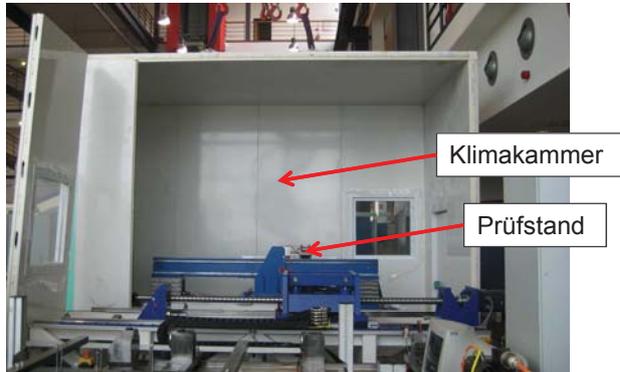
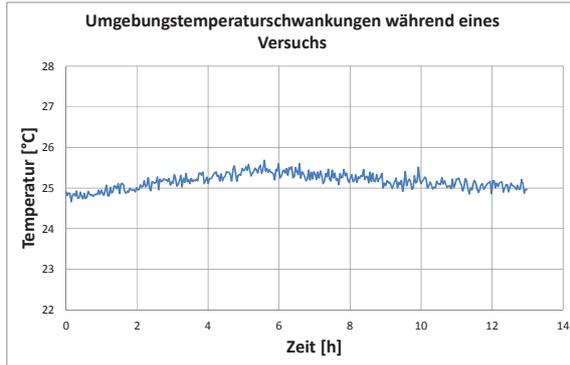
4 Aufbau der Simulation

5 Ergebnisse

6 Zusammenfassung und Ausblick

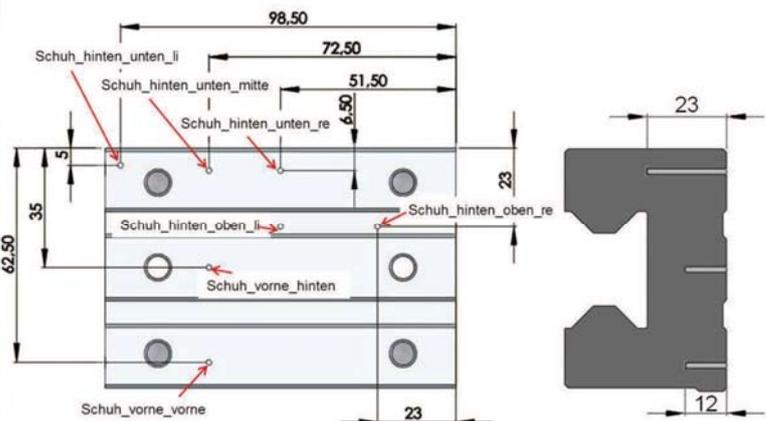
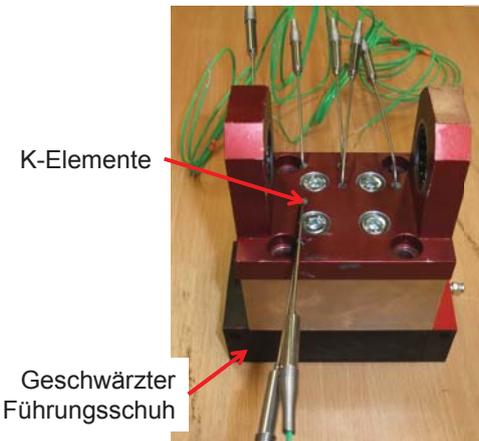
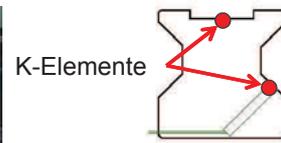
Vernachlässigung des Umgebungseinflusses

- Aufbau einer mobilen Klimakammer um den Prüfstand
- Nutzung von zwei unabhängig voneinander geregelten Klimageräten
- Erreichen von Umgebungstemperaturschwankungen von max. 0,7 °C über einen Zeitraum von 13 Stunden



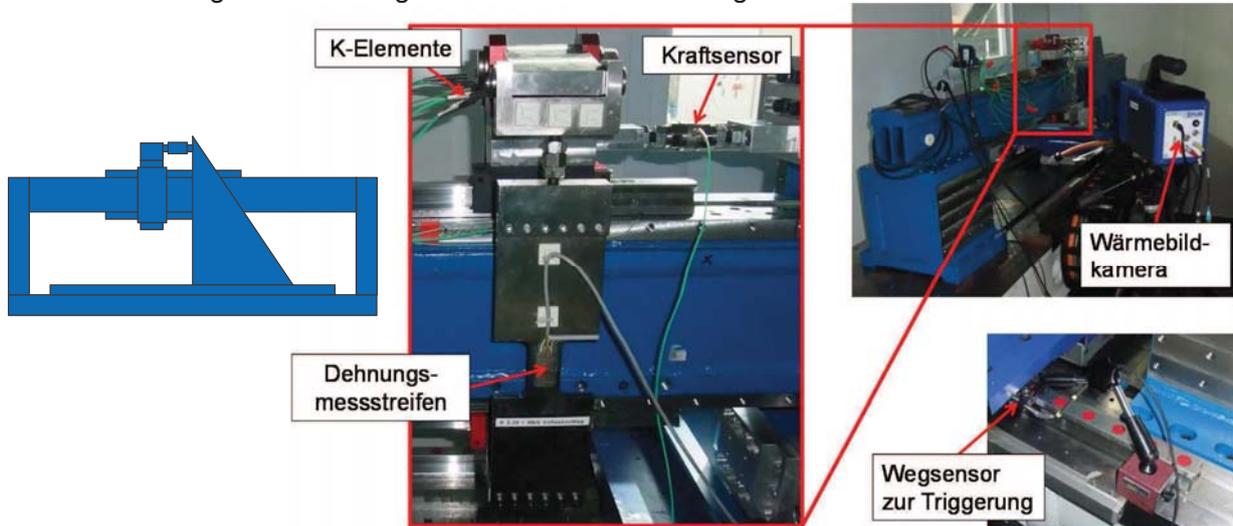
Vorbereitung der Prüflinge auf die Messungen

- Integration von K-Elementen in Führungsschuh und –schiene zur Bestimmung der Temperaturverteilung
- Präparierung des Führungsschuhs für Aufnahmen mit der Wärmebildkamera



Prüfstands- und Messaufbau

- Aufnahme der Reibkraft über einen integrierten Kraftsensor
- Aufnahme der Temperatur an der Außenseite des Führungsschuhs mit einer Wärmebildkamera
- Messung der Belastungskraft über einen Dehnungsmessstreifen



1 Einleitung - Führungssysteme

2 Messtechnische Untersuchung

3 Ergebnisse

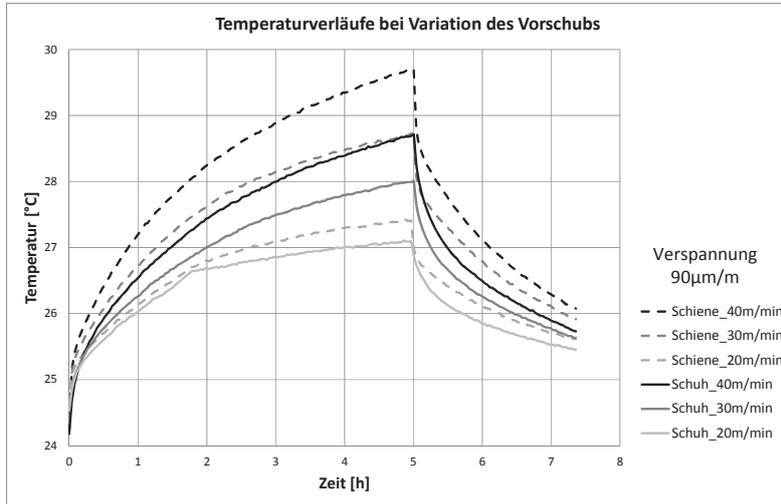
4 Aufbau der Simulation

5 Ergebnisse

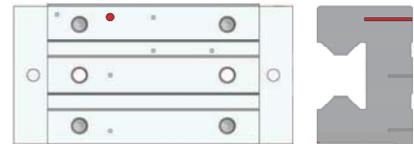
6 Zusammenfassung und Ausblick

Temperaturmessungen an Schuh und Schiene

- Messungen der Temperatur in Schuh und Schiene an jeweils einer Position bei verschiedenen Geschwindigkeiten aber gleicher Verspannkraft (5350 N)
- Die Messungen wurden mit Abstreifer durchgeführt

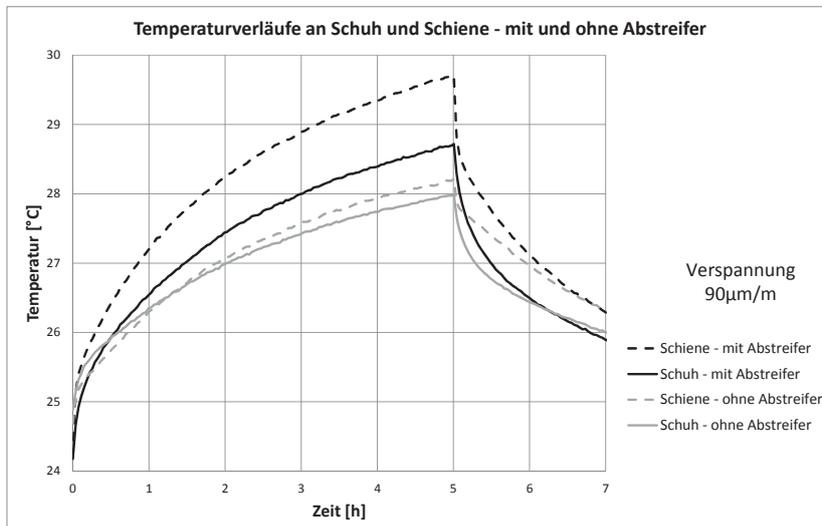


Messstelle im Schuh



Vergleich mit Abstreifer – ohne Abstreifer

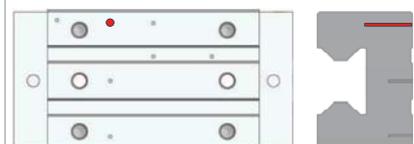
- Die Temperaturentwicklung ist aufgrund der höheren Reibleistung mit Abstreifer deutlich höher
 - Bei gleicher Geschwindigkeit (40 m/min) und Verspannkraft (5350 N)



Rollenumlenkung

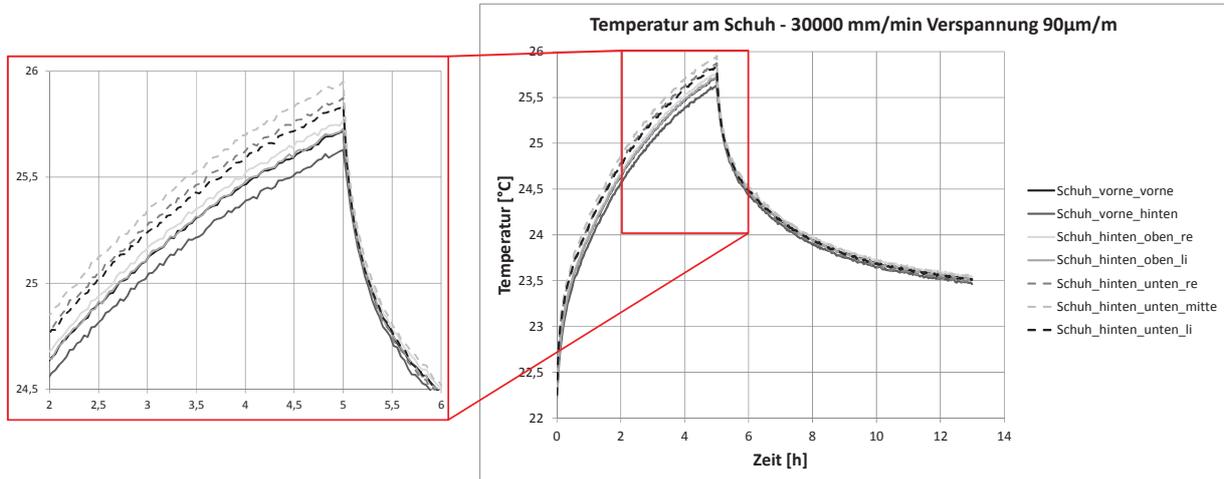
Führungsschuh

Messstelle im Schuh



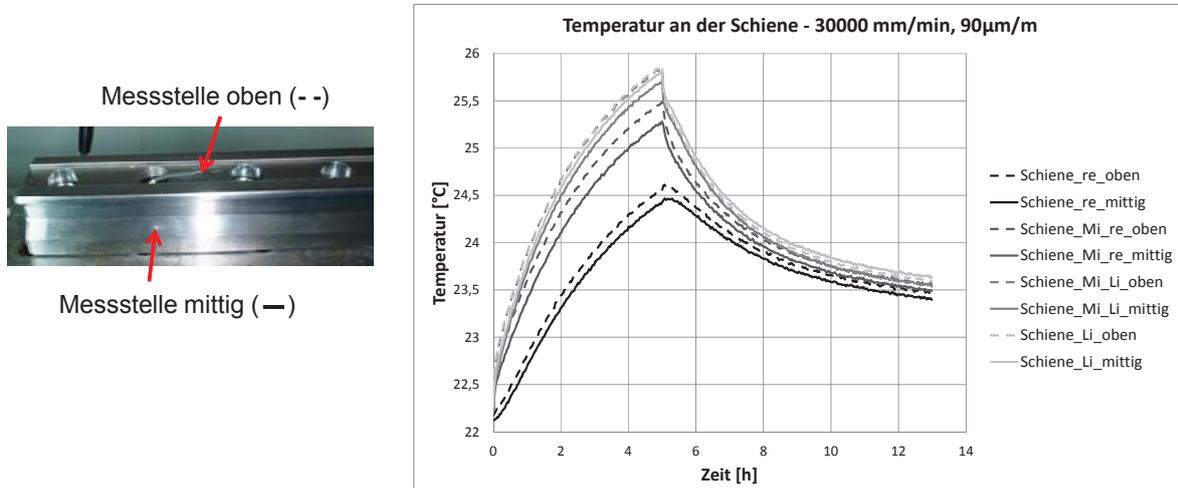
Temperaturmessungen am Führungsschuh

- Zum Abgleich des Modells mit den experimentellen Untersuchungen werden alle Messstellen herangezogen
- Hier sind beispielhaft die Messstellen im Führungsschuh dargestellt
- Die Temperaturen sind ähnlich, jedoch bilden sich tiefer im Inneren leicht höhere Temperaturen aus



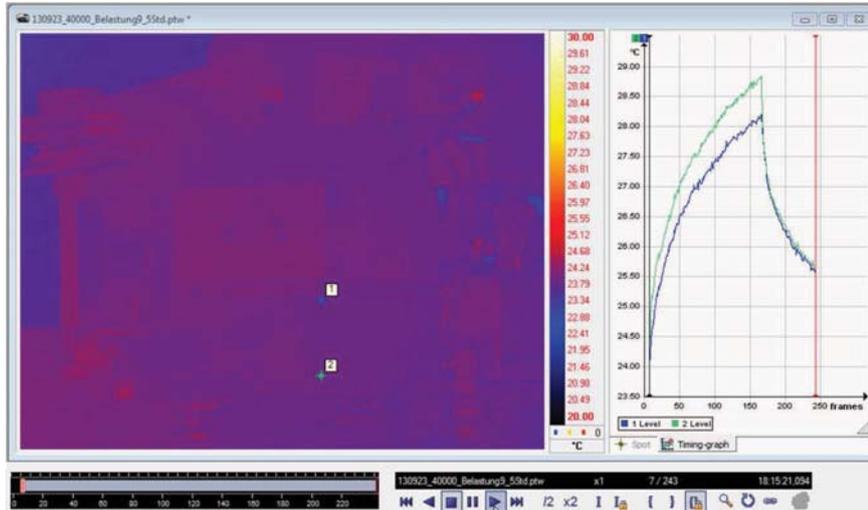
Temperaturmessungen an der Führungsschiene

- Zum Abgleich des Modells mit den experimentellen Untersuchungen werden alle Messstellen herangezogen
- Hier sind beispielhaft die Messstellen in der Führungsschiene dargestellt
- An den nicht komplett überfahrenen Positionen werden niedrigere Temperaturen erreicht
- Die Temperatur an den oberen Messstellen ist höher als direkt an der Lauffläche



Aufnahmen mit der Wärmebildkamera

- Betrachtung der Außenflächen des Führungsschuhs
- Jeder Punkt kann nachträglich noch als Wert ausgelesen werden
- Durch die Schwärzung des Schuhs kann der Emissionsgrad sicher bestimmt werden
- Keine Beeinflussung durch die Umgebung wegen Kapselung in der Kammer



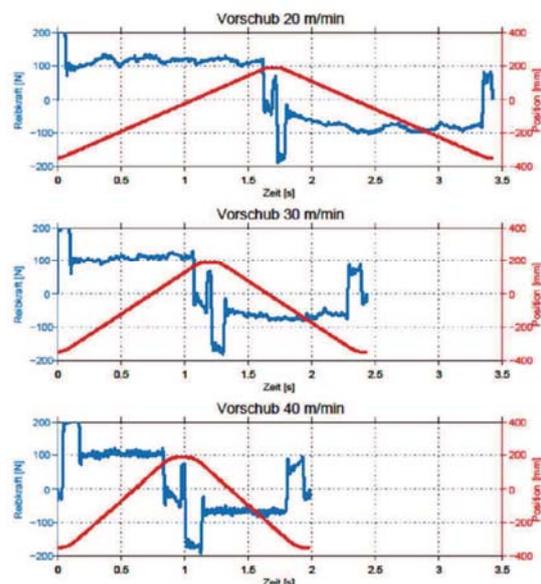
Reibkraftmessungen – Bestimmung der Leistung

- Messung der Reibkraft mit einem Piezokraftsensor
- Auslesen der Position aus der Steuerung
- Bestimmung der Gesamtwärmeleistung über die Reibleistung

$$P = F_R \cdot v = \frac{\sum abs(x_2 - x_1) \cdot \frac{F_1 + F_2}{2}}{t_{ges}}$$

Vorschub [m/min]	Reibleistung [W]
20	16,3
30	21,6
40	28,5

Verfahrzyklen mit Abstreifen, Belastung 5350 N



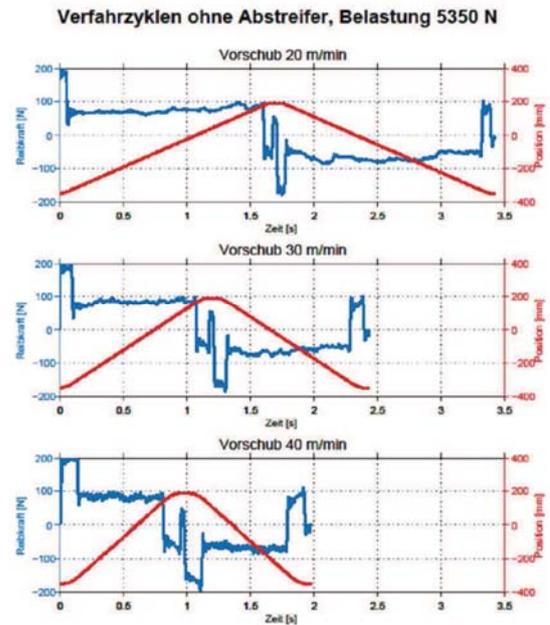
Reibleistung ohne Abstreifer

- Zur Bestimmung der Reibleistung, die am Abstreifer entsteht, werden Messungen ohne Abstreifer am oberen Schuh durchgeführt und die Differenz gebildet

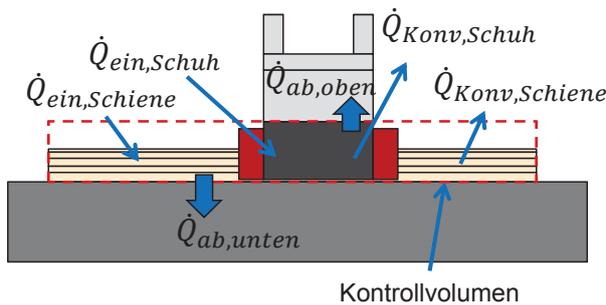
Vorschub [m/min]	Reibleistung [W]
20	7
30	14,4
40	21,2

Vorschub [m/min]	Reibleistung Abstreiferpaar [W]
20	9,3
30	7,25
40	7,3

- Die Abstreifer sind für bis zu 75 % der Reibleistung verantwortlich
- Zur genauen Bestimmung sind weiterführende Untersuchungen notwendig



Wärmebilanz um das Führungssystem



$$P_R = \dot{Q}_{ein,ges} = \dot{Q}_{aus,ges} = \dot{Q}_{Konv} + \dot{Q}_C + \dot{Q}_{ab}$$

$$\dot{Q}_{Konv} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T$$

$$\dot{Q}_C = c_p \cdot m \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{t}$$

Unsicherheiten: α, \dot{Q}_{ab}

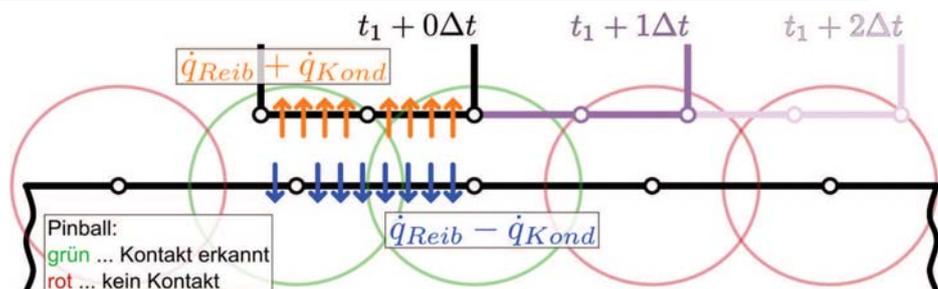
- Bestimmung der Konvektion an Schiene und Schuh über Literaturmodelle.
- Bestimmung der aufgenommenen Wärmekapazität.

Probleme des analytischen Modells:

- Die Wärmeübergänge nach Oben bzw. Unten sind kritisch zu berechnen, da sowohl die Fuge als auch die Temperatur der angrenzenden Bauteile nicht im Inneren bekannt sind.
 - Die Fuge muss abgeschätzt werden (Zusammenarbeit mit B02)
 - Die Konvektion sowie die Wärmeverteilung im System sind ohne FE-Simulation nicht abbildbar
- Zusammenarbeit mit A05

- 1 Einleitung - Führungssysteme
- 2 Messtechnische Untersuchung
- 3 Ergebnisse
- 4 Aufbau der Simulation
- 5 Ergebnisse
- 6 Zusammenfassung und Ausblick

Strukturvariable Simulation translatorisch bewegter Baugruppen

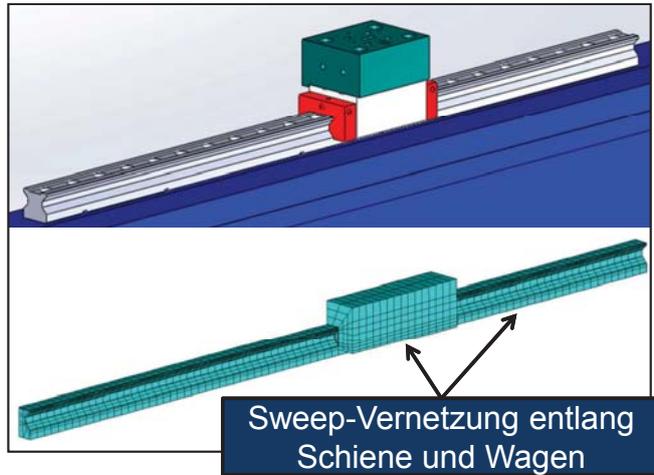


- Analyse des Problems in thermisch-transienter Simulation
- Diskrete Positionsvorgaben für bewegte Teilmodelle
- Kontaktelemente zur Identifikation der momentanen Modellstruktur sowie zum Ermitteln der thermischen Kontaktlasten:
 1. Berechnen der Konduktiven Wärmestromdichte:

$$\dot{q}_{Kond} = \alpha_{TCC}(T_{Cont} - T_{Targ})$$
 1. Reibwärmeeintrag über Vorgabe
- Separate Auswertung der NEUMANN-belasteten Kontaktpartner

FE-Modell der Profilschienenführung

- Berechnung als Halbmodell mittlerer Detailtiefe
- Nur Schiene und Wagen
→ Berücksichtigung der Anschlussstrukturen über ROBIN-RB's
- Keine Berücksichtigung des Wageninneren
- Weitgehende Übernahme der Querschnittsgeometrie der Schiene



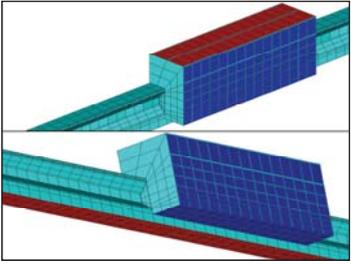
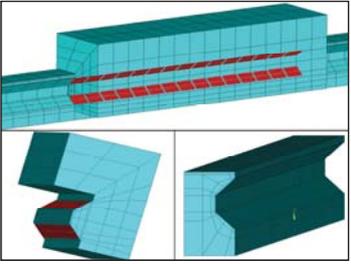
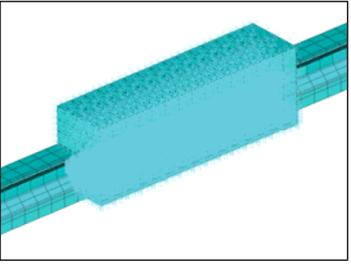
- Materialhomogenisierung im Bereich der Schienenbohrungen:
→ NB: Erhaltung des Kapazitiven Vermögen des Bereichs
→ Anpassung der Wärmespeicherzahl ρc :
$$\bar{\rho c} = \left(1 - \frac{\pi}{4} \frac{d}{l}\right) \rho c$$
 mit d ... Bohrungsdurchmesser l ... Bohrungsabstand

Vernetzung

- Wagen:
 - Lauffläche der Zylinderrollen einziger belasteter Bereich
 - Kunststoff-Abstreifer als Wärmeisolator für Wagen
- Schiene:
 - Feine Vernetzung in Bereich hoher Temperaturgradienten
→ Lauffläche der Zylinderrollen + Von Abstreifer überstrichene Fläche
- Materialien der finiten Elemente:
 - 1: Standard-Material 2: Homogenisierter Bereich

Belastung

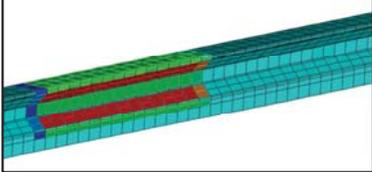
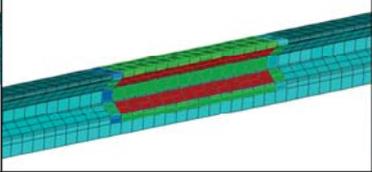
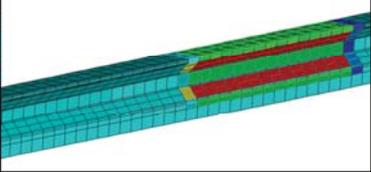
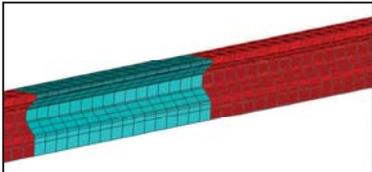
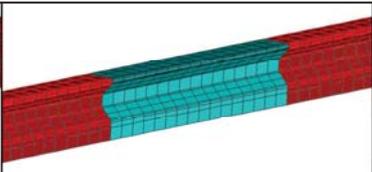
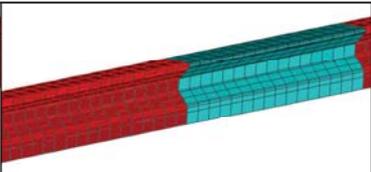
- Gleichmäßiges Anfangstemperaturfeld ($T_0 = T_{M\phi}$)
- Lasten mit einmaliger Definition:

Konvektion	Reibung	Bewegung
		

- Keine Konvektion an Stirnflächen (Kunststoffteilen für Kugelumlenkung)
- Reibwärmeeintrag am Wagen
 - nur bei konstanter Geschwindigkeit und Temperaturunabhängigkeit
- Definierte Verfahrbewegung wird zuvor in Last-Datei hinterlegt

Belastung

- Lasten mit prozessgebundener Aktualisierung:
 - Richtet sich nach der aktuellen Position des Führungswagens

Reibung			
Konvekt.			

- Reibungsanteil des Abstreifers über kompletten Schienenabschnitt
- Korrektur an den Wagenenden

1 Einleitung - Führungssysteme

2 Messtechnische Untersuchung

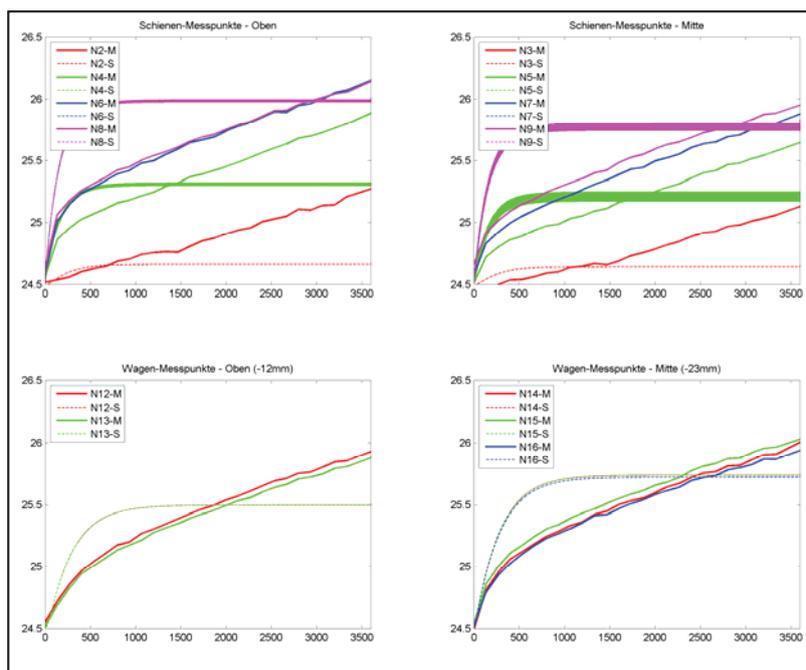
3 Ergebnisse

4 Aufbau der Simulation

5 Ergebnisse

6 Zusammenfassung und Ausblick

Standard-Material



Material:

$$\lambda = 40 \frac{W}{mm^2K} \quad c = 450 \frac{J}{kgK}$$

Anschluss-RB's:

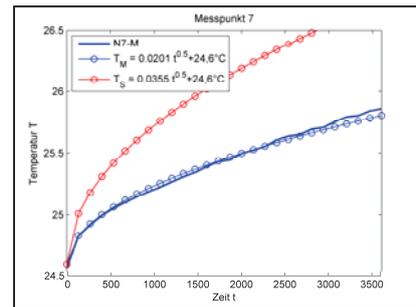
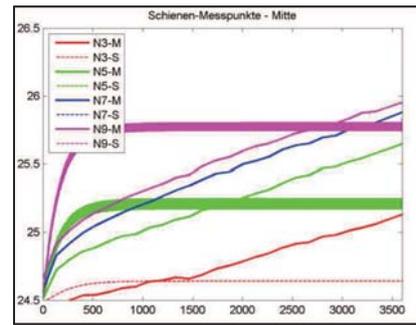
$$\alpha_{Conv} = 600 \frac{W}{m^2}$$

- Deutlich abweichende Temperaturverläufe
- Ähnliches Relativverhalten der Knotentemperaturen zueinander
- Auch hier: Temperatur der oberen Messstellen höher als Schientemperatur

Parametrisierung - Modellabgleich

- Übernahme der vorgegebenen Wärmequellen und -senken
- Parameter der Anschlussstrukturen
 - Einstellen anhand statischem Temperaturfeld
 - Problem: Endzustand sollte aus Messung bekannt sein
- Abbilden des Erwärmungsvorgangs:
 - Analytische Lösung für NEUMANN-erwärmten semi-infiniten Körper:

$$T(x = 0, t) = \dot{q}_0 \sqrt{4\pi^{-1} / \lambda \rho c} \sqrt{t}$$
 - Vergleich des Vorfaktors mit bester Näherungslösung aus Messwerten
 - Korrekte Lastkenntnis ist erforderlich
 - Verhältnis λ/c nach weiteren Kriterien
 - Für $v = 20\text{m/min}$ müsste Materialkennwert $\lambda \rho c$ um den **Faktor 3** höher sein



Für weiteren Abgleich ist zunächst eine genauere Erfassung der Lasten notwendig

1 Einleitung - Führungssysteme

2 Messtechnische Untersuchung

3 Ergebnisse

4 Aufbau der Simulation

5 Ergebnisse

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

- Experimentelle Untersuchungen:
 - Umfangreiche Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Parameter auf das thermoelastische Verhalten von Führungssystemen möglich
 - Weiterführende Messungen zur Bestimmung des Wärmeübergangs zwischen System und angrenzenden Bauteilen
- Simulation:
 - Das sich ergebende Temperaturfeld ist prinzipiell abbildbar
 - Korrekte Parametrierung erfordert viel Aufwand:
 - Umfangreiche Experimente zur Absicherung der Lastannahmen
 - Mehrere rechenintensive Abgleichsimulationen sind notwendig
(Aufwand: 6s/LS und ≈ 9000 LS/h bei $v = 20\text{m/min}$)
- Bei zufriedenstellender Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation:
 - Modell als Referenz zur Validierung diverser Detailstudien
 - Ausgangspunkt zur Ableitung aufwandsärmerer Stellvertretermodelle
 - Verwendung als Teilmodell in Analysen umfangreicherer Systeme

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

SFB/TR 96, Teilprojekt A05

DFG

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Dipl.-Ing.
Dorothea Haber
RWTH Aachen
Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

Tel.: +49-241-80-20609
Email: d.haber@wzl.rwth-aachen.de

Dipl.-Ing.
Marian Partzsch
Technische Universität Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Institut für Festkörpermechanik
Professur Dynamik und Mechanismentechnik

Tel.: +49-351-463-37958
Email: marian.partzsch@tu-dresden.de

Experimentelle Analyse fluidtechnischer Systeme in Werkzeugmaschinen

Ju. Weber, J. Weber; Institut für Fluidtechnik, TU Dresden

Fluidtechnische Systeme ermöglichen die Kühlung bzw. Vorwärmung sowohl einzelner Komponenten als auch gesamter Baugruppen und tragen folglich wesentlich zur Steuerung und Beherrschung des thermoelastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen bei. Speziell unter dem Fokus der Bearbeitungsgenauigkeit in Verbindung mit einer energieeffizienten Fertigung sind sie von Beginn an in die Untersuchungen zur Gestaltung von Werkzeugmaschinen einzubeziehen.

Mit dem Ziel, Berechnungsmodelle zur Beschreibung des thermo-energetischen Verhaltens fluidischer Temperiersysteme zu entwickeln, widmet sich das Teilprojekt A04 „Thermofluidtechnik“ der Untersuchung fluidtechnischer Gesamtsysteme und Komponenten in der Werkzeugmaschine. Der Lösungsweg gliedert sich in vier Teilbereiche. Aufbauend auf der experimentellen Untersuchung des Gesamtsystems können wichtige fluidtechnische Hauptkomponenten identifiziert sowie Grundaussagen zu deren Wirkstruktur und Betriebsweise gewonnen werden. Im Weiteren werden ausgewählte Hauptkomponenten auf geeigneten Prüfständen untersucht. Diese experimentellen Untersuchungen – sowohl des Gesamtsystems als auch wesentlicher Hauptkomponenten – sind eine wichtige Voraussetzung für die Ableitung komponentenbasierter Knotenpunktmodelle, welche schlussendlich miteinander zu systembeschreibenden Modellen verknüpft werden können.

Im vorliegenden Beitrag werden erste Ergebnisse der experimentellen Analyse des Bearbeitungszentrums DBF 630 der Firma Dörries Scharmann Technologie GmbH vorgestellt. Die hierbei untersuchten Systeme sind anhand ihrer Funktion in folgende Teilsysteme zu gliedern: Hydraulik-, Getriebschmierung-, Kühlschmierstoff- und Kühlsystem. An diesen Teilsystemen wurden für unterschiedliche Betriebszustände der Maschine Analysen durchgeführt.

Kontakt

Dipl.-Ing. Juliane Weber

TU Dresden

Institut für Fluidtechnik

01062 Dresden

Tel.: 0351 – 463 31964

E-Mail: juweber@ifd.mw.tu-dresden.de

3. Kolloquium zum SFB/TR-96

Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

am 29. / 30. 10. 2013 in Aachen

Experimentelle Analyse fluidtechnischer Systeme in Werkzeugmaschinen

Institut für Fluidtechnik, Prof. Dr.-Ing. J. Weber, Juliane Weber

Einleitung: Motivation und Zielstellung

Anwendungsgebiete von Werkzeugmaschinen

- spanende Bearbeitung
- Maschinen-, Anlagen- und Fahrzeugbau, Elektroindustrie

Aktuelle Situation

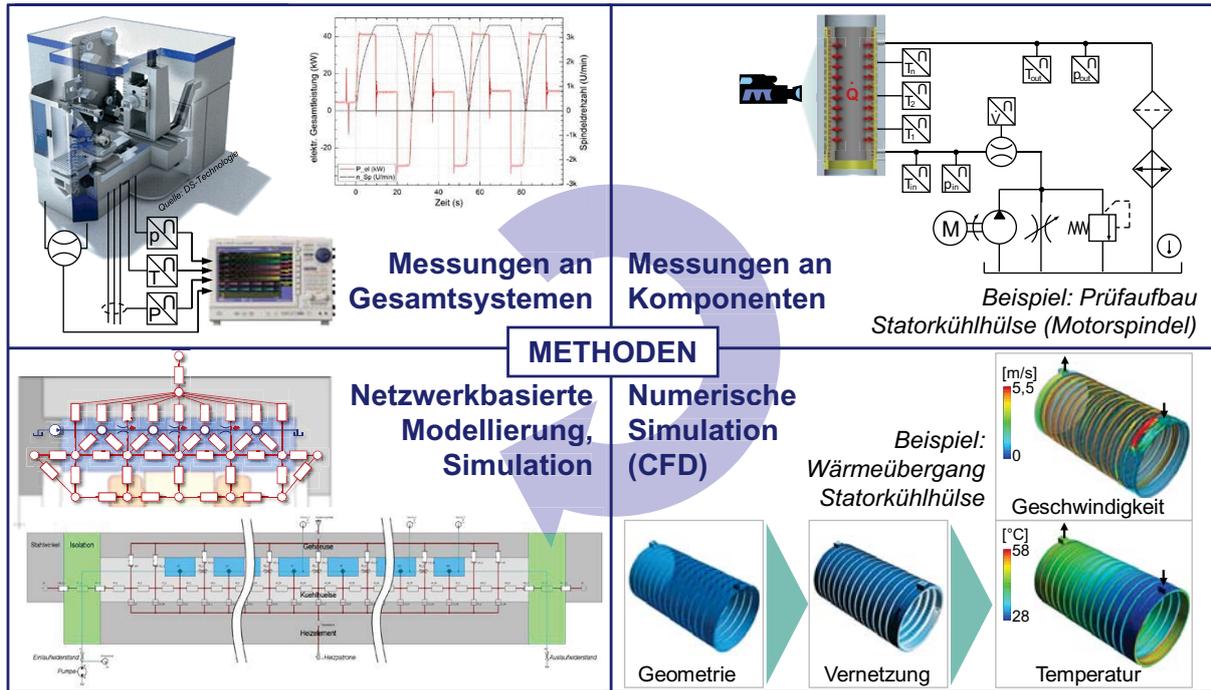
- wachsendes Bewusstsein für Umweltverschmutzung und steigende Energiekosten
- Steigerung der Genauigkeitsanforderungen und der Produktivität
 - aber: ohne Kompensations- oder Korrekturverfahren sind die Grenzen für Produktivitätssteigerungen durch höhere Antriebsleistungen erreicht



Forschungsgegenstand und Zielstellung im Teilprojekt A04

- Untersuchung thermischer und energetischer Wirkzusammenhänge
- Quantifizierung des Verhaltens durchströmter WZM-Bauteile
- Entwicklung und Beurteilung netzwerkbasierter Berechnungsmodelle
- Steigerung der Energieeffizienz bei optimaler thermischer Wirkung

Einleitung: Methodische Vorgehensweise



Experimentalstrategie: Versuchsmaschine

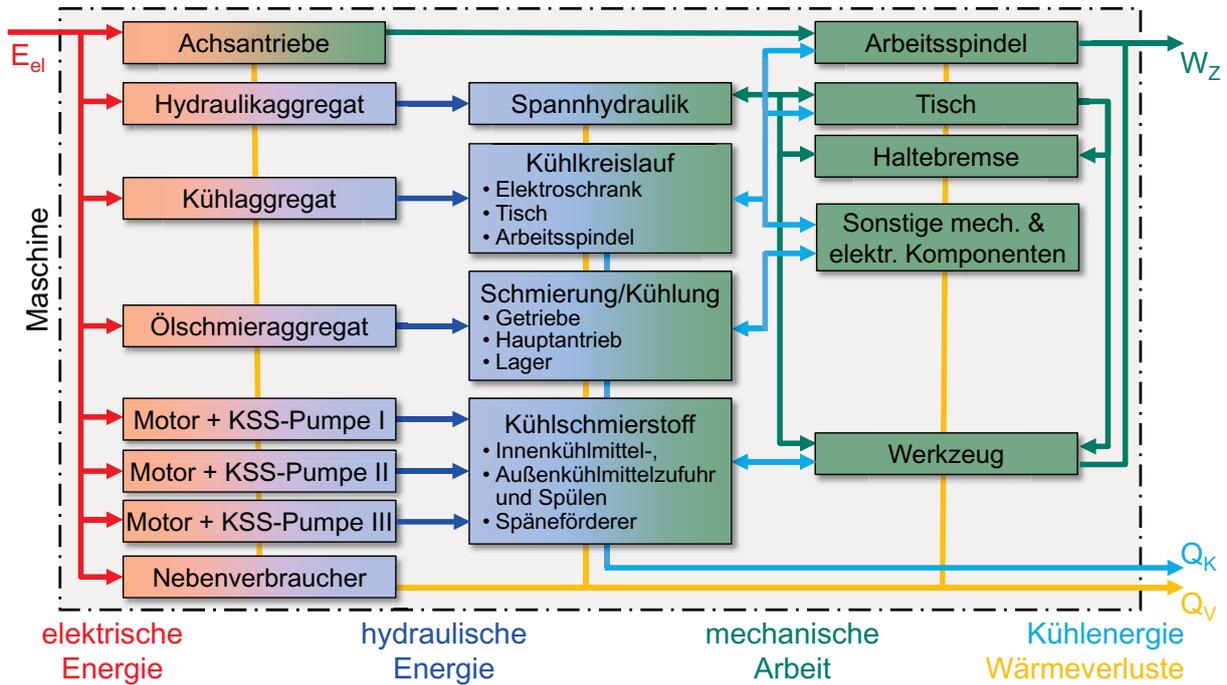


Anwendungsbereiche

- Dreh-Bohr-Fräsbearbeitung
- Schwerzerspannung
- Leistungstest für Werkzeuge
- Untersuchung der Prozessstabilität

DBF630 (DS Technologie; WZL Aachen)	
Typ	Bearbeitungszentrum
Herstellungsjahr	2007
Antriebsleistung	max. 35 kW
Drehzahlbereich	1...3500 min ⁻¹
Drehmoment	max. 1700 Nm
Arbeitsraum	850 mm x 700 mm x 800 mm (X/Y/Z)
Tischgröße	630 mm x 630 mm
Planschieberweg	±35 mm
Vorschubgeschwindigkeit	1...35000 mm/min (X/Y/Z) 0.1...10800 Grad/min (B) 1...800 mm/min (U)

Experimentalstrategie: Energetische Systemgrenzen



Experimentalstrategie: Berechnungsformeln

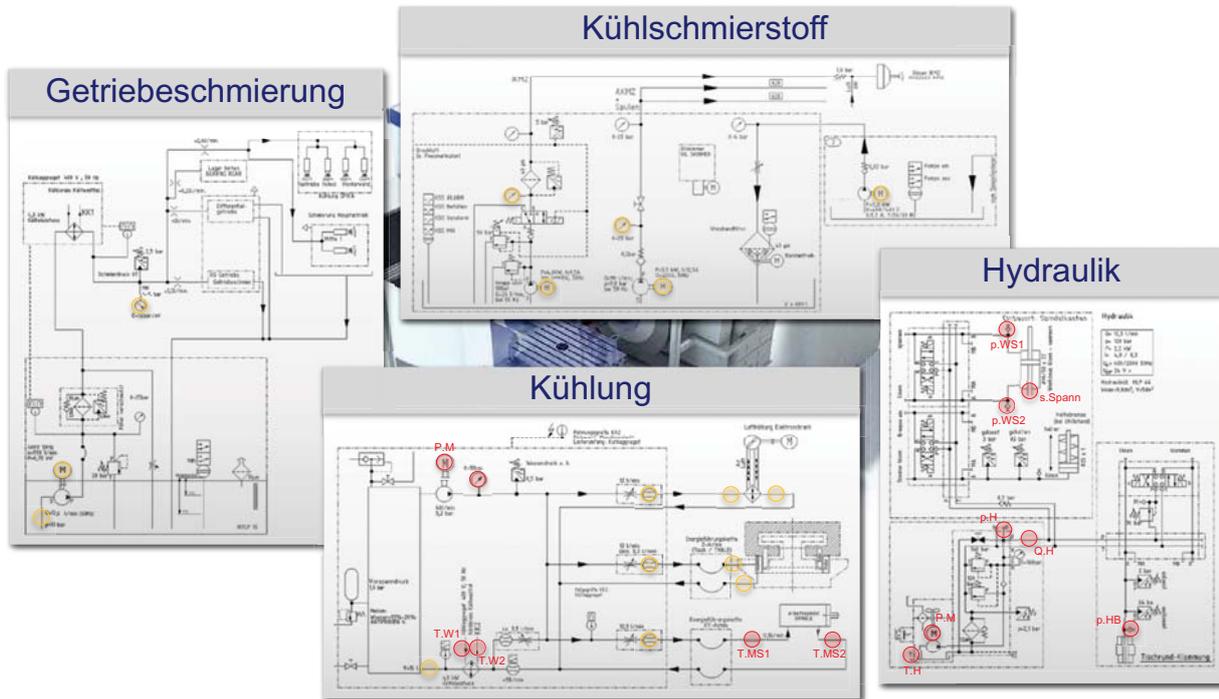
	Leistung	Energie/Arbeit
Elektrotechnik	$P_{\Sigma}(t) = \sum_{\mu=1}^n u_{\mu 0} \cdot i_{\mu}$	$E_{el} = \int_{t_1}^{t_2} P_{el} dt$
Dreiphasenstromsystem	$P_{\Sigma} = P_{el} = \overline{P_{\Sigma}(t)}$ (gem. DIN 40110-2)	
Hydraulik	$P_{hyd} = p \cdot Q$	$E_{hyd} = \int_{t_1}^{t_2} P_{hyd} dt$
Mechanik	$P_{mech} = F \cdot v$	$W = \int_{t_1}^{t_2} P_{mech} dt$

- F – Kraft
- i_{μ} – Leiterstromstärke
- n – Anzahl der Leiter
- p – Druck
- Q – Volumenstrom
- t – Zeit
- $u_{\mu 0}$ – virt. Sternspannung
- v – Geschwindigkeit

Wirkungsgrad: $\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$ → nur für einen festen Betriebspunkt geeignet

Energienutzungsgrad: $\varepsilon = \frac{E_{ab}}{E_{zu}}$ → erlaubt den Vergleich von Betriebszyklen

Experimentalstrategie: Fluidtechnische Teilsysteme

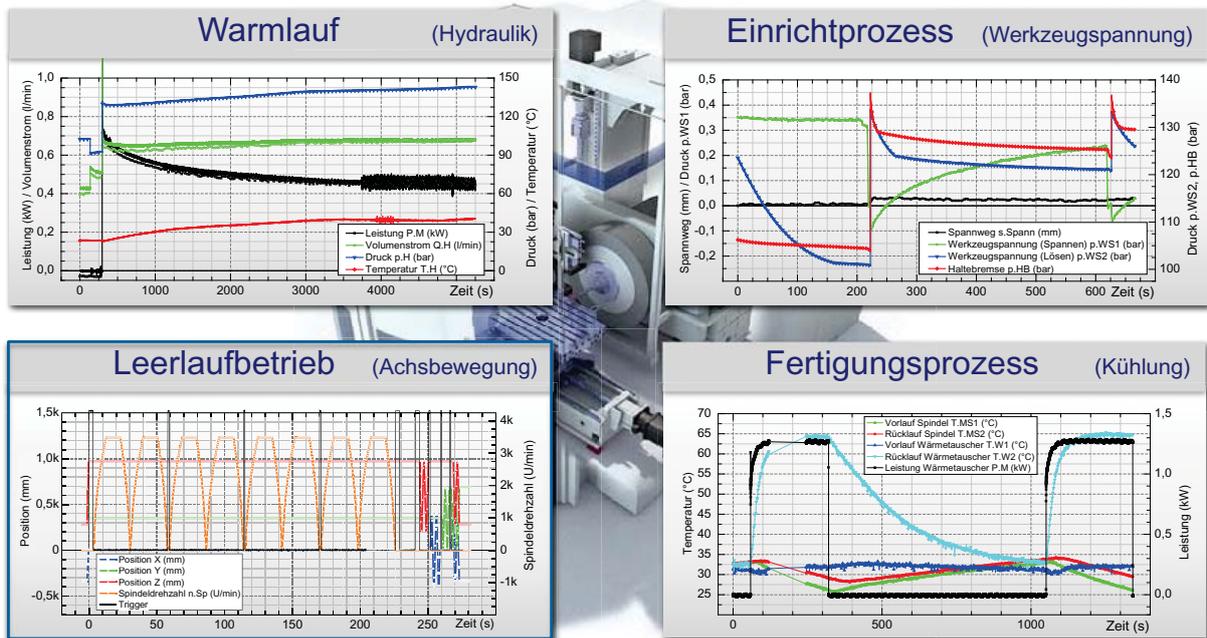


Experimentalstrategie: Betriebszyklen

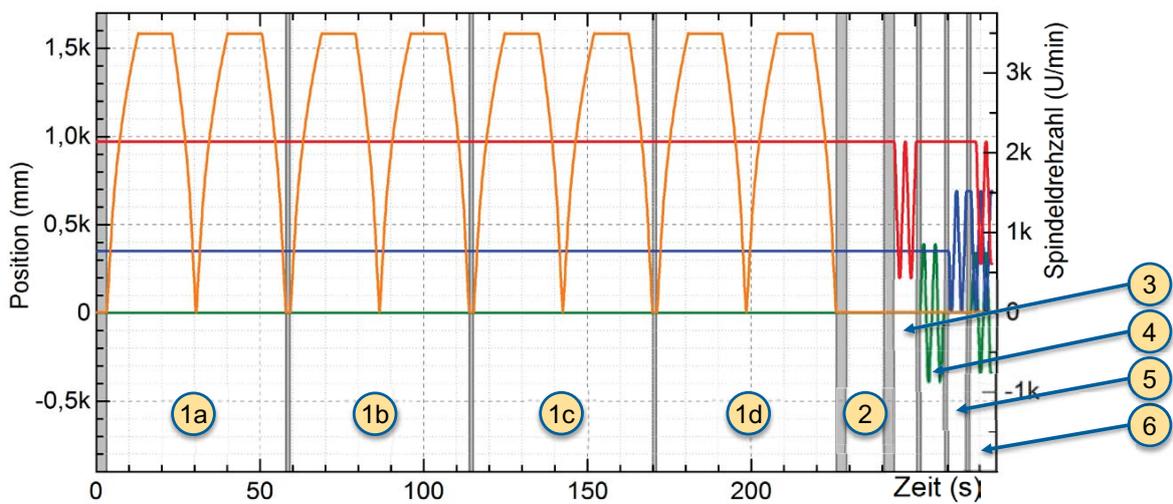
The operational cycles are defined as follows:

- Warmlauf:**
 - Inbetriebnahme der Maschine
 - Datenerfassung bis zum Erreichen eines quasistationären Zustands der fluidischen Systeme
- Einrichtprozess:**
 - Werkzeug-, Werkstückwechsel
 - CNC-Programmierung
 - Probelauf ohne Zerspanung
 - Not-Aus
- Leerlaufbetrieb:**
 - Spindeldrehzahl (Beschleunigen, Abbremsen)
 - Variation Kühlschmierstoffzufuhr (AKMZ, IKMZ)
 - Verfahren Arbeitstisch (Rotation, Translation)
 - Verfahren Spindelachsen
- Fertigungsprozess:**
 - schichtweises Planfräsen eines Stahlblockes (S235JR)
 - Werkzeug 1: 32 mm Fräskopfdurchmesser, 2 mm Schnitttiefe, 2100 U/min, 630 mm/min
 - Werkzeug 2: 63 mm Fräskopfdurchmesser, 4 mm Schnitttiefe, 1100 U/min, 660 mm/min

Experimentalstrategie: Betriebszyklen



Leerlaufbetrieb: Prozesseigenschaften

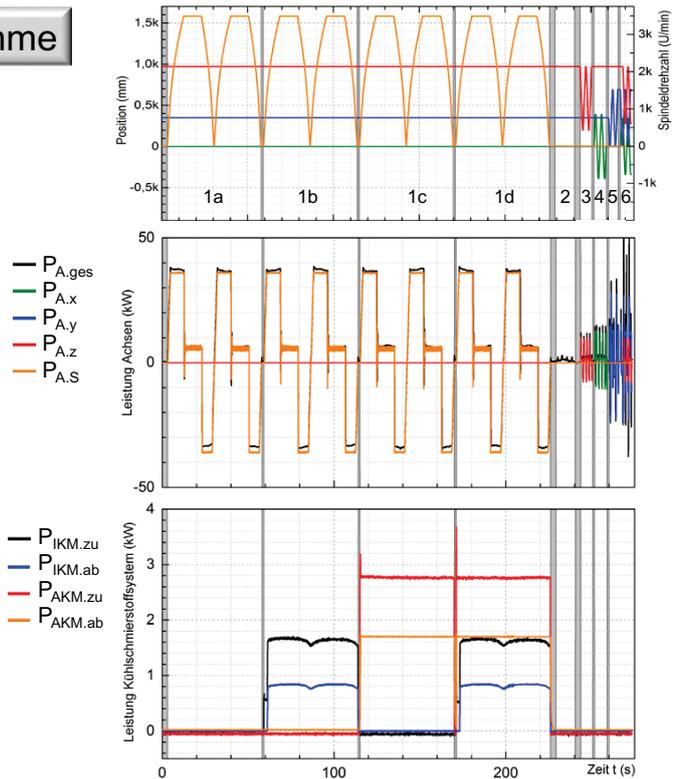


- Spindelposition X (mm)
- Spindelposition Y (mm)
- Tischposition Z (mm)
- Spindeldrehzahl n.Sp (U/min)
- Triggersignal

- | | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 Variation Spindeldrehzahl | 2 Tischdrehung (180°) |
| a) ohne KSS | 3 Verfahren z-Achse (Tisch) |
| b) mit KSS (IKMZ) | 4 Verfahren x-Achse (Spindel) |
| c) mit KSS (AKMZ) | 5 Verfahren y-Achse (Spindel) |
| d) mit KSS (IKMZ, AKMZ) | 6 Verfahren x-,y- und z-Achse |

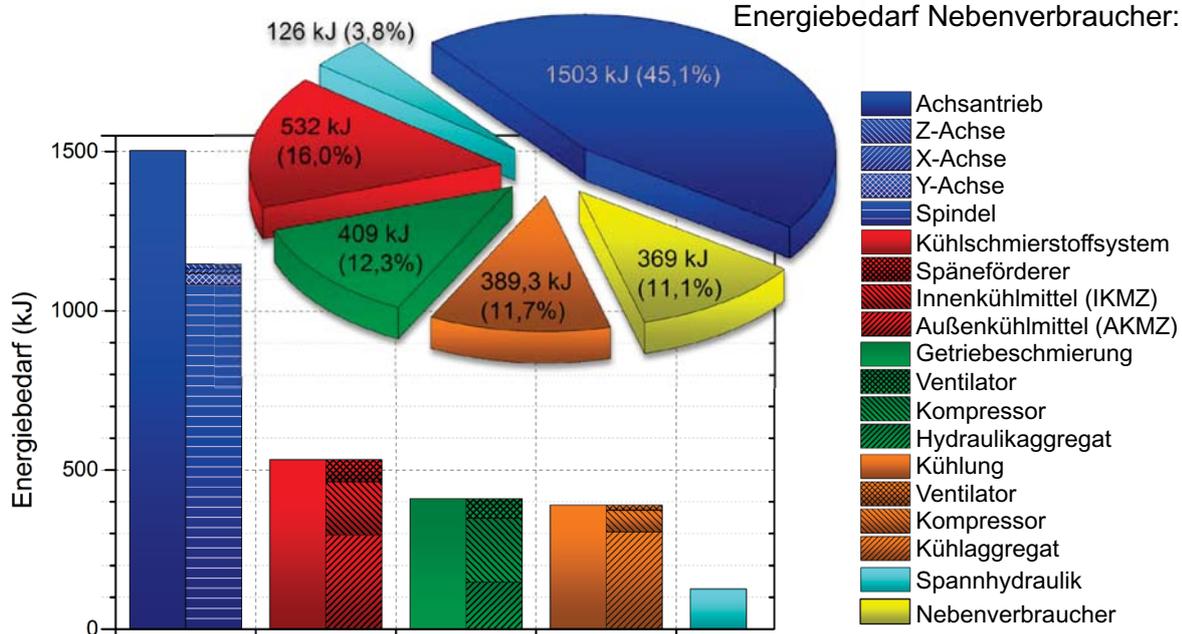
Leerlaufbetrieb: Leistungsaufnahme

- Gute Übereinstimmung zwischen gemessener Leistung der Antriebsachsen und der aus der Steuerung ausgelesenen Leistungsdaten
- Höhere Leistungsaufnahme für senkrechte Verfahrbewegung des Spindelkastens (5)
- Keine Auswirkungen des KSS auf die Antriebsleistung der Spindel im Leerlauf
- Einfluss der Zentrifugalkräfte an der Spindel auf die Innenkühlmittelzufuhr sichtbar, während Leistungsaufnahme der Außenkühlmittelzufuhr konstant ist



Leerlaufbetrieb: Energiebedarf

Gesamtenergiebedarf: 3330 kJ
 Energiebedarf Fluidsysteme: 44%
 Energiebedarf Achsantrieb: 45%
 Energiebedarf Nebenverbraucher: 11%



Zusammenfassung

- Energiebedarf fluidtechnischer Systeme im Leerlaufbetrieb entspricht 44%
 - daran hat das Kühlschmierstoffsystem mit 16% den größten Anteil
 - Hydraulik hat nur geringen Anteil mit 4%
- Leistungsdaten ermöglichen bereits im Leerlauf Rückschlüsse auf spezifische Prozessparameter (z.B. Fliehkräfte und Wirkung auf Kreiselpumpe, Widerstände beim x,y,z-Verfahren des Tisches, Wirkungsgrad der fluidischen Systeme)

Ausblick

- Vergleich mit anderen Betriebszyklen, insbesondere dem Fertigungsprozess
- Vergleich mit einer weiteren Werkzeugmaschine
- Abbildung der fluidtechnischen Teilsysteme der Werkzeugmaschine in einem Systemmodell zum besseren Verständnis der Wirkzusammenhänge

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

DFG

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Dipl.-Ing.

Juliane Weber

Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Telefon: 0351 463-31964

Telefax: 0351 463-32136

www.tu-dresden.de/mwifd

juweber@ifd.mw.tu-dresden.de

Leistungsmessung an Linearmotoren bei hohen Verfahrgeschwindigkeiten

R. Werner, S. Winkler; Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe, TU Chemnitz

Zur Bestimmung der Leistung eines elektrischen Systems müssen Strom und Spannung erfasst werden. Da im allgemeinen Strom und Spannung zeitlich veränderlich sind, ergibt die Multiplikation dieser Größen die Momentanleistung. In diesem Fall berechnet sich die Wirkleistung als arithmetischer Mittelwert der Momentanleistung.

Für periodische Ströme und Spannungen ist für eine korrekte Mittlung die Periodendauer von Strom und Spannung als Integrationszeit T für die Mittelwertbildung einzusetzen. Bei drehzahlvariablen Antrieben besteht das Problem, dass die Periodendauer im Allgemeinen weder konstant noch direkt messbar ist. Zur Vermeidung von Integrationsfehlern ist deshalb die Berechnung über eine hinreichend lange Zeit durchzuführen. Aufgrund dessen sollte bei realen Systemen über mindestens zehn Perioden integriert werden. Daher bieten moderne Leistungsmesser die Möglichkeit, ihre Integrationszeit an die jeweils geforderten Bedürfnisse anzupassen.

Bei rotierenden Antrieben stellen lange Integrationszeiten kein Problem dar, da diese Antriebe eine kontinuierliche Bewegung während der Messung ausführen können. Bei Motoren, welche Vorschubachsen antreiben und insbesondere bei Linearmotoren wird die Bewegungszeit jedoch durch den Fahrweg und die Verfahrgeschwindigkeit begrenzt. Im Vergleich zu rotierenden Motoren ist somit die Leistungsbetrachtung stationärer Arbeitspunkte des Antriebs nicht möglich.

Folglich ist auch eine Verlustauswertung für diese Arbeitspunkte nicht möglich.

Grundsätzlich ist dies aber nicht erforderlich. Im Allgemeinen sind die Fahrzyklen der Antriebe sehr viel kürzer als deren thermische Zeitkonstanten. Somit ist auch die Temperaturänderung während eines Zyklus marginal. Es ist daher möglich, die Temperaturverteilung mit einer mittleren Verlustleistung zu berechnen, ohne dass ein signifikanter Fehler gegenüber der Rechnung mit exakten zeitlichen Verläufen der Verlustleistung auftritt.

Falls eine genaue Verlustaufteilung dennoch erwünscht sein sollte, gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Bestimmung der Einzelverluste. Zum einen lassen sich durch Kurzzeitintegration mit festen Integrationszeiten quasistationäre Leistungen berechnen. Bei der Verwendung dieser Methode ist darauf zu achten, dass die berechneten Werte um den tatsächlichen Mittelwert schwanken.

Des Weiteren ist es möglich, die Einzelverluste auf Basis der vom Umrichter bereitgestellten Messwerte zu errechnen. Neben dem grundsätzlichen Messfehler von bis zu 5 % ist dabei zu berücksichtigen, dass die bereitgestellten Werte vom Umrichter gefiltert werden. Bei transienten Vorgängen führt die Filterung zu Phasenverschiebungen des Messsignals. Infolgedessen können sich erhebliche Fehler bei der Leistungsbestimmung ergeben.

Abschließend besteht noch die Möglichkeit, die Verluste durch ihre Abhängigkeit von mechanischen Größen zu ermitteln, über die nicht integriert werden muss, wie etwa die Geschwindigkeit oder die Lastkraft. Die Genauigkeit dieses Verfahren hängt naturgemäß stark davon ab, wie genau die Beziehungen zwischen den einzelnen Größen, beispielsweise Strom und Kraft, bestimmt werden können.

Kontakt

Dipl.-Ing. Stefan Winkler

TU Chemnitz

Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe

09126 Chemnitz

Tel.: 0371 – 531 38744

E-Mail: stefan.winkler@etit.tu-chemnitz.de

29.10.2013

Teilprojekt C04 - Thermo-energetische Motoroptimierung

Leistungsmessung an Linearmotoren bei hohen
Verfahrgeschwindigkeiten

Stefan Winkler

SFB Transregio96
– 3. Kolloquium zum SFB/TR-96 –

Leistungsmessung allgemein

Leistung ist eine Arbeit ΔW , die in der Zeit Δt verrichtet wird.

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

Mit der Arbeit

$$W = \int F ds$$

Leistungsmessung allgemein

Die mechanische Leistung ist als Kraft definiert, die entlang einer Bewegungsrichtung wirkt.

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

Für rotatorische Bewegungen gilt analog

$$P = \vec{M} \cdot \vec{\omega}$$

Die elektrische Leistung wird in einem Widerstand R durch die Spannung U und den Strom I umgesetzt.

$$P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$$

Leistungsmessung allgemein
Zeitlich veränderliche Größen

Bei zeitlich veränderlichen Größen ergibt sich

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

Durch Mittelwertbildung werden drei konstante Werte definiert.

Scheinleistung

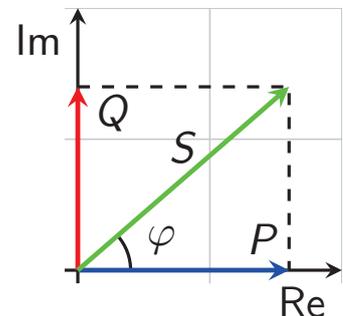
$$S = U_{\text{Eff}} \cdot I_{\text{Eff}}$$

Wirkleistung

$$P = \overline{p(t)} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot i(t) dt = S \cdot \lambda$$

Blindleistung

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$



Leistungsmessung allgemein
Zeitlich veränderliche Größen

Effektivwert einer Größe

$$U_{\text{Eff}} = \sqrt{u^2(t)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u^2(t) dt}$$

Definition Der Effektivwert einer zeitlich veränderlichen Größe entspricht einer Gleichgröße, die an einem Widerstand die gleiche mittlere Leistung umsetzt.

Bei exakt sinusförmigen Größen gilt:

$$U_{\text{Eff}} = \hat{U} / \sqrt{2}$$

$$\lambda = \cos \varphi$$

Leistungsmessung allgemein
Verzerrungsblindleistung

Bei Systemen mit sinusförmigen Spannungen und Oberschwingungsbehafteten Strömen tritt zusätzlich eine Verzerrungsblindleistung auf.

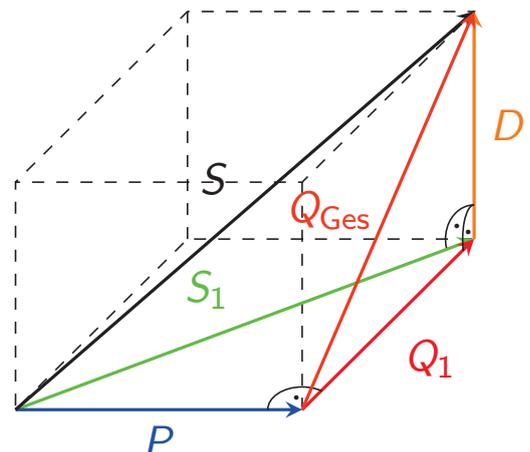
Verzerrungsblindstrom $I_V = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2}$

Verzerrungsblindleistung

$$D = U \cdot I_V = U \cdot \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2}$$

Gesamtscheinleistung

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$



Leistungsmessung allgemein

Drehstromsysteme

Bei m -phasigen Systemen gilt allgemein:

$$P_{\text{Ges}} = \sum_{i=1}^m P_i$$

Bei Drehstrommotoren ($m = 3$, symmetrischer Aufbau) gilt:

$$P_{\text{Ges}} = 3 \cdot P_{\text{Str}} = 3 \cdot U_{\text{Str}} \cdot I_{\text{Str}} \cdot \lambda = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \lambda$$

Leistungsmessung allgemein

Wirkleistungsberechnung

$$P = \overline{p(t)} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot i(t) dt$$

Integrationszeit T = Periodendauer von Strom und Spannung

Problem Vor allem bei drehzahlvariablen Antrieben ist die Periodendauer nicht konstant und mitunter nicht messbar.

Lösung Verlängerung der Integrationszeit (Mathematisch korrekt: $T \rightarrow \infty$)

Leistungsmessung bei Linearmotoren Allgemein

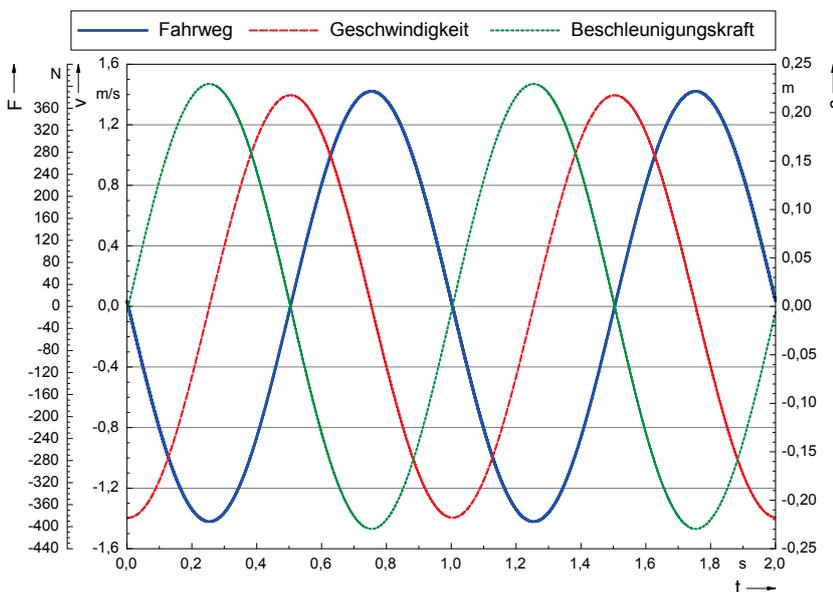
Wichtigster Unterschied zu rotierenden Motoren:

- begrenzter Fahrweg → keine stationäre Arbeitspunkte
- Leistungs- und Verlustfassung für einzelne Arbeitspunkte ist nicht möglich (kurze Fahrzeiten).

Lösungsansätze:

- Mittlung über komplette Fahrzyklen
- Bildung von quasi konstanten Werten (Kurzzeitintegration)
- Verwendung von Messgrößen aus der Steuerung
- Rückführung auf mechanische Größen

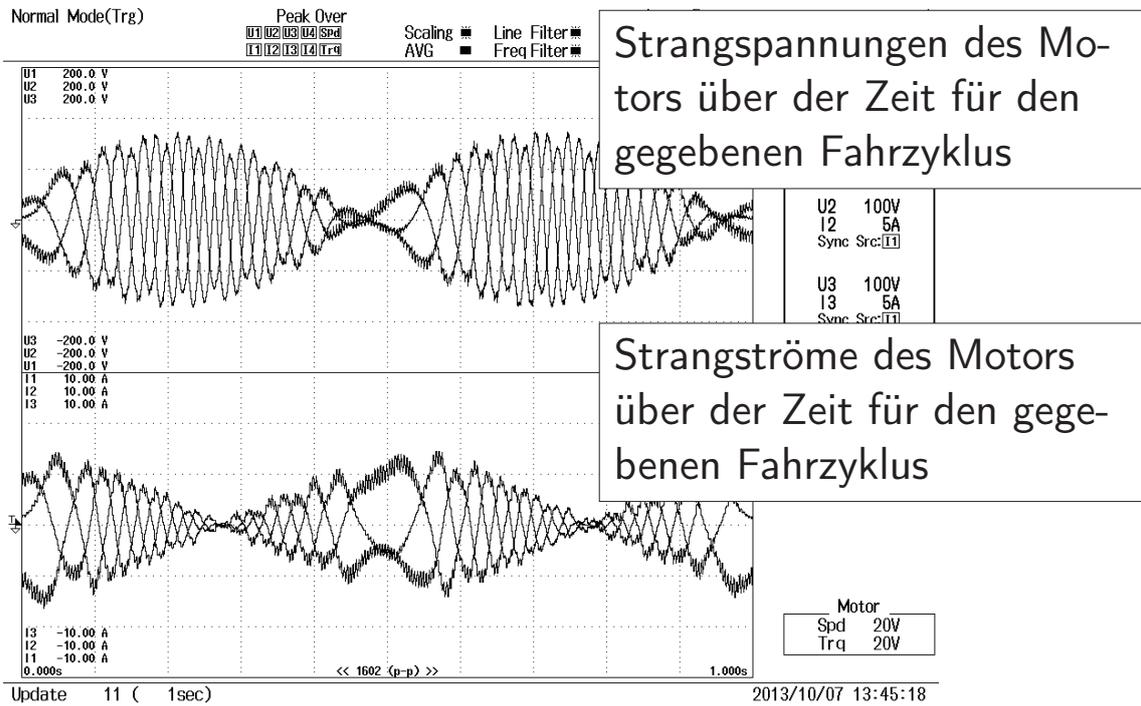
Leistungsmessung bei Linearmotoren Vorgaben zur Vergleichsmessung



- Sinusförmiger Sollwertverlauf
- $s_{pp} = 440 \text{ mm}$
- $m_{\text{Schlitten}} = 46,1 \text{ kg}$
- $t_{\text{Zyklus}} = 1 \text{ s}$

Leistungsmessung bei Linearmotoren

Vorgaben zur Vergleichsmessung



Strangspannungen des Motors über der Zeit für den gegebenen Fahrzyklus

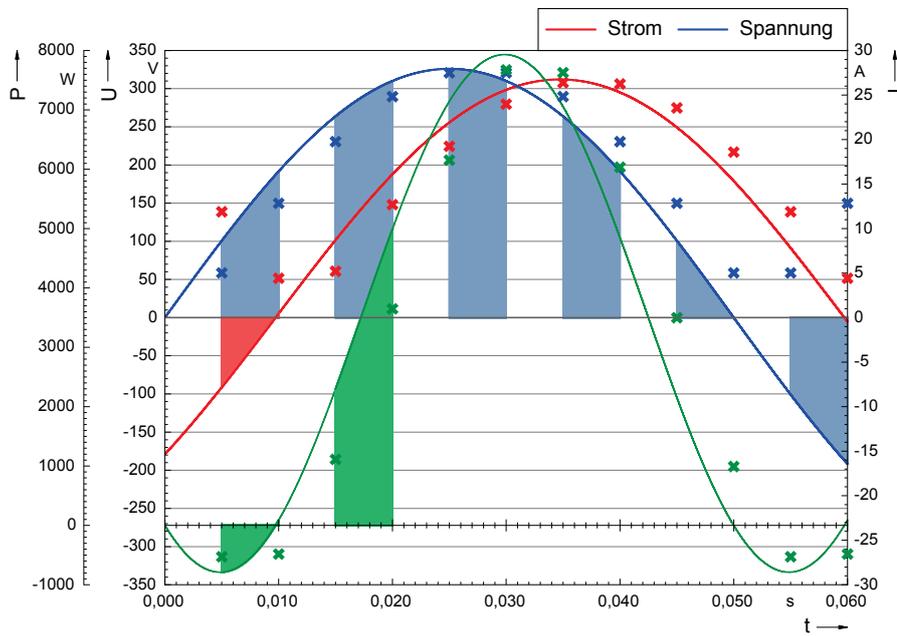
Strangströme des Motors über der Zeit für den gegebenen Fahrzyklus

Leistungsmessung bei Linearmotoren

Mittlung über Fahrzyklus

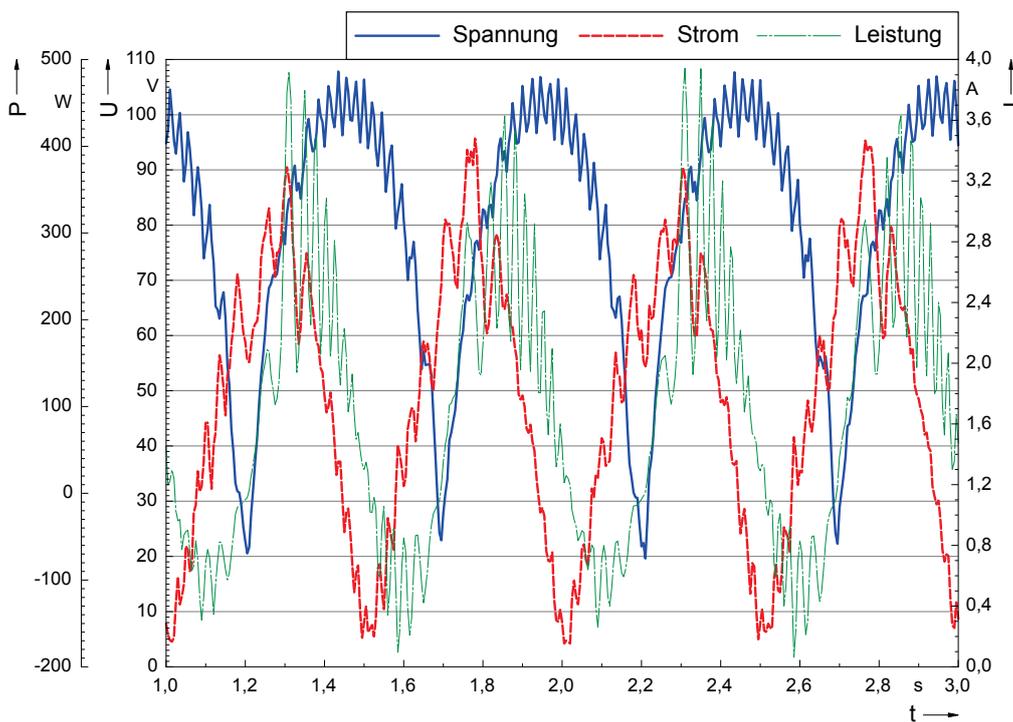
- $s_{\text{Anfang}} = s_{\text{Ende}} \rightarrow E_{\text{Mech}} = 0$
- $E_{\text{Umgesetzt}} = E_{\text{Verlust}}$
- Dauer Fahrzyklus: $T_{\text{Zyklus}} = 1 \text{ s}$
- Umgesetzte Energie: $E = 94 \text{ J}$
- Mittlere aufgenommene Leistung: $P = 94 \text{ W}$
- Thermische Zeitkonstante Motor: $\tau_{\text{Therm}} = 9,2 \text{ min}$
- Erwärmung des Motors während eines Zyklus: $\vartheta_{\text{Motor}} \approx 0,06 \text{ K}$

Leistungsmessung bei Linearmotoren Kurzzeitintegration



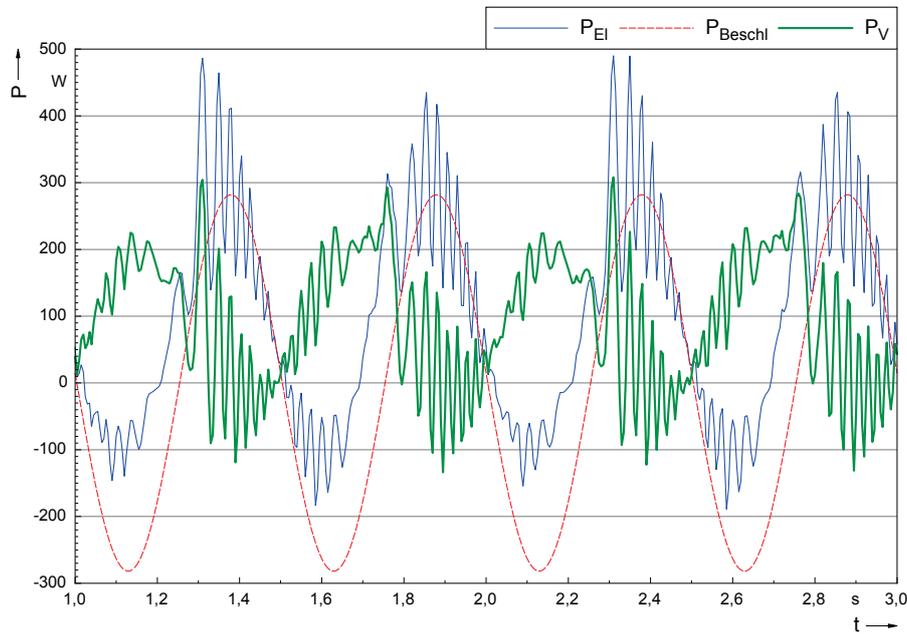
- 1 MS/s
- $T = 5 \text{ ms}$
- $U = \sqrt{u^2(t)}$
- $I = \sqrt{i^2(t)}$
- $P = u(t) \cdot i(t)$

Leistungsmessung bei Linearmotoren Kurzzeitintegration

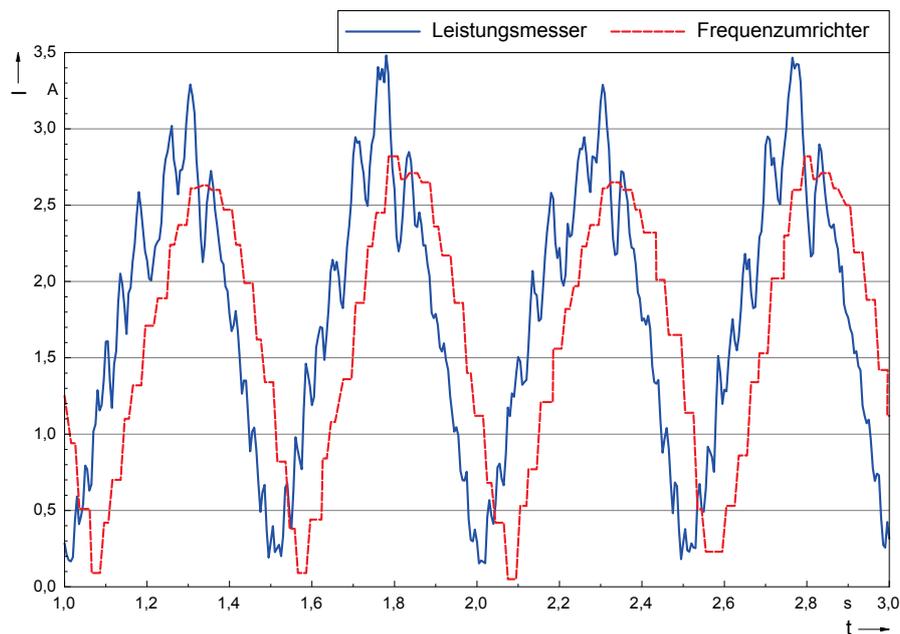


Leistungsmessung bei Linearmotoren Kurzzeitintegration

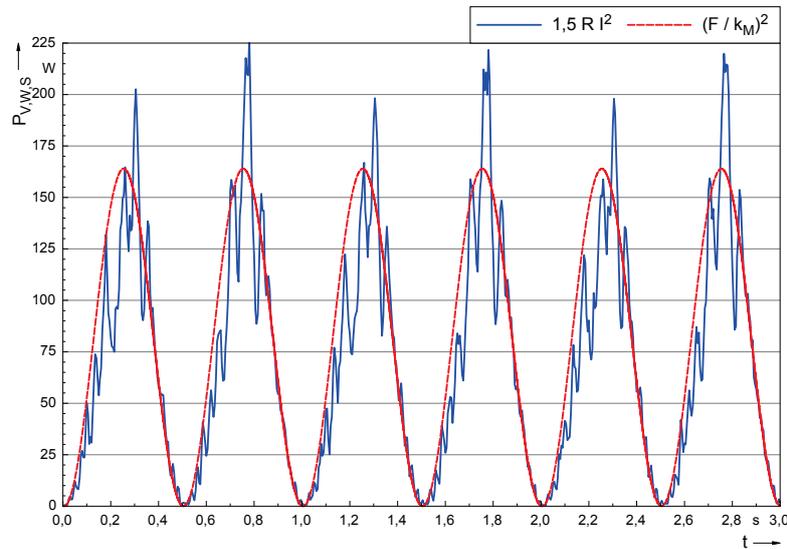
Daraus ergibt sich folgender Leistungsverlauf.



Leistungsmessung bei Linearmotoren Vergleich mit Steuerung



Leistungsmessung bei Linearmotoren Mechanische Größen



$$P_{V,W,S} = 1,5 \cdot R_{KI} \cdot I_L^2 = \left(\frac{F}{k_M} \right)^2$$

Zusammenfassung

Mittlung über Fahrzyklus:

- Sehr einfach zu bestimmen
- Fahrzyklus muss sehr viel kleiner als Zeitkonstante sein

Kurzzeitintegration:

- Werte schwanken um tatsächlichen Wert
- Hoher Rechenaufwand bei der Leistungsmessung

Verwendung von Umrichterwerten:

- Falsche Leistungsmessung durch Phasenverschiebung
- Geringe Grundgenauigkeit, Messunsicherheit > 5 %

Bestimmung über mechanische Größen:

- Keine Integration notwendig
- Motormodell muss bestimmt sein

Modellreduktion für geschaltete, gekoppelte thermo-elastische Systeme

P. Benner, N. Lang, J. Saak; Mathematik in Industrie und Technik (MiIT), TU Chemnitz

Im Vortrag wird die Modellierung des Beispiels „Maschinenständer“ aus dem TP A05 als ein geschaltetes System dargestellt und in den Kontext der gekoppelten thermo-elastischen Systeme eingepflegt. Das resultierende geschaltete, gekoppelte System wird mit Hilfe der Methode des balancierten Abschneidens, unter Berücksichtigung der aufgrund der Kopplungsbedingungen entstehenden Index-1 Struktur des differentiell-algebraischen Gleichungssystems, in ein reduziertes System überführt. Auf Basis der Vorwärtssimulation des Modells niedriger Ordnung wird der Zeitbereichsfehler im Vergleich zum Originalsystem analysiert.

Basis für die Modellierung bildet das gegebene Grundmodell aus dem TP A05. Der besondere Fokus hierbei liegt auf der vorgegebenen Verfahrbewegung des Werkzeugschlittens. Für die Betrachtung der relevanten Kontakttrandbedingung wird angenommen, dass die Führungsschienen des Ständers in 15 Segmente mit einer Höhe von jeweils 99 mm unterteilt wurden. Ein solches Segment gilt als im Kontakt befindlich, wenn der geometrische Mittelpunkt bezüglich der Höhe des Segmentes von der Kontaktfläche des Spindelstocks überdeckt wird. Aus der Höhe von 0.5m des Schlittens ergibt sich, dass sich zu jedem Zeitpunkt 5 aufeinander folgende, vollständige Segmente im Kontakt befinden. Daraus ergeben sich exakt 11 mögliche diskrete Positionen des Spindelstocks. Jede dieser Positionen bildet im Rahmen einer FE-Modellierung ein separates Subsystem. Im Weiteren werden für diese Subsysteme in der Offline-Phase die zugehörigen reduzierten Modelle berechnet. Im anschließenden Online-Teil, der Simulation, des daraus entstehenden geschalteten Systems wird anhand der diskreten Position des Werkzeugschlittens zwischen den einzelnen Systemen umgeschaltet und somit der Verlauf der gesuchten Deformationskurven bestimmt.

Abschließend werden die Ergebnisse mit Hilfe von Fehlerbetrachtungen im Zeitbereich validiert. Hierbei kann gezeigt werden, dass bereits für eine reduzierte Systemordnung von 60 Freiheitsgraden ein relativer Fehler, im Vergleich zum Originalsystem mit 66504 Freiheitsgraden, im einstelligen Promillebereich erzeugt werden kann.

Kontakt:

Dipl.-Math. techn. Norman Lang

TU Chemnitz

Fakultät für Mathematik

Mathematik in Industrie und Technik (MiIT)

09126 Chemnitz

Tel.: 0391 – 6110 413

E-Mail: norman.lang@mathematik.tu-chemnitz.de

SFB/Transregio 96 3. Kolloquium
29.-30. Oktober 2013

Modellordnungsreduktion für geschaltete, gekoppelte thermo-elastische Systeme

Peter Benner, Norman Lang, Jens Saak

TU Chemnitz, Fakultät für Mathematik, Mathematik in Industrie und Technik
(MiIT)

SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

1/24

Überblick

- 1 Modellordnungsreduktion (MOR)
- 2 MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
- 3 Numerische Ergebnisse

SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

2/24

Modellordnungsreduktion (MOR)

Das System

Wir betrachten das

lineare, zeitinvariante (LTI) System

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bz(t), \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (\Sigma(E; A, B, C))$$

mit

- $x \in \mathbb{R}^n$ Zustand,
- $z \in \mathbb{R}^m$ Eingang, bzw. Steuerung,
- $y \in \mathbb{R}^p$ Ausgang, bzw. Messung,

und

$$E, A \in \mathbb{R}^{n \times n}, \quad B \in \mathbb{R}^{n \times m}, \quad C \in \mathbb{R}^{p \times n}.$$

Modellordnungsreduktion (MOR)

Das System

Wir betrachten das

lineare, zeitinvariante (LTI) System

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bz(t), \\ y(t) &= Cx(t). \end{aligned} \quad (\Sigma(E; A, B, C))$$

Im Kontext „FEM für die Wärmeleitung“:

- E FEM Massematrix,
- A diskreter Ortsdifferentialoperator inkl. Randbedingungen,
- x Temperaturen in den FEM Freiheitsgraden.

Modellordnungsreduktion (MOR)

Das System

Wir betrachten das

lineare, zeitinvariante (LTI) System

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bz(t), \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (\Sigma(E; A, B, C))$$

mit Übertragungsfunktion

$$G(s) = C(sE - A)^{-1}B$$

Modellordnungsreduktion (MOR)

Grundidee Modellordnungsreduktion

LTI System $\Sigma = (E; A, B, C)$:

$$E \dot{x}(t) = A x(t) + B z(t), \quad y(t) = C x(t)$$

Modellordnungsreduktion

Finde Projektionsmatrizen

$$V \in \mathbb{R}^{n \times r} \text{ und } W \in \mathbb{R}^{n \times r},$$

$$r \ll n.$$

$$W^T E V \dot{\hat{x}}(t) = W^T A V \hat{x}(t) + W^T B z(t), \quad \hat{y}(t) = C V$$

Modellordnungsreduktion (MOR)

Grundidee Modellordnungsreduktion

LTI System $\Sigma = (E; A, B, C)$:

$$E \dot{x}(t) = A x(t) + B z(t), \quad y(t) = C x(t)$$

Modellordnungsreduktion

Finde Projektionsmatrizen

$$V \in \mathbb{R}^{n \times r} \text{ und } W \in \mathbb{R}^{n \times r}, \\ r \ll n.$$

$$\hat{E} \dot{\hat{x}}(t) = \hat{A} \hat{x}(t) + \hat{B} z(t), \quad \hat{y}(t) = \hat{C} \hat{x}(t)$$

Ziel: $\hat{y}(t) \approx y(t)$

Modellordnungsreduktion (MOR)

Balanciertes Abschneiden

Übersicht: Balanciertes Abschneiden

- $\Sigma(E; A, B, C)$, heißt **balanciert**, falls die Lösungen P, Q der verallgemeinerten algebraischen **Lyapunovgleichungen** (GALE)

$$APE^T + EPA^T + BB^T = 0, \quad A^TQE + E^TQA + C^TC = 0,$$

$$P = Q = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \text{ mit } \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n > 0 \text{ erfüllen.}$$
- $\{\sigma_1, \dots, \sigma_n\}$ sind die **Hankel Singulärwerte** von Σ .
- Balancierte Realisierung durch **Zustandsraumtransformation**

$$\mathcal{T} : (E; A, B, C) \mapsto (TET^{-1}; TAT^{-1}, TB, CT^{-1}) \\ = \left(\left[\begin{array}{cc} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{array} \right], \left[\begin{array}{cc} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{array} \right], \left[\begin{array}{c} B_1 \\ B_2 \end{array} \right], \left[\begin{array}{cc} C_1 & C_2 \end{array} \right] \right).$$

- **Abschneiden** \rightsquigarrow **reduziertes Modell**: $(\hat{E}; \hat{A}, \hat{B}, \hat{C}) = (E_{11}; A_{11}, B_1, C_1)$.

Modellordnungsreduktion (MOR)

Balanciertes Abschneiden

Implementierung: SR (square root) Methode

- 1 Berechne (Cholesky-)Faktoren der Lösungen der Lyapunovgleichungen,

$$P = S^T S, \quad Q = R^T R.$$

- 2 Berechne Singulärwertzerlegung (SVD)

$$SER^T = [U_1, U_2] \begin{bmatrix} \Sigma_1 & \\ & \Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix}.$$

- 3 Definiere

$$W := R^T V_1 \Sigma_1^{-1/2}, \quad V := S^T U_1 \Sigma_1^{-1/2}.$$

- 4 Das reduzierte Modell ist: $(W^T A V, W^T B, C V)$.

Modellordnungsreduktion (MOR)

Momentenabgleich

Momentenabgleich (Moment Matching - MM)

- Betrachte die Taylor-Entwicklung der rationalen Übertragungsfunktionen $G(s)$, $\hat{G}(s)$ in s_0 .
- Bestimme V , W so, dass die ersten q Taylorkoeffizienten (Momente) übereinstimmen, d.h.

$$G^{(i)}(s_0) = \hat{G}^{(i)}(s_0), \quad i = 0, \dots, q - 1.$$

Modellordnungsreduktion (MOR)

Momentenabgleich

Momentenabgleich (Moment Matching - MM)

- Betrachte die Taylor-Entwicklung der rationalen Übertragungsfunktionen $G(s)$, $\hat{G}(s)$ in s_0 .
- Bestimme V , W so, dass die ersten q Taylorkoeffizienten (Momente) übereinstimmen, d.h.

$$G^{(i)}(s_0) = \hat{G}^{(i)}(s_0), \quad i = 0, \dots, q - 1.$$

Diese Bedingungen werden durch die Krylov-Unterräume

$$\begin{aligned} \text{span}\{V\} &= \mathcal{K}_q \left((s_0 E - A)^{-1}, (s_0 E - A)^{-1} B \right), \\ \text{span}\{W\} &= \mathcal{K}_q \left((s_0 E - A)^{-T}, (s_0 E - A)^{-T} C^T \right) \end{aligned}$$

erfüllt.

Modellordnungsreduktion (MOR)

Momentenabgleich

Krylov-Unterräume

$$\begin{aligned} \text{span}\{V\} &= \mathcal{K}_q \left((s_0 E - A)^{-1}, (s_0 E - A)^{-1} B \right), \\ \text{span}\{W\} &= \mathcal{K}_q \left((s_0 E - A)^{-T}, (s_0 E - A)^{-T} C^T \right) \end{aligned}$$

(Block-)Arnoldi-Verfahren

zweiseitig

- 1 Starte iterativen Algorithmus mit $V_1 = (s_0 E - A)^{-1} B$.
- 2 Berechne $V_i = (s_0 E - A)^{-1} V_{i-1}$, $i = 1 \dots, q$.
- 3 Bilde $V := [V_1, \dots, V_q]$ orthonormal (Gram-Schmidt).
- 4 Berechne W analog mit $W_1 = (s_0 E - A)^{-T} C^T$.

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme Das Modell

- Thermisches Modell:

$$c\rho\dot{T} = \lambda\nabla^2 T$$

$$\lambda\partial_\nu T = \alpha_{i,j}(t)(q + \kappa(T_{ext} - T))$$

$$T(0, \cdot) = T_0$$



MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
Das Modell

- Thermisches Modell:

$$c\rho\dot{T} = \lambda\nabla^2 T$$

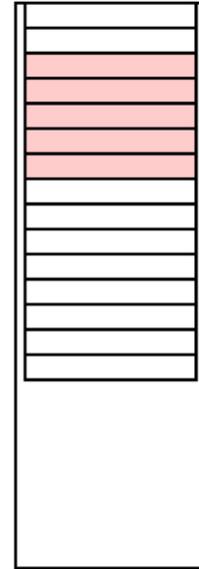
$$\lambda\partial_\nu T = \alpha_{i,j}(t)(q + \kappa(T_{ext} - T))$$

$$T(0, \cdot) = T_0$$

$$\alpha_{i,j}(t) = \begin{cases} 1, & \text{bei Kontakt} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases},$$

$$j = 1, \dots, 11$$

- i : Schienensegmente
- j : Aktuelle Kontaktkonfigurationen
- Kontakt: $i = j, \dots, j + 4 \Rightarrow \alpha_j \leftarrow \alpha_{i,j}$



MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
Das Modell

- Thermisches Modell:

$$E_{th}\dot{T} = A_{th}^{(j)}T + B_{th}z^{(j)}$$

$$T(0, \cdot) = T_0$$

- Lineares Elastizitätsmodell (stationär):

$$-\text{div}(\sigma) = 0$$

$$\varepsilon = \mathbf{C}^{-1}\sigma + \beta(T - T_0)I$$

$$\mathbf{C}^{-1}\sigma = \frac{1+\nu}{E}\sigma - \frac{\nu}{E}\text{tr}(\sigma)I$$

$$\varepsilon(u) = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T)$$



MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
Das Modell

- Thermisches Modell:

$$E_{th} \dot{T} = A_{th}^{(j)} T + B_{th} z^{(j)}$$

$$T(0, \cdot) = T_0$$

- Lineares Elastizitätsmodell (stationär):

$$0 = A_{thel} T - A_{el} u$$

- Thermo-elastisches Modell:

- einseitige Kopplung
- dynamisches Temperaturfeld $T \in \mathbb{R}^n$
- stationäres Deformationsfeld $u \in \mathbb{R}^{3n}$



MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
Sequentieller Zugang

Betrachte

$$E_{th} \dot{T} = A_{th}^{(j)} T + B_{th} z^{(j)},$$

$$y = C_{th} T.$$

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
Sequentieller Zugang

Bestimme reduzierte Subsysteme

$$W_j^T E_{th} V_j \dot{\hat{T}} = W_j^T A_{th}^{(j)} V_j \hat{T} + W_j^T B_{th} z^{(j)},$$

$$\hat{y} = C_{th} V_j \hat{T}.$$

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
Sequentieller Zugang

Bestimme reduzierte Subsysteme

$$\hat{E}_{th}^{(j)} \dot{\hat{T}} = \hat{A}_{th}^{(j)} \hat{T} + \hat{B}_{th}^{(j)} z^{(j)},$$

$$\hat{y} = \hat{C}_{th}^{(j)} \hat{T}.$$

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme

Sequentieller Zugang

Bestimme reduzierte Subsysteme

$$\hat{E}_{th}^{(j)} \dot{\hat{T}} = \hat{A}_{th}^{(j)} \hat{T} + \hat{B}_{th}^{(j)} z^{(j)},$$

$$\hat{y} = \hat{C}_{th}^{(j)} \hat{T}.$$

Ermittle aktuelle Deformation

$$A_{el} u = A_{thel} T.$$

- Man benötigt den vollen Temperaturvektor.
- Es ist lediglich der reduzierte Zustand \hat{T} bekannt.
 - Verwendung von $C_{th} = I_n$ ($p = n$) $\Rightarrow V_j \hat{T} = \hat{y} \approx y = T$
 - Prolongation ($T \approx V_j \hat{T}$) der reduzierten Daten ist notwendig.

MOR-Fehler

MOR+Prolongationsfehler

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme

Sequentielles Modell

Probleme:

- Das (Standard)-balancierte Abschneiden (BT) ist für $p = n$ nur bedingt anwendbar.
- Prolongation der reduzierten Daten ist fehlerbehaftet.
- Berechnung der Deformation anhand des vollen elastischen Systems (Dimension: $3n$).

Alternativer Lösungsweg:

- gekoppeltes System mit Temperatureingängen und Deformationsausgängen
- $C_{th} = I_n$ nicht notwendig \Rightarrow BT verwendbar (modifiziert)
- **Keine** Prolongation notwendig

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
 Gekoppeltes Modell

Betrachte jetzt

$$\begin{aligned} E_{th} \dot{T} &= A_{th}^{(j)} T + B_{th} z^{(j)}, \\ 0 &= A_{thel} T - A_{el} u, \\ y &= C_{el} u, \end{aligned}$$

 mit $E_{th}, A_{th}^{(j)} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_{th} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ und
 $A_{el} \in \mathbb{R}^{3n \times 3n}$, $A_{thel} \in \mathbb{R}^{3n \times n}$, $C_{el} \in \mathbb{R}^{p \times 3n}$.

$$\begin{bmatrix} E_{th} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T} \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{th}^{(j)} & 0 \\ A_{thel} & -A_{el} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{th} \\ 0 \end{bmatrix} z^{(j)} \quad (\text{DAE})$$

$$y = [0, \quad C_{el}] \begin{bmatrix} T \\ u \end{bmatrix}$$

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
 Gekoppeltes Modell

Betrachte jetzt

$$\begin{aligned} E_{th} \dot{T} &= A_{th}^{(j)} T + B_{th} z^{(j)}, \\ 0 &= A_{thel} T - A_{el} u, \\ y &= C_{el} u, \end{aligned}$$

Index-1 differentiell-algebraisches System

$$\begin{bmatrix} E_{th} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T} \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{th}^{(j)} & 0 \\ A_{thel} & -A_{el} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{th} \\ 0 \end{bmatrix} z^{(j)} \quad (\text{DAE})$$

$$y = [0, \quad C_{el}] \begin{bmatrix} T \\ u \end{bmatrix}$$

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
Gekoppeltes Modell

Betrachte jetzt

$$\begin{aligned} E_{th} \dot{T} &= A_{th}^{(j)} T + B_{th} z^{(j)}, \\ 0 &= A_{thel} T - A_{el} u, \\ y &= C_{el} u, \end{aligned}$$

mit $E_{th}, A_{th} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_{th} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ und
 $A_{el} \in \mathbb{R}^{3n \times 3n}$, $A_{thel} \in \mathbb{R}^{3n \times n}$, $C_{el} \in \mathbb{R}^{p \times 3n}$.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_{th} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{x} &= \begin{bmatrix} A_{th}^{(j)} & 0 \\ A_{thel} & -A_{el} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} B_{th} \\ 0 \end{bmatrix} z^{(j)} \\ y &= [0, \quad C_{el}] x \end{aligned} \quad (\text{DAE})$$

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
Gekoppeltes Modell

Betrachte jetzt

$$\begin{aligned} E_{th} \dot{T} &= A_{th}^{(j)} T + B_{th} z^{(j)}, \\ 0 &= A_{thel} T - A_{el} u, \\ y &= C_{el} u, \end{aligned}$$

mit $E_{th}, A_{th} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_{th} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ und
 $A_{el} \in \mathbb{R}^{3n \times 3n}$, $A_{thel} \in \mathbb{R}^{3n \times n}$, $C_{el} \in \mathbb{R}^{p \times 3n}$.

$$\begin{aligned} E \dot{x} &= A^{(j)} x + B z^{(j)} \\ y &= C x \end{aligned} \quad (\text{DAE})$$

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
MOR für allgemeine DAEs

Spektralprojektion-basiertes BT

z.B. [STYKEL '04]

Berechne Systemgramme als Lösung projizierter
Lyapunovgleichungen für alle j , d.h.,

- 1 zusätzliche Projektion auf die Unterräume zu endlichen bzw. unendlichen Eigenwerten $\lambda_f, \lambda_\infty$ von $\lambda E - A^{(j)}$ nötig,
- 2 es müssen Beobachtbarkeits- sowie Steuerbarkeitsgramme für λ_f und λ_∞ berechnet werden.

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
MOR für allgemeine DAEs

Spektralprojektion-basiertes BT

z.B. [STYKEL '04]

Berechne Systemgramme als Lösung projizierter
Lyapunovgleichungen für alle j , d.h.,

- 1 zusätzliche Projektion auf die Unterräume zu endlichen bzw. unendlichen Eigenwerten $\lambda_f, \lambda_\infty$ von $\lambda E - A^{(j)}$ nötig,
- 2 es müssen Beobachtbarkeits- sowie Steuerbarkeitsgramme für λ_f und λ_∞ berechnet werden.

BT für allgemeine DAEs

Berechne je 2 Beobachtbarkeits- und Steuerbarkeitsgramme der Dimension $n + 3n = 4n$ für jedes Subsystem j .

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
MOR für allgemeine DAEs

BT für allgemeine DAEs

Berechne je 2 Beobachtbarkeits- und Steuerbarkeitsgrmsche der Dimension $n + 3n = 4n$ für jedes Subsystem j .

MM für allgemeine DAEs

Bestimme Krylov-Unterraumbasen für Systeme der Dimension $4n$.

$$\begin{bmatrix} E_{th} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{x} = \begin{bmatrix} A_{th}^{(j)} & 0 \\ A_{thel} & -A_{el} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} B_{th} \\ 0 \end{bmatrix} z^{(j)} \quad (\text{DAE})$$

$$y = [0, \quad C_{el}] x$$

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
MOR für allgemeine DAEs

BT für allgemeine DAEs

Berechne je 2 Beobachtbarkeits- und Steuerbarkeitsgrmsche der Dimension $n + 3n = 4n$ für jedes Subsystem j .

MM für allgemeine DAEs

Bestimme Krylov-Unterraumbasen für Systeme der Dimension $4n$.

Kann man die spezielle Struktur ausnutzen?

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
MOR für Index-1 DAEs

Schur-Komplement-Darstellung [FREITAS/ROMMES/MARTINS '08]

$$E_{th} \dot{T} = A_{th}^{(j)} T + B_{th} z^{(j)}$$

$$0 = -C_{el} A_{el}^{-1} A_{el} u + C_{el} A_{el}^{-1} A_{thel} T$$

$$y = C_{el} u$$

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
MOR für Index-1 DAEs

Schur-Komplement-Darstellung [FREITAS/ROMMES/MARTINS '08]

$$E_{th} \dot{T} = A_{th}^{(j)} T + B_{th} z^{(j)}$$

$$C_{el} u = C_{el} A_{el}^{-1} A_{thel} T$$

$$y = C_{el} u$$

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
MOR für Index-1 DAEs

Schur-Komplement-Darstellung [FREITAS/ROMMES/MARTINS '08]

$$E_{th} \dot{T} = A_{th}^{(j)} T + B_{th} z^{(j)}$$
$$y = C_{el} A_{el}^{-1} A_{thel} T$$

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
MOR für Index-1 DAEs

Schur-Komplement-Darstellung [FREITAS/ROMMES/MARTINS '08]

$$E_{th} \dot{T} = A_{th}^{(j)} T + B_{th} z^{(j)}$$
$$y = \bar{C} T$$

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
MOR für Index-1 DAEs

Schur-Komplement-Darstellung [FREITAS/ROMMES/MARTINS '08]

$$E_{th} \dot{T} = A_{th}^{(j)} T + B_{th} z^{(j)}$$

$$y = \bar{C} T$$

Berechnung der reduzierten Modelle mittels BT:

Berechne die Systemgramme durch Lösen von

$$A_{th}^{(j)} P E_{th}^T + E_{th} P A_{th}^{(j)T} = -B_{th} B_{th}^T$$

$$A_{th}^{(j)T} Q E_{th} + E_{th}^T Q A_{th}^{(j)} = -\bar{C}^T \bar{C}$$

(Dimension: n)

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme
MOR für Index-1 DAEs

Schur-Komplement-Darstellung [FREITAS/ROMMES/MARTINS '08]

$$E_{th} \dot{T} = A_{th}^{(j)} T + B_{th} z^{(j)}$$

$$y = \bar{C} T$$

Berechnung der reduzierten Modelle mittels MM: (einseitig)

Bestimme Krylov-Unterraumbasis

$$V_i = (s_0 E_{th} - A_{th}^{(j)})^{-1} V_{i-1}, \quad i = 1, \dots, q$$

$$V = [V_1, \dots, V_q] \quad (\text{Gram-Schmidt})$$

für Systeme der Dimension n .

MOR für geschaltete, gekoppelte Systeme

MOR für Index-1 DAEs

Schur-Komplement-Darstellung [FREITAS/ROMMES/MARTINS '08]

$$E_{th} \dot{T} = A_{th}^{(j)} T + B_{th} z^{(j)}$$
$$y = \bar{C} T$$

① Berechne Projektionsmatrizen V_j, W_j für $j = 1, \dots, 11$.

② Offline Vorbereitung der reduzierten Matrizen

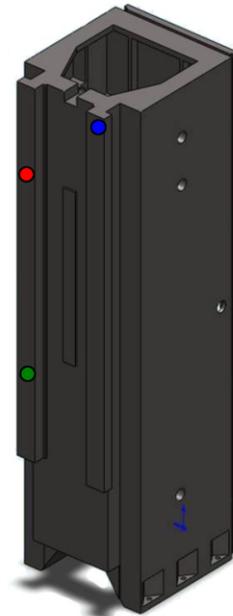
$$\hat{E}_j := W_j^T E_{th} V_j, \quad \hat{A}_j := W_j^T A_{th}^{(j)} V_j,$$
$$\hat{B}_j := W_j^T B_{th}, \quad \hat{C}_j := \bar{C} V_j.$$

③ Online-Schaltung zwischen den Systemen via $\alpha_j(t)$

Numerische Ergebnisse

Numerische Ergebnisse
Maschinenständer

- FEniCS FEM Semidiskretisierung
 - FGe: $n = 16626$
 - Temperatureingänge: $m = 20$
 - Ausgänge:
 - Sequentiell: $p = 9$
 - Gekoppelt: $p = 27$
- Simulation
 - vorgegebene Spindelstockbewegung
 - feste Einspannung im Fuß
 - Zeithorizont: $t \in [0, 16.5] [h]$
 - Zeitschritt: $\tau = 10 [s]$
 - Anfangstemperatur: $T_0 = 20 [^{\circ}C]$
 - Anfangsdeformation: $u_0 = 0 [\mu m]$



Numerische Ergebnisse
Vergleich

Simulationszeit des vollen gekoppelten Systems:
12910.68 [s] = 3.59 [h]

	Modelle		
	sequentielles BT	gekoppeltes BT	gekoppeltes MM
Red. Ord. r	100	60	60
Dimension	$r + 3n$	r	r
Zeit in [s]	1668.58 + 14.23 + 845.47	4312.0 + 11.95	125.05 + 16.57
Zeit ges. in [s]	2528.28	4323.95	141.62
Online-Zeit in [s]	859.7	11.95	16.57

Reduktion der Systeme, Simulation der red. Modelle, Deformationsberechnung

Numerische Ergebnisse
Vergleich

Simulationszeit des vollen gekoppelten Systems:

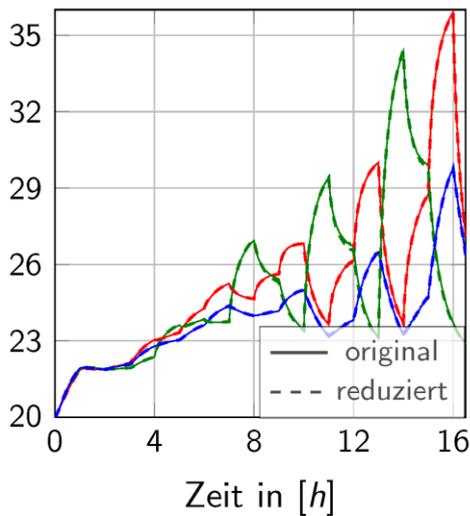
$$12910.68 [s] = 3.59 [h]$$

	Modelle		
	sequentielles BT	gekoppeltes BT	gekoppeltes MM
Red. Ord. r	100	60	60
Dimension	$r + 3n$	r	r
Zeit in [s]	1668.58 + 14.23 + 845.47	4312.0 + 11.95	125.05 + 16.57
Zeit ges. in [s]	2528.28	4323.95	141.62
Online-Zeit in [s]	859.7	11.95	16.57

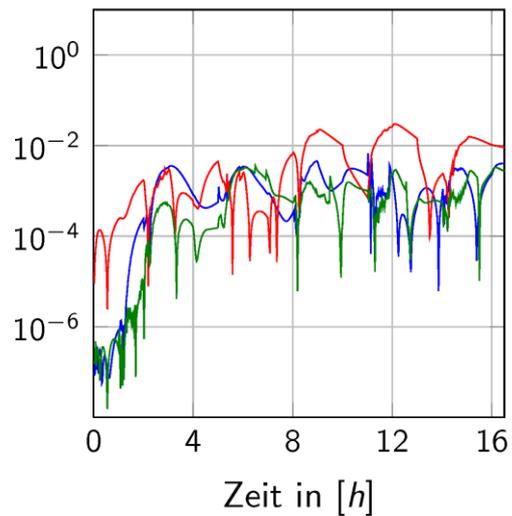
Reduktion der Systeme, Simulation der red. Modelle, Deformationsberechnung

Numerische Ergebnisse
Sequentielles Modell: BT

Temperaturkurven

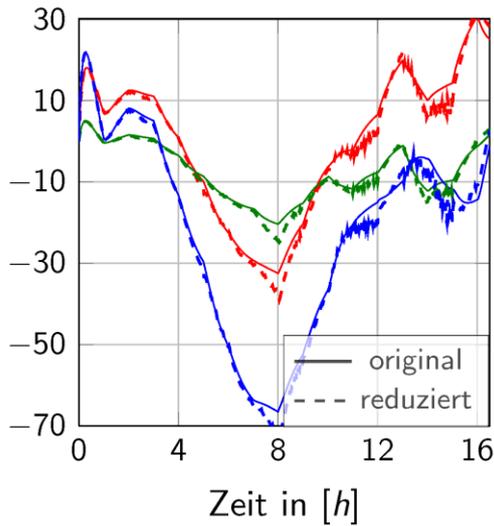


relativer Fehler

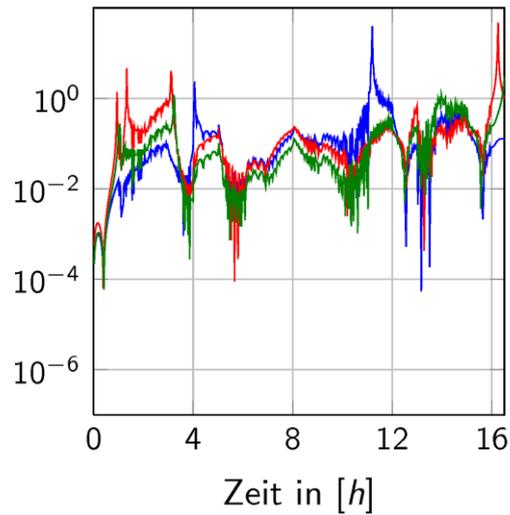


Numerische Ergebnisse
Sequentielles Modell: BT

Deformationskurven

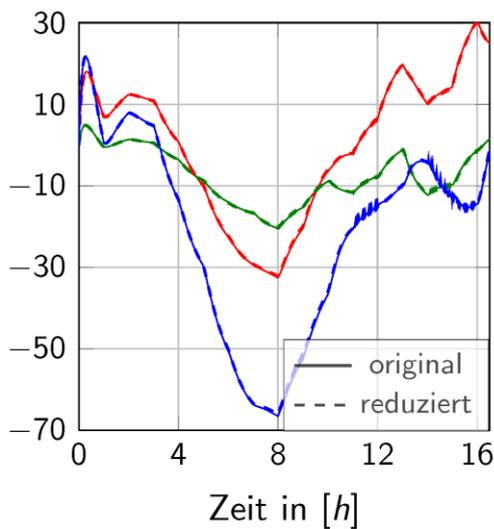


relativer Fehler

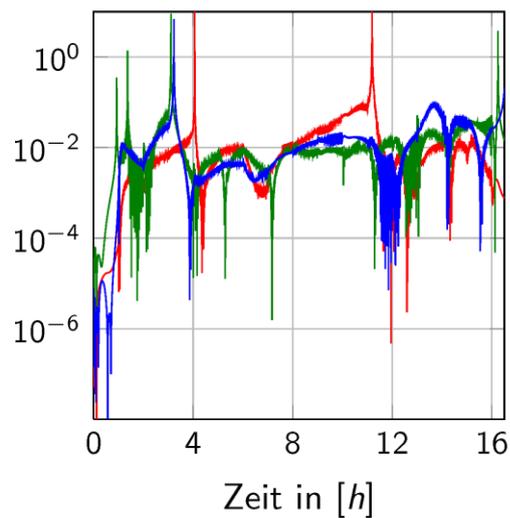


Numerische Ergebnisse
Gekoppeltes Modell: BT

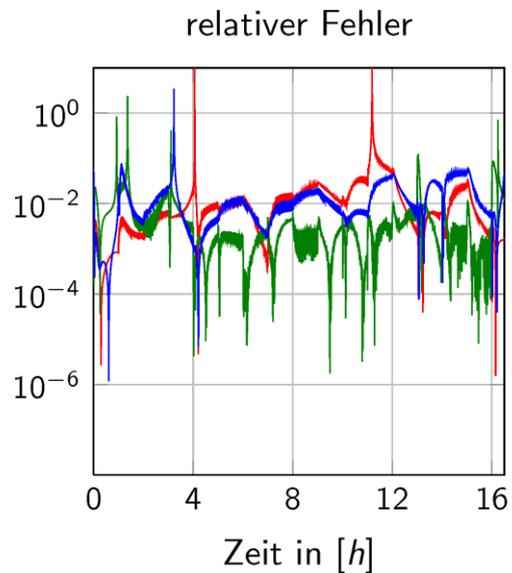
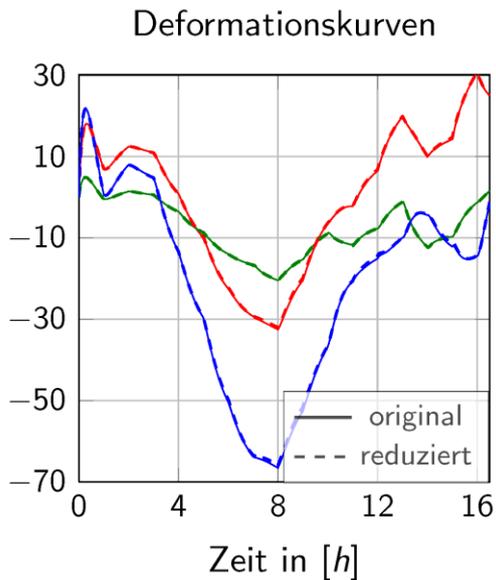
Deformationskurven



relativer Fehler

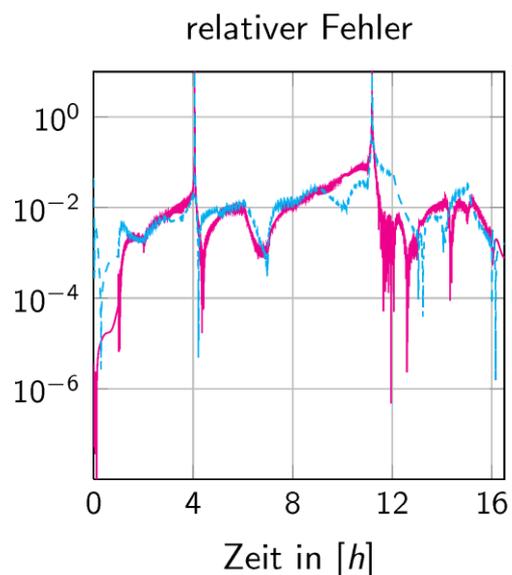
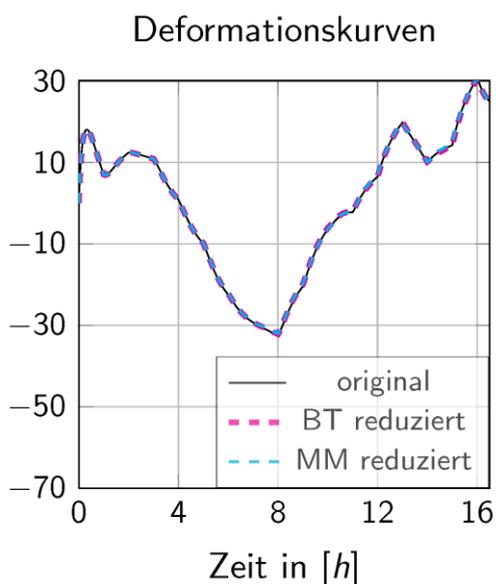


Numerische Ergebnisse
Gekoppeltes Modell: MM



Numerische Ergebnisse
Vergleich BT - MM

exemplarisch „roter“ Ausgang



Zusammenfassung & Ausblick

Zusammenfassung

- Überblick balanciertes Abschneiden (BT) und Momentenabgleich (MM)
- BT/MM für allgemeine DAE Systeme (Dimension $4n$)
- BT/MM für Index-1 Systeme via Schurkomplement (Dimension n)

Ausblick

- Erweiterung der Index-1 Systeme auf Parameterabhängigkeit
- Betrachtung von BT für linear zeitvariante (LTV) Systeme
- Lösen von Lyapunov Differentialgleichungen

Thermoelastische Simulation bewegter Baugruppen

A. Naumann, J. Wensch; Institut für wissenschaftliches Rechnen, TU Dresden

Die thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen erfordert die numerische Simulation von Temperaturfeldern über Zeiträume von vielen Stunden. Die Kenngröße Temperatur ändert sich dabei auf einer vergleichsweise langsamen Zeitskala, während die Bearbeitungsprozesse auf sehr kleinen Zeitskalen stattfinden. Zyklisch veränderliche Kontaktflächen zwischen Maschinenteilen führen zu oszillierenden Reibungsquelltermen, die in die Vorhersage des Temperaturfeldes eingehen.

Standard-Zeitintegrationsverfahren müssen eine Zeitschrittweite in der Größenordnung der kleinsten Zeitskala für eine ausreichende Genauigkeit verwenden. Alternativ kann über die Quellterme im zeitlichen Verlauf gemittelt werden - aber dies führt zu einem erheblichen Genauigkeitsverlust.

Wir entwickeln hier Zeitintegrationsverfahren, die zum einen Schrittweiten verwenden, die nicht von der kleinen Zeitskala diktiert sind, zum anderen deutlich genauere Resultate liefern als eine einfache Mittelung der Quellterme.

Basis ist die Technik des „stroboscopic averaging“. Sie bestimmt eine glatte Lösung, die in stroboskopischen Punkten mit der oszillierenden Lösung übereinstimmt. Die rechte Seite der der glatten Lösung zugrunde liegenden Differentialgleichung wird dabei durch Differenzenquotienten approximiert. Für mechanische Systeme wurde diese Methode bereits erfolgreich eingesetzt. Im Falle parabolischer Probleme ist sie jedoch zu ineffizient.

Im Rahmen des Teilprojektes A07 wurde die Technik des defect-corrected averaging entwickelt. Der bei einfacher Mittelung der Quellterme entstehende Defekt wird geeignet korrigiert. Die Korrektur erfordert die Lösung eines Gleichungssystems mit der Matrix-Exponentialfunktion. Eine formale Darstellung des Lösungsoperators mit der Exponentialabbildung wird zur iterativen Approximation der rechten Seite genutzt. Des Weiteren wird aus dieser Darstellung ein Vorkonditionierer entwickelt. Die Vorkonditionierung führt zu einem deutlichen Zeitgewinn bei der Approximation der Defektkorrektur.

Das glatte Ersatzproblem kann somit durch Standardzeitintegrationsverfahren mit einer großskaligen Schrittweite gelöst werden.

Kontakt

Dipl.-Math. Andreas Naumann

TU Dresden

Fachrichtung Mathematik

Institut für wiss. Rechnen

01062 Dresden

Tel.: 0351 – 463 35060

E-Mail: andreas.naumann@tu-dresden.de

Thermo-elastische Simulation bewegter Baugruppen

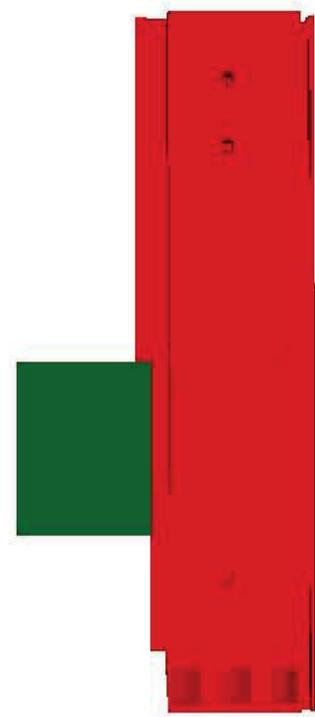
A. Gerisch, A. Naumann, J. Wensch

Institut für wiss. Rechnen, TU-Dresden

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

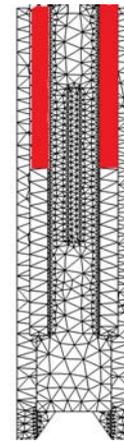
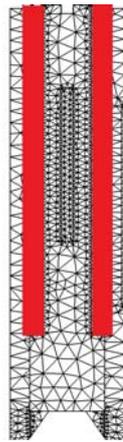
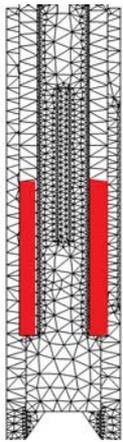
Wärmeleitung in gekoppelten Geometrien

- Grundgleichung: Wärmeleitung
- Wärmequellen: **Reibung**, Motoren, ...
- Verhältnismäßig langsame Wärmeleitung
- Bewegte Kopplungszone: Wärmeaustausch
- Sehr schnelle Bewegungen → kleine Perioden ε
- → kleine Schrittweiten in Kopplungszonen notwendig
- → Multirate Methoden kombinieren kleine und große Schrittweiten



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Bewegungsprofile



t	v [$\frac{m}{min}$]	ϵ [s]
1.h	2.5	12
4.h	5	6
7.h	10	3
10.h	15	2
13.h	20	1.5

t	v [$\frac{m}{min}$]	ϵ [s]
2.h	2.5	48
5.h	5	24
8.h	10	12
11.h	15	8
14.h	20	6

t	v [$\frac{m}{min}$]	ϵ [s]
3.h	2.5	12
6.h	5	6
9.h	10	3
12.h	15	2
15.h	20	1.5

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

PDE-System

Wärmeleitung:

$$\rho C_p \partial_t T - \lambda \Delta T = 0$$

$$\lambda \partial_n T = q(T, t)$$

- Parameter: Dichte ρ , Wärmekapazität C_p , Wärmeleitfähigkeit λ
- Reibung und Wärmeaustausch:
 $q_j(T, t) = g(\mathbf{v}, t) + \sum_i \alpha_{ij}(T_i - T_j)$
- FE-Diskretisierung $y_i(t) \approx T(t, \mathbf{x}_i)$ liefert ODE

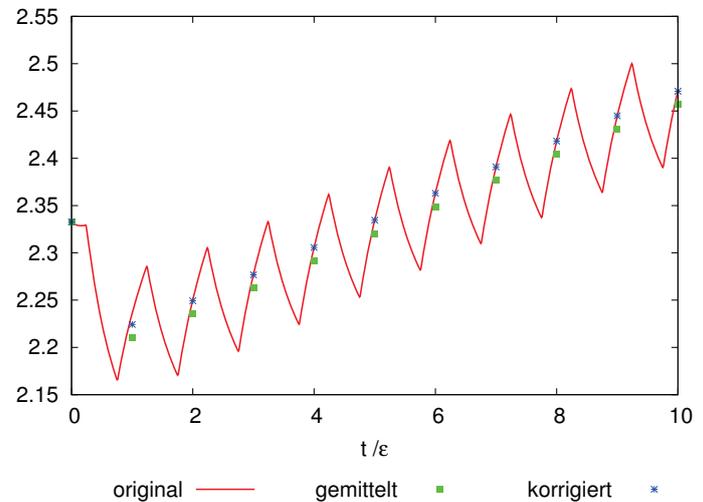
$$y' = f(y, t)$$

$$Cy' = -Ky + Q(t, \dots)$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Standardverfahren

- Standardverfahren: $\delta t \ll \varepsilon$
- Viele Gitterpunkte & Freiheitsgrade \Rightarrow sehr langsam
- Beschleunigung: Mittlere $Q(t)$
- \Rightarrow konstante Quelle & schnell lösbar
- Einfluss hochfrequenter Anteile vernachlässigt



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Defect corrected averaging

- Suche adäquate Approximation an F , bzw. Einfluss hochfrequenter Anteile
- Maßstab: Einfache Mittelung \rightarrow konstante RHS \rightarrow schnelle Simulation möglich
- Betrachte

$$Cy'(t) = -Ky(t) + \bar{Q} + Q_\varepsilon(t), \quad y(0) = y_0$$

- Idee: Approximiere Defekt $Q_\varepsilon(t)$ durch konstantes \tilde{Q}

$$Cy'(t) = -Ky(t) + \bar{Q} + \tilde{Q}$$

$$y(t) = S(t, y_0, \bar{g}) + S(t, 0, \tilde{Q})$$

$$S(\varepsilon, 0, \tilde{Q}) = S(\varepsilon, 0, Q_\varepsilon) \text{ linear in } \tilde{Q}$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

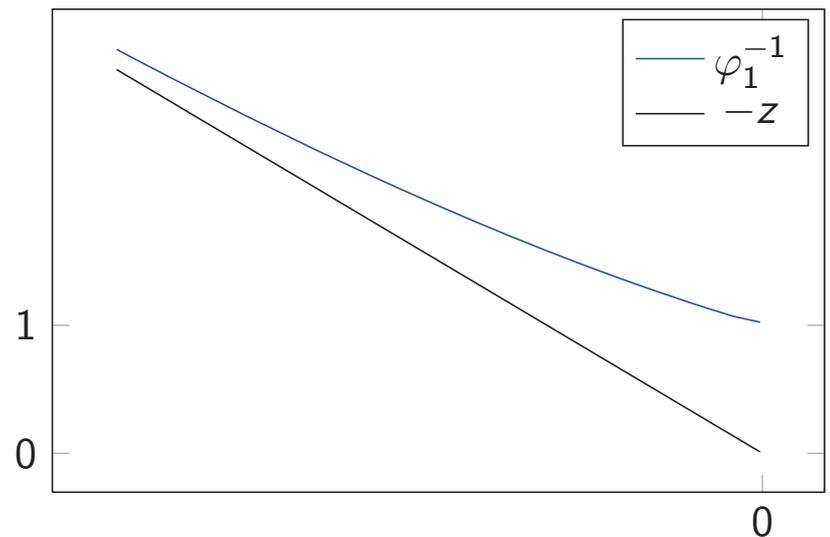
Vorkonditionierung

- Teilproblem: Suche $\tilde{Q}: S(\varepsilon, 0, \tilde{Q}) = S(\varepsilon, 0, Q_\varepsilon(t))$
- Lineares Problem $Bx = b$ mit unbekannter Matrix B
- Bekannt $Bx := S(\varepsilon, 0, x) \rightarrow$ iterativer Löser
- schlecht konditioniertes LGS \rightarrow viele Iterationen
- \rightarrow benötige Vorkonditionierer
- $S(\varepsilon, 0, \tilde{Q}) \approx \underbrace{\frac{e^L - I}{L}}_{\varphi_1(L)} \tilde{Q}$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

- Mit $A = \varphi_1(L) = \frac{e^L - I}{L}$ approximiere A^{-1} :

$$P \approx \varphi_1(L)^{-1} \approx -L$$



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

- Mit $A = \varphi_1(L) = \frac{e^L - 1}{L}$ approximiere A^{-1} :

$$P \approx \varphi_1(L)^{-1} \approx -L$$

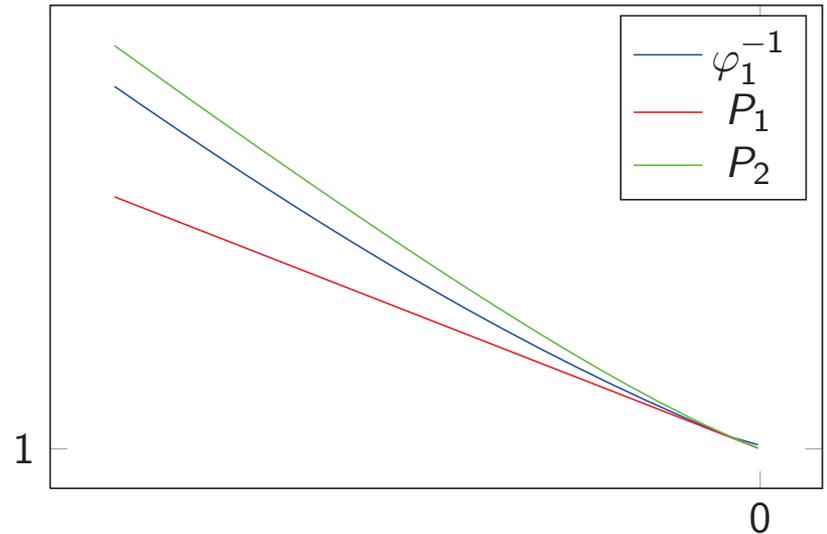
- Unter Bedingungen:

$$P(0) = \varphi_1^{-1}(0)$$

$$P'(0) = \varphi_1^{-1'}(0)$$

$$P_1 = I - \frac{1}{2}L$$

$$P_2 = \frac{L^2 - 2L + 2I}{2I - L}$$



δx	1/10	1/50	1/100	1/200
none	6	14	26	54
P_2	4	7	8	8

GMRES Iterationen

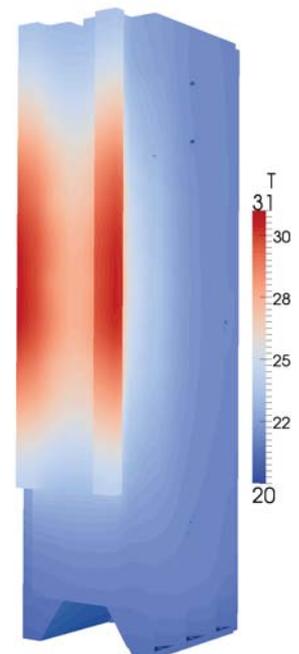
Ergebnisse

Zusammenfassung des Verfahrens:

- Löse eine Periode auf: $b = S(\varepsilon, 0, \tilde{Q}) = S(\varepsilon, 0, Q_\varepsilon)$
- Löse lineares Problem $\tilde{Q} = \text{gmres}(S(\varepsilon, 0, \cdot), b, P_2)$
- Löse Ersatzproblem $Cy_t = -Ky + \bar{Q} + \tilde{Q}$ mit $\delta t \gg \varepsilon$
- Bestimme Verschiebungen $U(t)$ aus Elastizität & $T(t)$

Methode	err(T)	err(U)	Zeit [s]
direkt	-	-	36000
Mittelung	4 %	1.8%	457
Defekt Korr.	0.5%	0.2%	1366

Lösung bei t=15h



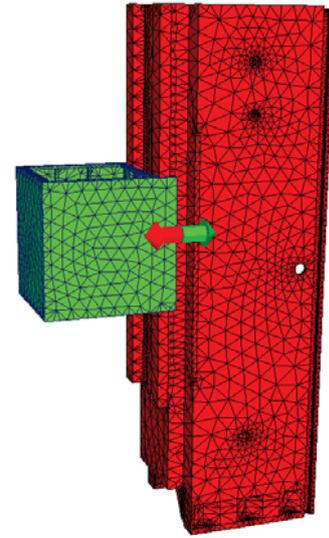
Kopplung der Baugruppen

$$\rho C_p \partial_t T^S - \lambda \Delta T^S = 0$$

$$\lambda \partial_n T^S = g(t, x) + \alpha(T^{SS} - T^S)$$

$$\rho C_p \partial_t T^{SS} - \lambda \Delta T^{SS} = 0$$

$$\lambda \partial_n T^{SS} = g(t, x) + \alpha(T^S - T^{SS})$$



FE-Diskretisierung → ODE:

$$\begin{pmatrix} C^S & 0 \\ 0 & C^{SS} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}^S \\ \dot{T}^{SS} \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} K^S + A(t) & -A(t) \\ -A(t) & K^{SS} + A(t) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T^S \\ T^{SS} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Q^S(t) \\ Q^{SS} \end{pmatrix}$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Lösung der ODE

$$\begin{pmatrix} C^S & 0 \\ 0 & C^{SS} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}^S \\ \dot{T}^{SS} \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} K^S + A(t) & -A(t) \\ -A(t) & K^{SS} + A(t) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T^S \\ T^{SS} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Q^S(t) \\ Q^{SS} \end{pmatrix}$$

- erfordert in jedem Zeitschritt
 - Assemblierung $A(t)$ → teuer, da unterschiedliche Gitter
 - Zerlegung zweier Lin.Gls.
- Viele Perioden → Lösungszeit von Tagen

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Angepasstes Verfahren

Nutze Eigenschaften des Problems:

- Austauschmatrix $A(t)$ periodisch: $A(t + \varepsilon) = A(t)$
- Quellterm $Q^S(t)$ periodisch: $Q^S(t + \varepsilon) = Q^S(t)$

analog zu kopplungsfreier Modellierung:

- Suche Ersatzproblem mit konstanter Quelle Q_c und konstanter Matrix A_c , so dass Lösung $[T_c^S, T_c^{SS}]$ von

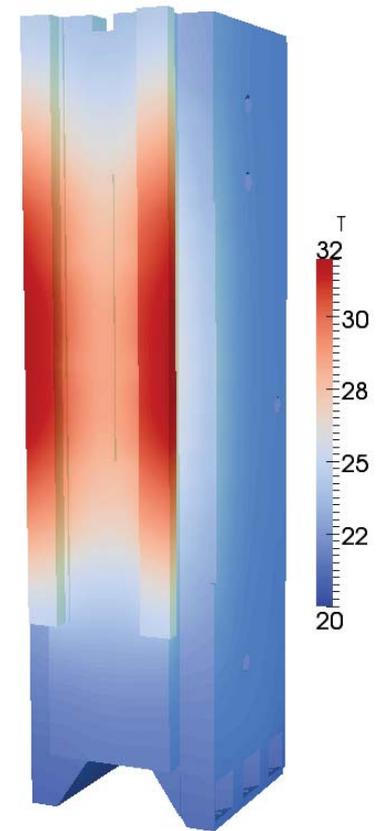
$$\begin{pmatrix} C^S & 0 \\ 0 & C^{SS} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_c^S \\ T_c^{SS} \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} K^S + A_c & -A_c \\ -A_c & K^{SS} + A_c \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T_c^S \\ T_c^{SS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_c^S \\ Q_c^{SS} \end{bmatrix}$$

für $t = N\varepsilon$ mit $[T^S, T^{SS}]$ übereinstimmt.

Angepasstes Verfahren

- Wähle $A_c = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^\varepsilon A(\tau) d\tau$
- Vergleich der Lösungen bei $t = N\varepsilon$
- \rightarrow Bedingung für Q_c : $S(\varepsilon, 0, Q_c; A_c) = S(\varepsilon, 0, Q(t); A(t))$
- Vorkonditionierer wie vorher, ersetze L mit $K + A_c$
- Löse Ersatzproblem mit konstanter Quelle $\delta t \gg \varepsilon$

Lösung bei $t=15h$



- originales Problem: $\delta t = \varepsilon/20, \approx 5d$
- Ersatzproblem mit konstanten Quellen:
 - Bestimmung der 15 Ersatzquellen: $\approx 15 \times 4min$
 - Lösen der Ersatzprobleme: $15 \times 1min$
- Fehler der Lösung: $< 1\%$
- ca. 1K höhere Erwärmung mit Kopplung

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Zusammenfassung & Ausblick

- Kopplung der Temperaturfelder verschiedener Baugruppen
- Schnelle Zeitintegrationsmethode für periodische Probleme
- → 10fach schnellere Lösung & deutlich genauer
- Erweiterung mit paralleler Zeitintegrationsmethoden

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Optimale Platzierung von Temperatursensoren zur Bestimmung von Verlagerungen am TCP

R. Herzog, I. Riedel; Arbeitsgruppe Numerische Mathematik (Partielle Differenzialgleichungen), TU Chemnitz

Ziel ist die Entwicklung von Korrekturverfahren für thermisch belastete Werkzeugmaschinen, bei denen anhand von Temperaturmessungen an der Maschine die Verlagerung des Tool Center Points (TCP) berechnet bzw. geschätzt und entsprechend korrigiert werden soll. Dabei ist es sehr wichtig, an welchen Positionen der Maschine Sensoren zur Temperaturmessung platziert werden, um möglichst genaue und robuste Schätzungen für die TCP-Verlagerung zu erhalten.

Am Beispiel eines Maschinenständers sollen für vorgegebene Betriebsbedingungen die optimalen Positionen möglichst weniger Temperatursensoren auf der Oberfläche des Bauteils bestimmt werden, die eine genaue und robuste Schätzung der TCP-Verlagerung gewährleisten.

Mittels eines Verfahrens der Modellordnungsreduktion werden auf Simulationsbasis die relevanten Temperaturverteilungen, die in der Maschine für vorgegebene Betriebsbedingungen auftreten können, berechnet. Diese dienen zur Rekonstruktion des Temperaturfeldes der Maschine aus den Messwerten der Temperatursensoren und damit auch der Berechnung bzw. Schätzung der durch dieses Temperaturfeld induzierten Verlagerung am TCP.

Die Güte des resultierenden online-fähigen Schätzers für die TCP-Verlagerung aus Temperaturmessungen hängt wesentlich von der Platzierung der Temperatursensoren ab. Durch Optimierung gewisser Eigenschaften der Kovarianz des Schätzers können geeignete Positionen für die Sensoren gefunden werden.

Im Vortrag werden das beschriebene Verfahren näher vorgestellt und numerische Ergebnisse zur Positionierung der Sensoren und der Güte des resultierenden Schätzers präsentiert.

Kontakt:

Prof. Dr. Roland Herzog

Arbeitsgruppe Numerische Mathematik (Partielle Differenzialgleichungen), TU Chemnitz

Tel.: 0371- 531 22530

E-Mail: roland.herzog@mathematik.tu-chemnitz.de

Dipl.-Math. techn. Ilka Riedel

Tel.: 0371 – 531 32624

E-Mail: ilka.riedel@mathematik.tu-chemnitz.de

30. Oktober 2013

Optimale Platzierung von Temperatursensoren zur Bestimmung von Verlagerungen am TCP (B05)

R. Herzog I. Riedel

Professur Numerische Mathematik, TU Chemnitz (B05)

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Vorgehensweise bei der Optimierung
- 3 Numerische Ergebnisse
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Problemstellung

Optimale Platzierung von Temperatursensoren zur onlinefähigen Bestimmung der Verlagerung des TCP

Vorgaben:

- nur wenige Temperatursensoren
- Platzierung nur an der Oberfläche

Verwendungsmöglichkeiten:

- direkte Vorhersage der TCP-Verlagerung
- Bestimmung von Eingangsgrößen für ein Kennfeld

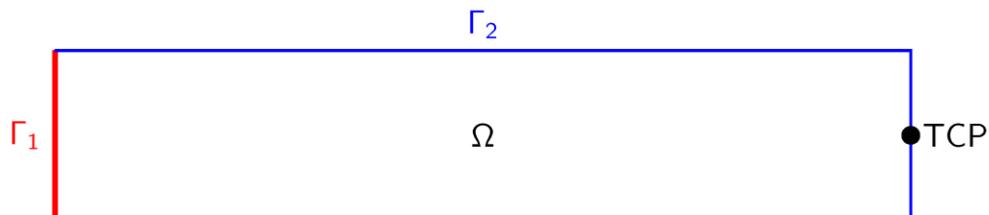


Maschinenständer Auerbach ACW 630

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Warum Optimierung der Sensorpositionen?

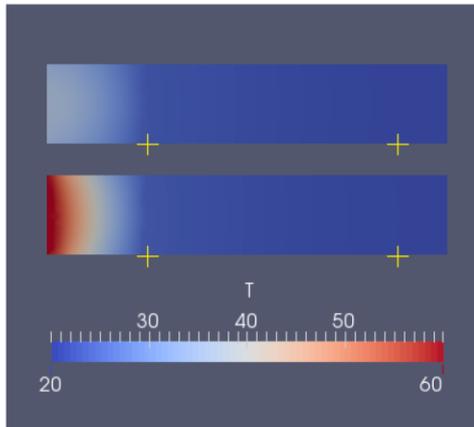
Beispiel:



- Thermoelastizität auf Ω
- Wärmeeintrag und feste Einspannung auf Γ_1
- Konvektionsrandbedingungen auf Γ_2
- betrachten Verschiebung am TCP

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

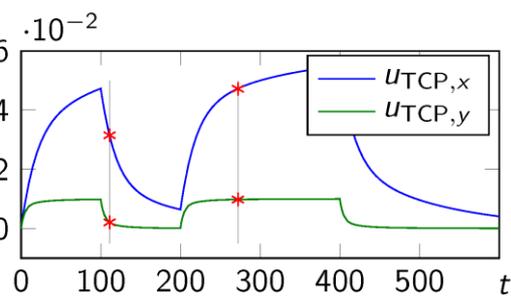
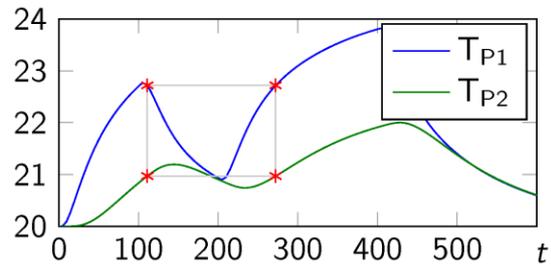
Warum Optimierung der Sensorpositionen?



$$T(x_1, t_1) = T(x_1, t_2) = 22.72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T(x_2, t_1) = T(x_2, t_2) = 20.97 \text{ } ^\circ\text{C}$$

aber: $u_{TCP}(t_1) \neq u_{TCP}(t_2)$



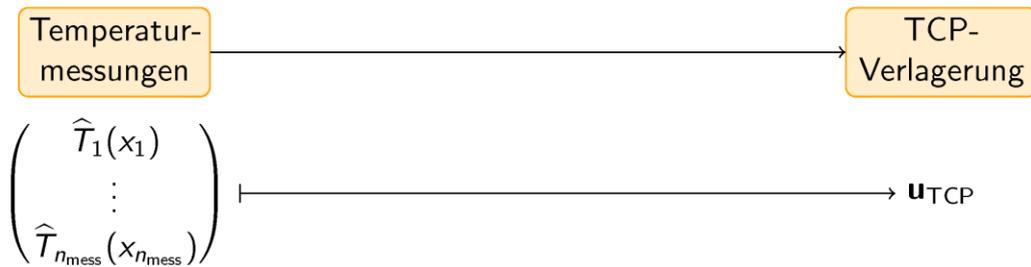
SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Vorgehensweise bei der Optimierung
 - Rekonstruktion des Temperaturfeldes
 - Schätzung der TCP-Verlagerung
 - Optimierung der Güte des Schätzers
- 3 Numerische Ergebnisse
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

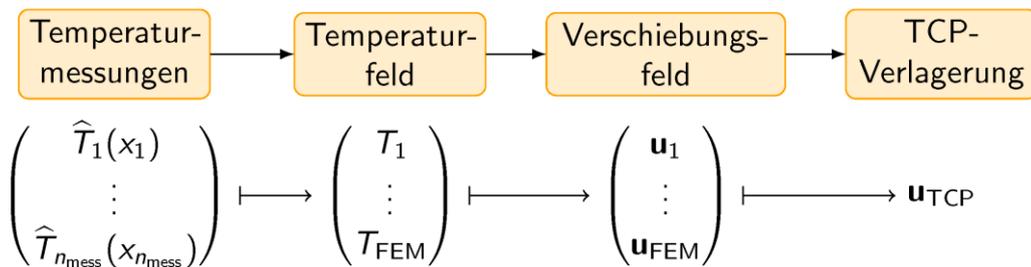
SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Vorgehensweise



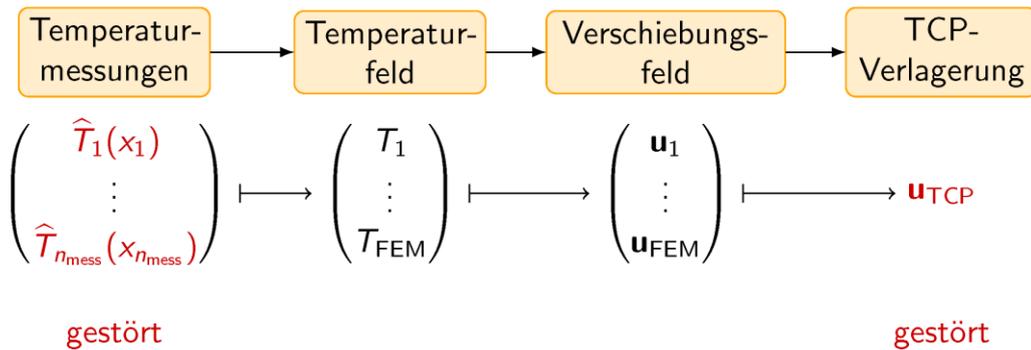
SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Vorgehensweise



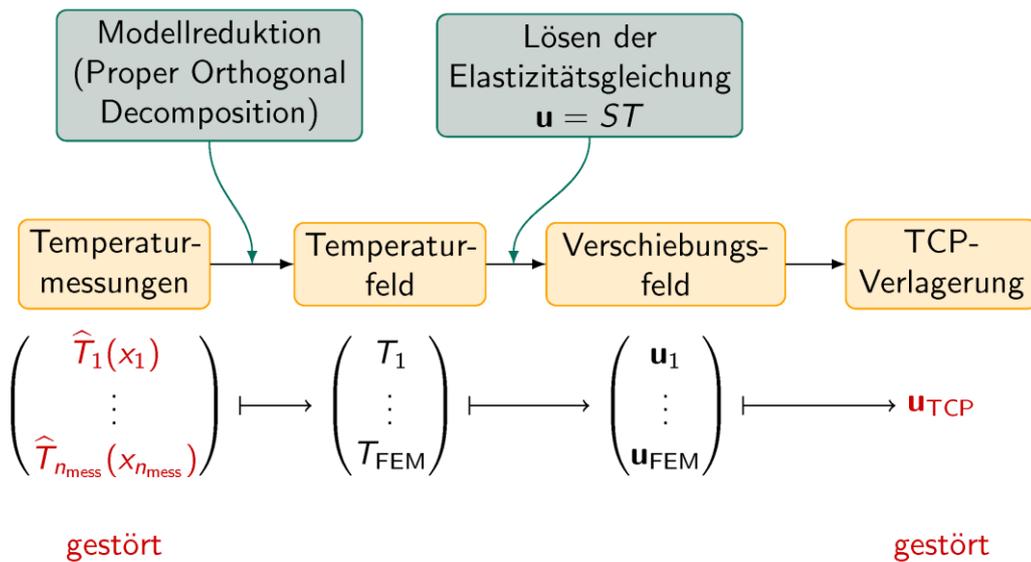
SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Vorgehensweise



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Vorgehensweise



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Proper Orthogonal Decomposition (POD)

POD-Aufgabe

Finde $\varphi_1, \dots, \varphi_{n_{\text{POD}}}$ mit $\langle \varphi_i, \varphi_j \rangle_W = \delta_{ij}$ so, dass

$$\sum_{j=1}^{n_{\text{snap}}} \left\| y_j - \sum_{i=1}^{n_{\text{POD}}} \langle y_j, \varphi_i \rangle_W \varphi_i \right\|_W^2$$

minimal wird.

- Löse Eigenwertproblem

$$W Y Y^T W \varphi_i = \lambda W \varphi_i$$

mit $Y = [y_1, \dots, y_{n_{\text{snap}}}]$ und W Massenmatrix.

- Die ersten n_{POD} Eigenvektoren φ_i sind die Lösung des obigen Minimierungsproblems.

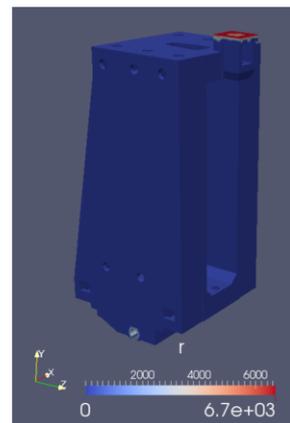
SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

POD am Beispiel ACW630

Wärmeleitungsgleichung

$$\begin{aligned} \rho c_p \dot{T} - \text{div}(\lambda \nabla T) &= 0 & \text{in } \Omega \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha (T - T_{\text{ref}}) &= r & \text{on } \Gamma = \partial\Omega \end{aligned}$$

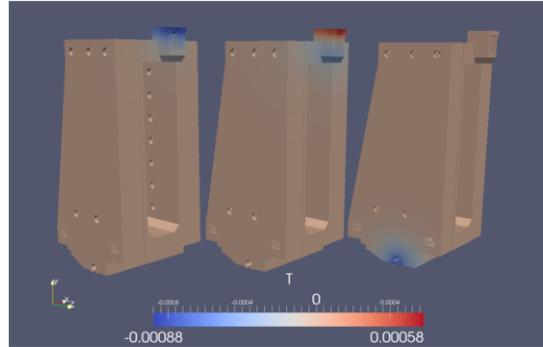
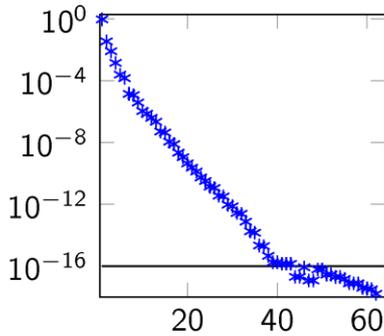
$\rho = 7250 \text{ kg/m}^3$	Dichte
$c_p = 500 \text{ J/(kg K)}$	spez. Wärmekapazität
$\lambda = 46.8 \text{ W/(m K)}$	Wärmeleitfähigkeit
$\alpha = 5 \dots 12 \text{ W/(K m}^2\text{)}$	Wärmeübergangskoeff.
$T_{\text{ref}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	Umgebungstemperatur



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

POD am Beispiel ACW630

Abklingverhalten $\lambda_i / \sum \lambda_i$



Abbruchkriterium:

$$\frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{POD}}} \lambda_i}{\sum_{i=1}^{n_{\text{snap}}} \lambda_i} \approx 1$$

n_{POD}	1	2	3	4	5
$\sum_{i=1}^{n_{\text{POD}}} \lambda_i$	0.9542	0.9899	0.9981	0.9995	0.9998

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Rekonstruktion des Temperaturfeldes

Kleinste-Quadrate-Problem

$$\min \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n_{\text{meas}}} \left[T_{\text{ref}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{POD}}} \zeta_i \varphi_i(x_j) - \hat{T}_j(x_j) \right]^2, \quad \zeta \in \mathbb{R}^{n_{\text{meas}}}$$

- Lösung der Normalgleichung

$$J^T J \zeta = J^T (\hat{T} - T_{\text{ref}})$$

mit

$$J = \begin{bmatrix} \varphi_1(x_1) & \cdots & \varphi_{n_{\text{POD}}}(x_1) \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi_1(x_{n_{\text{meas}}}) & \cdots & \varphi_{n_{\text{POD}}}(x_{n_{\text{meas}}}) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n_{\text{meas}} \times n_{\text{POD}}}$$

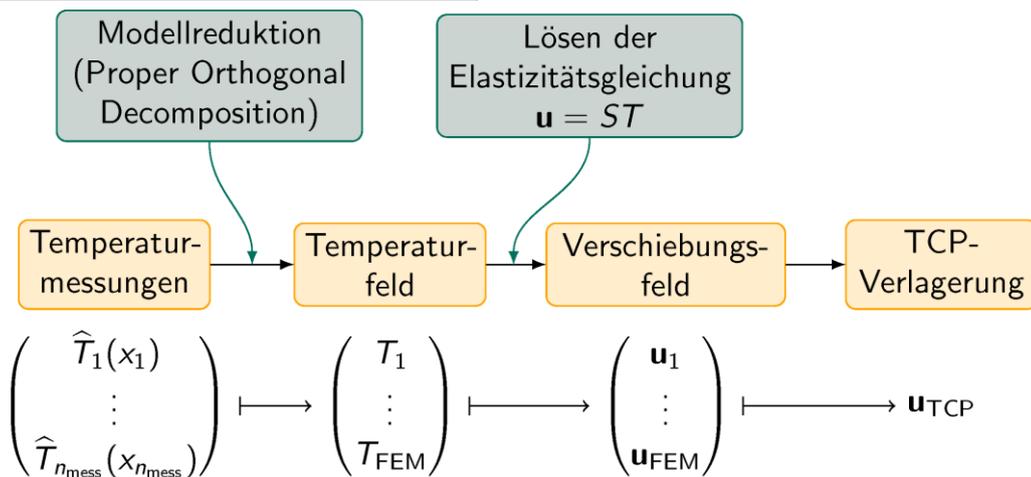
SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Vorgehensweise bei der Optimierung
 - Rekonstruktion des Temperaturfeldes
 - Schätzung der TCP-Verlagerung
 - Optimierung der Güte des Schätzers
- 3 Numerische Ergebnisse
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

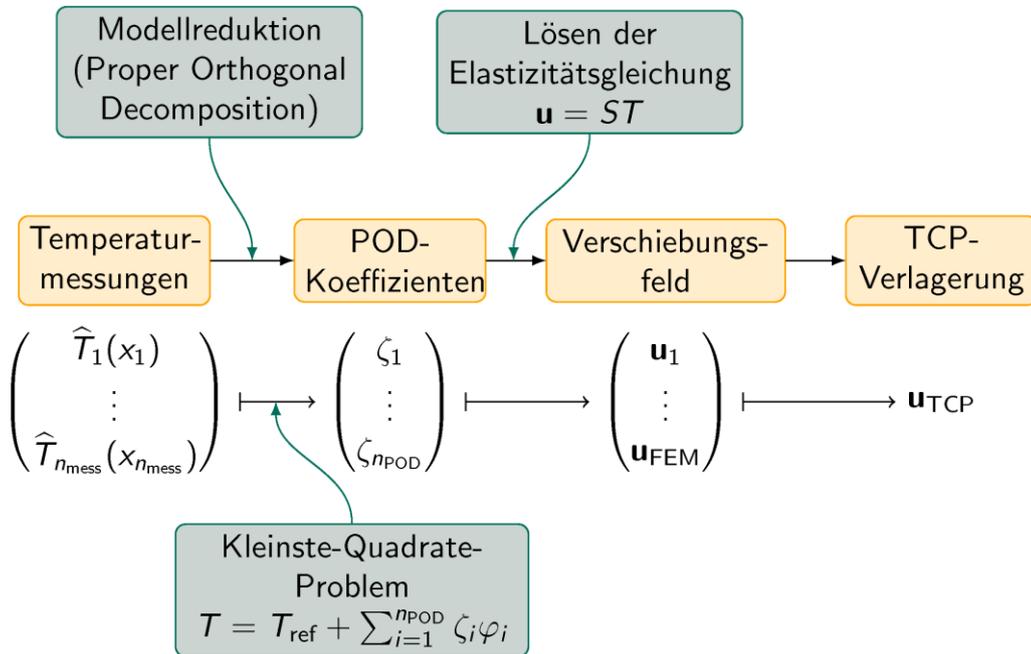
SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Schätzung der TCP-Verlagerung



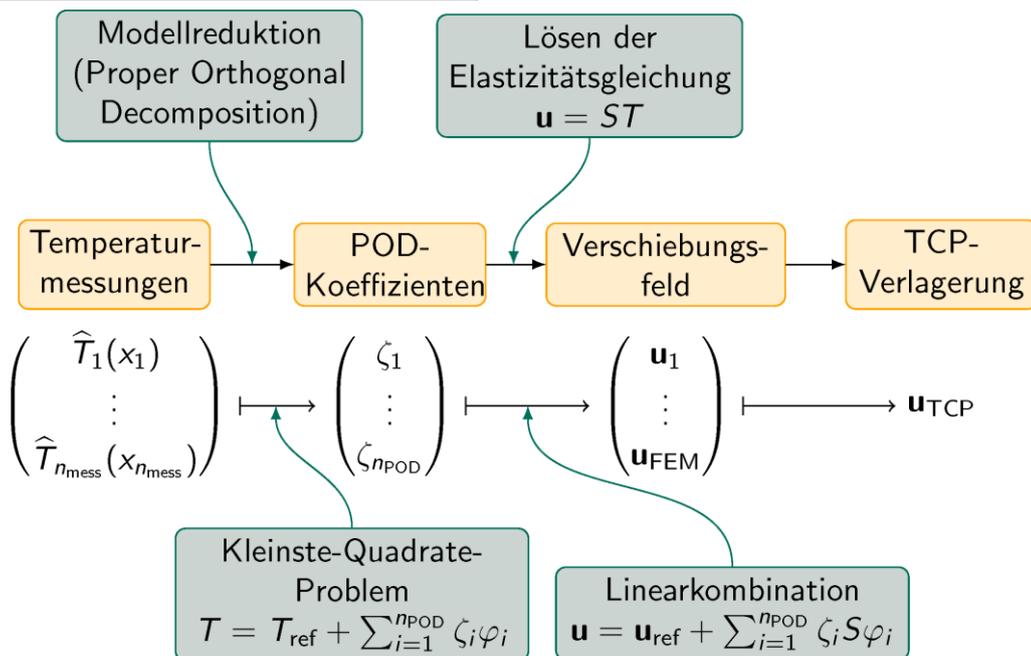
SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Schätzung der TCP-Verlagerung



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Schätzung der TCP-Verlagerung



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Schätzung der TCP-Verlagerung

Wir erhalten insgesamt einen **linearen Schätzer** für die Verlagerung am TCP:

$$\begin{aligned} T - T_{\text{ref}} &= \Phi \zeta = \sum_{j=1}^{n_{\text{POD}}} \zeta_j \varphi_j \\ &= \Phi (J^T J)^{-1} J^T (\hat{T} - T_{\text{ref}}) \end{aligned}$$

$$\Phi = [\varphi_1, \dots, \varphi_{n_{\text{POD}}}]$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Schätzung der TCP-Verlagerung

Wir erhalten insgesamt einen **linearen Schätzer** für die Verlagerung am TCP:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} - \mathbf{u}_{\text{ref}} &= S(T - T_{\text{ref}}) = S\Phi \zeta = \sum_{j=1}^{n_{\text{POD}}} \zeta_j S\varphi_j \\ &= S\Phi (J^T J)^{-1} J^T (\hat{T} - T_{\text{ref}}) \end{aligned}$$

$$\Phi = [\varphi_1, \dots, \varphi_{n_{\text{POD}}}]$$

S = Lösen der Elastizitätsgleichung

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Schätzung der TCP-Verlagerung

Wir erhalten insgesamt einen **linearen Schätzer** für die Verlagerung am TCP:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= S(T - T_{\text{ref}}) = S\Phi\zeta = \sum_{j=1}^{n_{\text{POD}}} \zeta_j S\varphi_j \\ &= S\Phi(J^T J)^{-1} J^T (\hat{T} - T_{\text{ref}}) \end{aligned}$$

$$\Phi = [\varphi_1, \dots, \varphi_{n_{\text{POD}}}]$$

S = Lösen der Elastizitätsgleichung

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Schätzung der TCP-Verlagerung

Wir erhalten insgesamt einen **linearen Schätzer** für die Verlagerung am TCP:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{\text{TCP}} = B\mathbf{u} &= BS(T - T_{\text{ref}}) = BS\Phi\zeta = \sum_{j=1}^{n_{\text{POD}}} \zeta_j BS\varphi_j \\ &= BS\Phi(J^T J)^{-1} J^T (\hat{T} - T_{\text{ref}}) \end{aligned}$$

$$\Phi = [\varphi_1, \dots, \varphi_{n_{\text{POD}}}]$$

S = Lösen der Elastizitätsgleichung

B = Auslesen der TCP-Verlagerung aus Verlagerungsfeld

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Schätzung der TCP-Verlagerung

Wir erhalten insgesamt einen **linearen Schätzer** für die Verlagerung am TCP:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{\text{TCP}} = B\mathbf{u} &= BS(T - T_{\text{ref}}) = BS\Phi\zeta = \sum_{j=1}^{n_{\text{POD}}} \zeta_j BS\varphi_j \\ &= BS\Phi(J(\mathbf{x})^\top J(\mathbf{x}))^{-1} J(\mathbf{x})^\top (\hat{T} - T_{\text{ref}}) \\ \Rightarrow \mathbf{u}_{\text{TCP}} &= A(\mathbf{x})(\hat{T} - T_{\text{ref}}) \end{aligned}$$

$$\Phi = [\varphi_1, \dots, \varphi_{n_{\text{POD}}}]$$

S = Lösen der Elastizitätsgleichung

B = Auslesen der TCP-Verlagerung aus Verlagerungsfeld

$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_{n_{\text{meas}}}]$... Sensorpositionen

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Vorgehensweise bei der Optimierung
 - Rekonstruktion des Temperaturfeldes
 - Schätzung der TCP-Verlagerung
 - Optimierung der Güte des Schätzers
- 3 Numerische Ergebnisse
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Bewertung der Güte des Schätzers

Informationsfunktion

Die Güte des Schätzers lässt sich über die Eigenwerte seiner Kovarianzmatrix C beurteilen. Es gibt verschiedene Kriterien:

$$\Psi_E(C) = \lambda_{\max}(C)$$

$$\Psi_A(C) = \text{trace}(C)$$

$$\Psi_D(C) = \det(C)$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Bewertung der Güte des Schätzers

Informationsfunktion

Die Güte des Schätzers lässt sich über die Eigenwerte seiner Kovarianzmatrix C beurteilen. Es gibt verschiedene Kriterien:

$$\Psi_E(C) = \lambda_{\max}(C)$$

$$\Psi_A(C) = \text{trace}(C)$$

$$\Psi_D(C) = \det(C)$$

Schätzer:

$$u_{\text{TCP}} = A(x)(\hat{T} - T_{\text{ref}})$$

Kovarianz:

$$\begin{aligned} C(x) &= A(x)A(x)^{\top} \\ &= BS\Phi(J(x)^{\top}J(x))^{-1}\Phi^{\top}S^{\top}B^{\top} \end{aligned}$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Optimale Sensorpositionen

Optimierungsproblem

Löse

$$\min_{x_1, \dots, x_{n_{\text{meas}}}} \lambda_{\max}(C(x))$$

mit $x_1, \dots, x_{n_{\text{meas}}} \in \Gamma$.

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Optimale Sensorpositionen

Optimierungsproblem

Löse

$$\min_{x_1, \dots, x_{n_{\text{meas}}}} \lambda_{\max}(C(x))$$

mit $x_1, \dots, x_{n_{\text{meas}}} \in \Gamma_{\text{FE}}$.

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Optimale Sensorpositionen

Optimierungsproblem

Löse

$$\min_{x_1, \dots, x_{n_{\text{meas}}}} \lambda_{\max}(C(x))$$

mit $x_1, \dots, x_{n_{\text{meas}}} \in \Gamma_{\text{FE}}$.

Die gleichzeitige Optimierung von n_{meas} Sensorpositionen ist sehr rechenaufwändig. Wir platzieren deswegen die Sensoren nacheinander.

Sequentielle Platzierung

$i = 1$

repeat

$\min_{x_i \in \Gamma_{\text{FE}}} \lambda_{\max}(C_i(x_i))$ {bisherige Sensorpositionen bleiben fest}

$i = i + 1$

until $i \geq n_{\text{POD}}$ und $\lambda_{\max} \leq \text{tol}$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

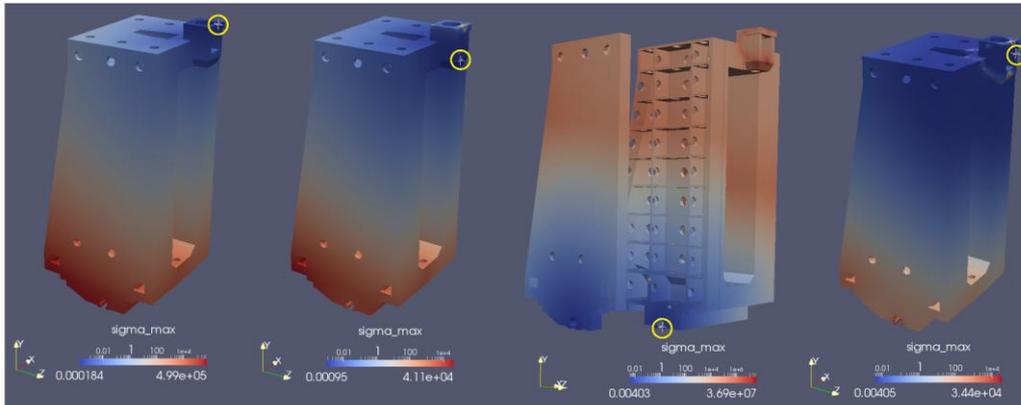
Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Vorgehensweise bei der Optimierung
 - Rekonstruktion des Temperaturfeldes
 - Schätzung der TCP-Verlagerung
 - Optimierung der Güte des Schätzers
- 3 Numerische Ergebnisse
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Optimale Sensorpositionen am Beispiel ACW630

- feste Einspannung an der Spindelmutter
- Einspannung in y- und z-Richtung an den Führungswagen des Ständers
- $n_{FE} \approx 25000$
- $n_{POD} = 5$
- $n_{meas} = 6$

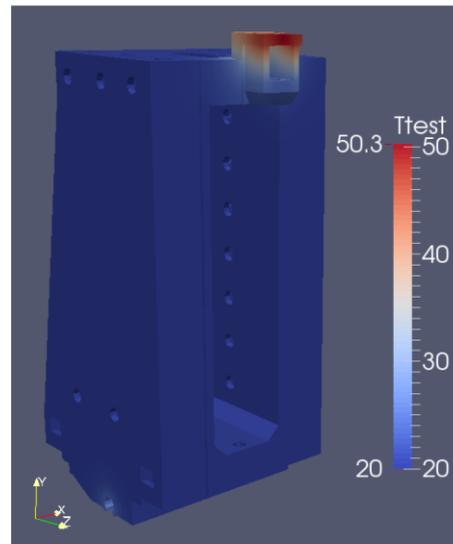


Optimierte Positionen für die ersten 4 Sensoren

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

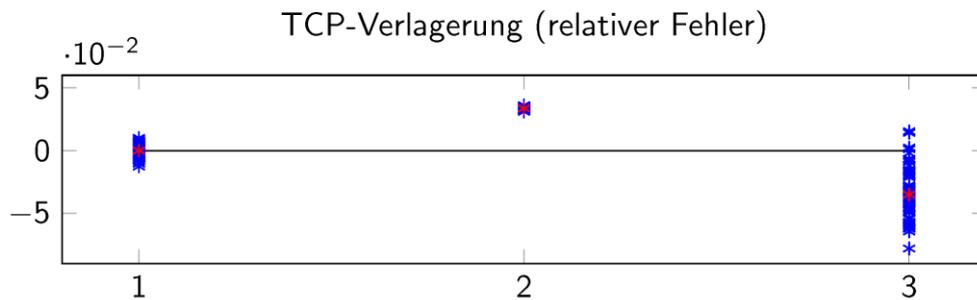
Tests zur Güte des Schätzers

- Simulation mit veränderten Randdaten (Wärmequellen)
- Snapshot als Test-Temperaturfeld T_{test}
- T_{test} nicht im POD-Raum enthalten
- normalverteilte Störung von T_{test} mit $3\sigma = 0.1$ K, d. h. 99.73% der Messungen liegen innerhalb von ± 0.1 K des echten Wertes



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

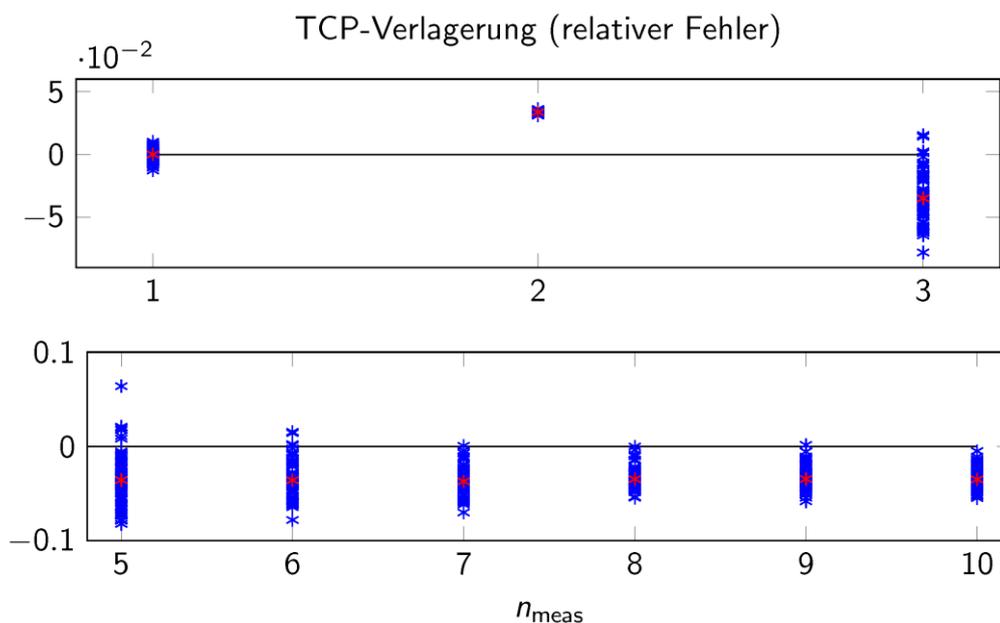
Test mit verrauschten Messungen



- 1 exakte Berechnung der TCP-Verlagerung ohne Modellreduktion (unpraktikabel)
- 2 Modellreduktion und Nutzung aller FE-Knoten als Messpunkte (unpraktikabel)
- 3 Modellreduktion und Nutzung der ersten 6 optimierten Sensorpositionen als Messpunkte

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Test mit verrauschten Messungen



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Vorgehensweise bei der Optimierung
 - Rekonstruktion des Temperaturfeldes
 - Schätzung der TCP-Verlagerung
 - Optimierung der Güte des Schätzers
- 3 Numerische Ergebnisse
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- optimale Sensorpositionen und online-fähiges Schätzverfahren zur Vorhersage der Verlagerung des TCP aus Temperaturmessungen
- POD-Modellreduktion und sequentielle Platzierung zur Reduktion des Rechenaufwandes

Ausblick

- Vergleich mit Messwerten (Kooperation mit B01)
- Test eines anderen Modellreduktionsverfahrens, z. B. Balanced Truncation (Kooperation mit A06)
- robuste Sensorplatzierung für bewegte Geometrie
- Sensorpositionen auch als Inputgrößen für Kennfelder

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Methoden zur Modellanalyse für die Auslegung von Experimenten zur Parameteridentifikation

K. Großmann, B. Kauschinger, St. Schroeder; Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, TU Dresden

Thermische Modelle von Werkzeugmaschinen enthalten exemplarisch und zeitlich veränderliche Parameter. Im Entwurfsprozess können derartige Parameter nicht in ausreichender Genauigkeit abgeschätzt werden. Dafür ist ein messtechnisch gestützter Abgleich der Parameter an der jeweiligen Maschine nötig. Das Ziel des Teilprojekts B04 ist die Entwicklung von automatisierbaren Prozeduren, die einen effizienten Abgleich derartiger Parameter ermöglichen. Erste Untersuchungen werden zum Abgleich unsicherer Parameter von Verlustleistungsmodellen verschiedener Wälzlager durchgeführt.

Basis der Untersuchungen ist ein Lagerversuchsstand. Dieser dient der Entwicklung und dem Nachweis der Methoden zur Parameteridentifikation. Für einen weitgehend allgemeingültigen Nachweis ist dabei vorgesehen, das Verlustleistungsmodell der Lager über den typischen Parameterbereich wesentlicher Eingangsgrößen zu untersuchen. Der Versuchsstand muss dafür die entsprechenden Stellmöglichkeiten bieten. Des Weiteren sollen als Messgrößen für die Identifikation der Verlustleistungsparameter punktuell gemessene Temperaturen der Lagerumbauteile genutzt werden. Um typische thermische Einbausituationen nachzubilden, sollen die verhaltensrelevanten Umbauteile der Lager so gestaltet werden, dass charakteristische Temperaturfelder gelagerter Baugruppen entstehen.

Um die genannten Anforderungen sowohl bei der Auslegung des Versuchsstandes als auch bei Entwicklung von Lastregimes für die Parameteridentifikation zu erfüllen, sind zahlreiche Parameter- und Verhaltensanalysen anhand eines thermischen Modells des Lagerversuchsstandes notwendig. Eine Vielzahl der Schritte, insbesondere bei der Auswertung der Analysen, ist in gängigen Werkzeugen der digitalen Blocksimulation und Finite-Elemente-Methode nicht systematisch aufbereitet und automatisiert.

Für einen Teil der Schritte sind deshalb neue Methoden zur visuellen Analyse von thermischen Modellen entwickelt worden. Sie erlauben eine auf das Wesentliche reduzierte Gesamtdarstellung des thermischen Problems durch eine rechnerische und visuelle Aufbereitung der Modellstruktur, der Modelleigenschaften sowie der Zustands- und Flussgrößen. Für die Demonstration und den Nachweis der Wirksamkeit der Methoden erfolgte eine beispielhafte Umsetzung in Form eines softwaregestützten Werkzeugs.

Kontakt

Dipl.-Ing. Steffen Schroeder

TU Dresden

Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik

Tel.: 0351- 463 36102

E-Mail: schroeder@iwm.mw.tu-dresden.de

Methoden zur Modellanalyse für die Auslegung von Experimenten zur Parameteridentifikation

K. Großmann, B. Kauschinger, St. Schroeder
IWM TU Dresden

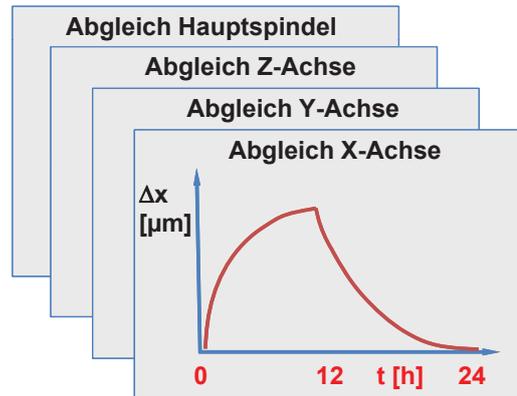
3. Kolloquium zum SFB/TR-96
Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen
am 29. und 30. 10. 2013 in Aachen

Inhalt

- Problemstellung der exemplarischen Parameteridentifikation
- Lagerversuchsstand als Untersuchungsbasis
- Werkzeuge für konstruktionsbegleitende thermische Berechnungen
- neue Methoden zur Visualisierung von thermischen Vorgängen

Problemstellung

- thermische Korrekturmodelle haben hohen Anspruch an **Modellgenauigkeit**
- einige Parameter haben hohen Gesamteinfluss und **hohe Unsicherheit**
- hinreichende Modellgenauigkeit bedingt **messtechnischen Parameterabgleich**
- **bisher sehr zeitaufwendige** Versuche für Parameterabgleich notwendig

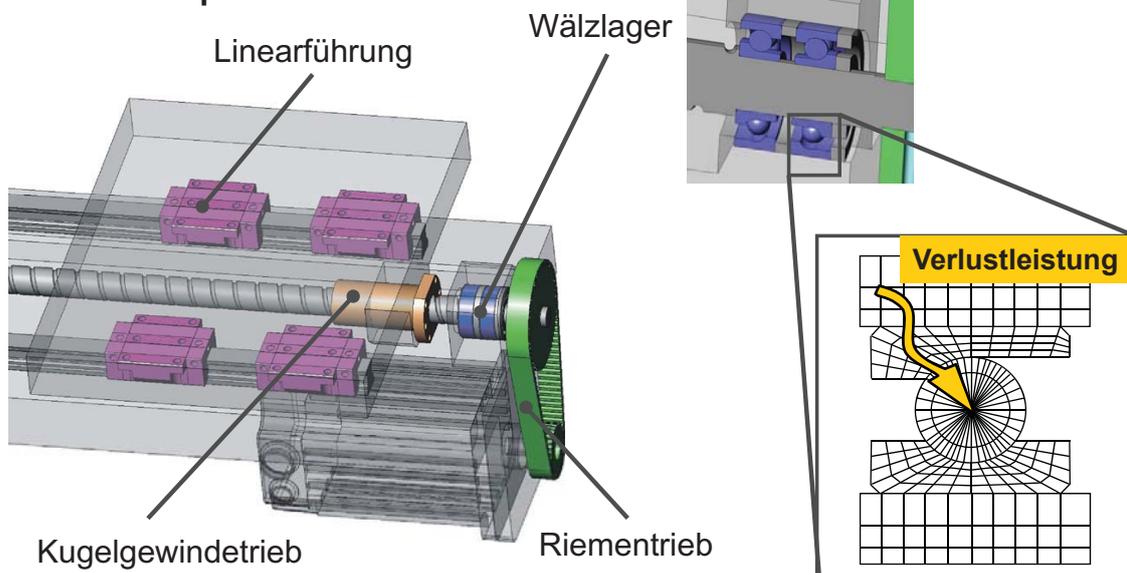


Ziel

- Entwicklung von Methoden für den effizienten Parameterabgleich mit:
 - kurzen Messzeiten im betriebsbereiten Maschinenzustand
 - geringem Aufwand zur Datenerfassung sowie
 - robusten Identifikationsverfahren

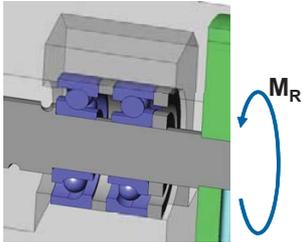
Untersuchungsgegenstand

Vorschubachse mit thermisch relevanten Komponenten



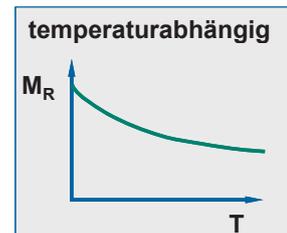
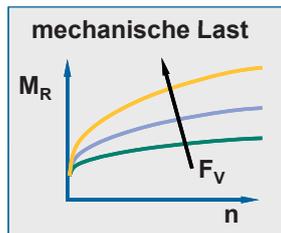
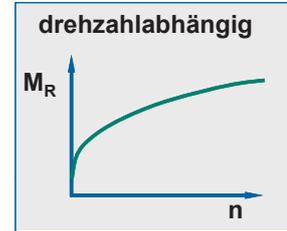
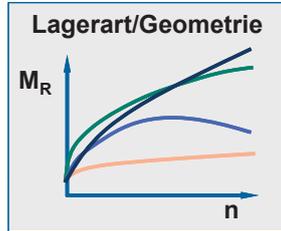
Abhängigkeiten der Lagerreibung

Wälzlager



zeitkonstante Eigenschaften

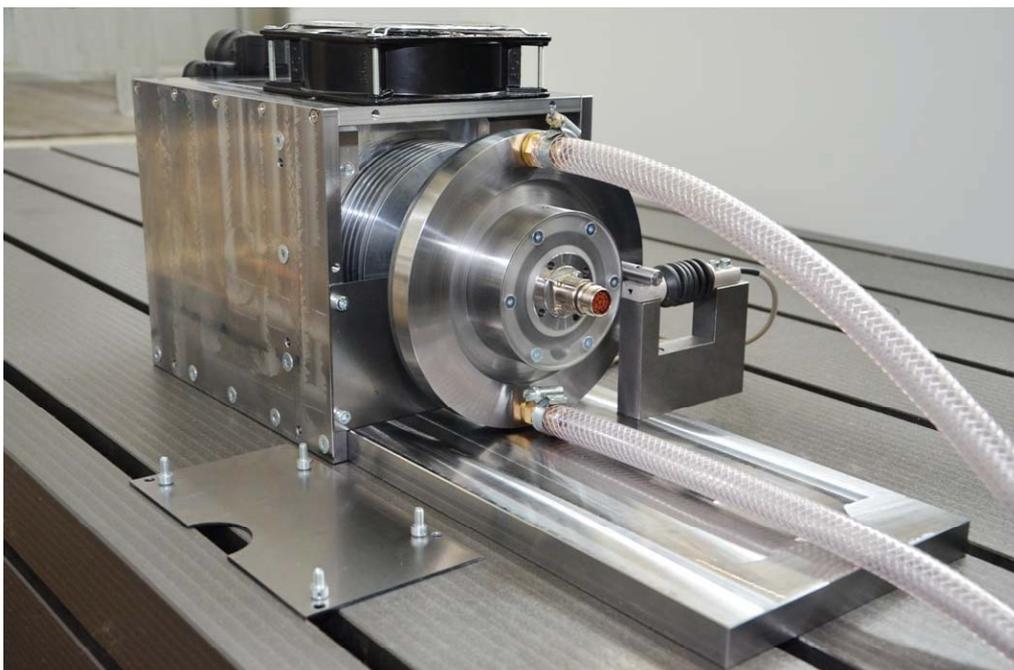
zeitvariante Eigenschaften



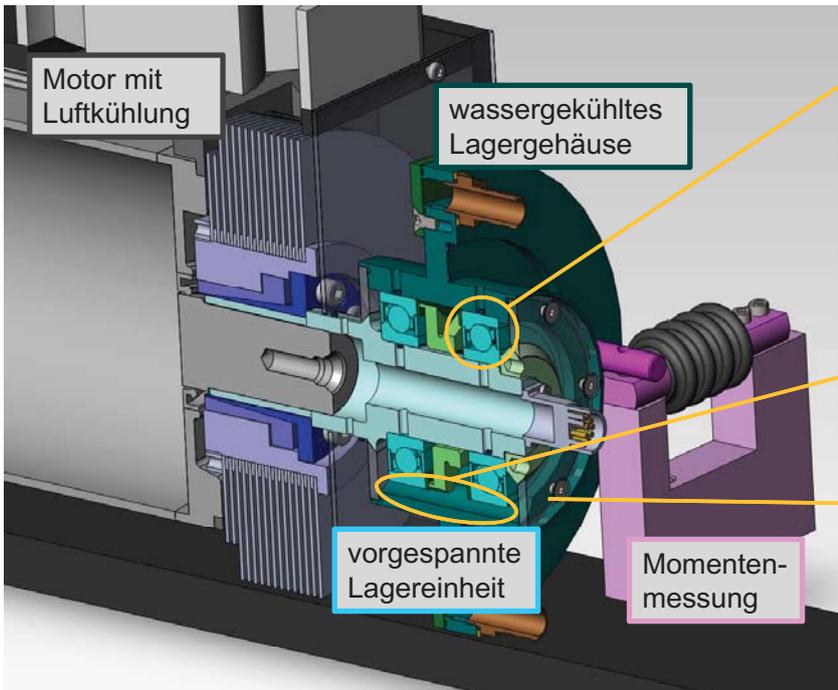
exemplarische Unsicherheit:

- Vorspannkraft,
- Schmiermittelviskosität

Lagerversuchsstand



Einstellen typischer Verlustleistungscharakteristiken



Variation von:

Lagerart

- Schrägkugellager
- Kegelrollenlager



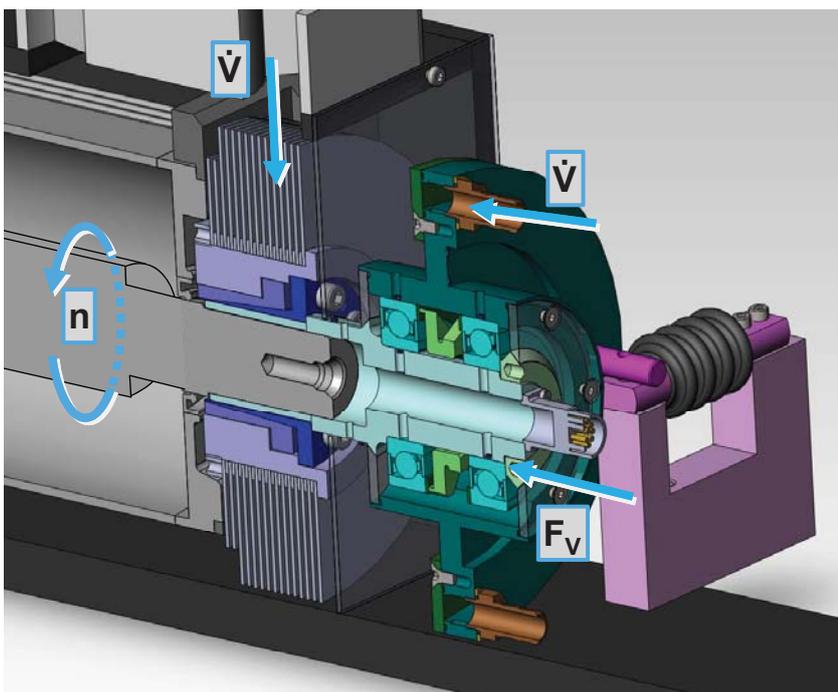
Schmierung

- Ölbad
- Fett

Dichtungsart

- Radialwellendichtung
- Labyrinthdichtung

Einstellen typischer thermischer und mechanischer Einflüsse



Variation von:

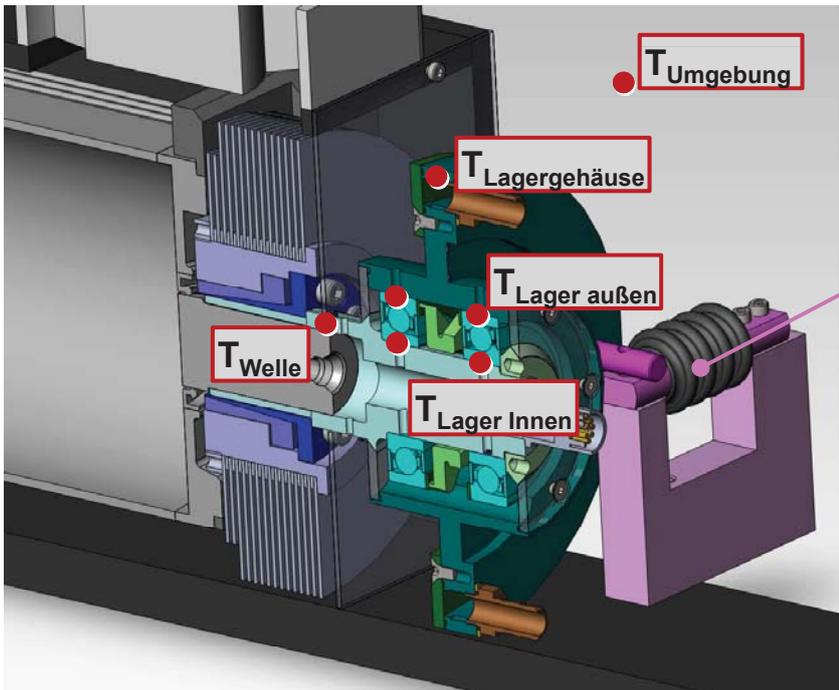
- Drehzahl (n)

- Kühlmitteltemperatur /
-volumenstrom (\dot{V})

- Lageraußenseite
- Lagerinnenseite

- Vorspannung (F_v)

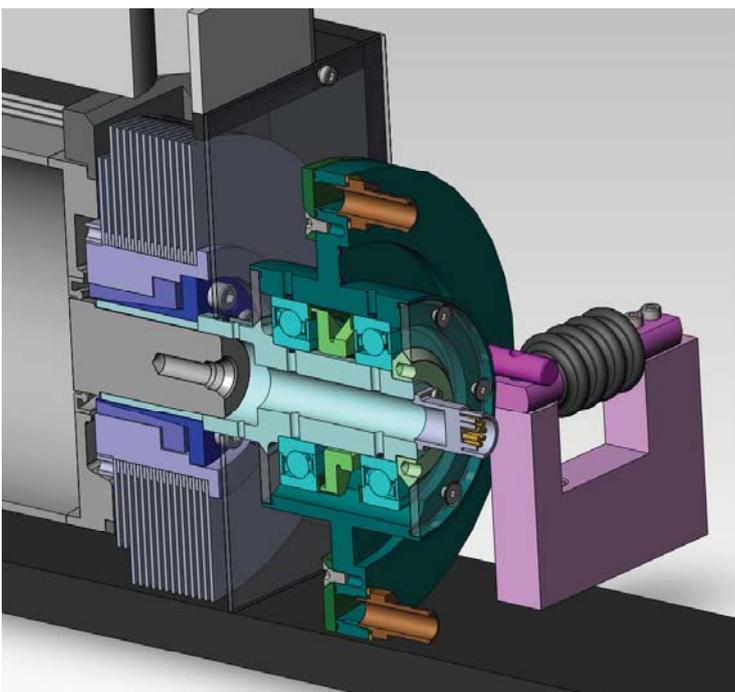
Messmöglichkeiten für Parameteridentifikation



Messung von:

- Temperaturen für Identifikation über thermisches Modell
- Reibmoment direkt über Momentensensor als Referenzwert

Konstruktionsbegleitende thermische Berechnungen



- Dimensionierung der Motor- und Lagerkühlung
- Dimensionierung innerer Leitwerte für praxisnahe Temperaturfelder in Lager und Umbauteilen
- Einflussanalyse von Umgebungsrandbedingungen
- Analyse der Messbarkeit des Temperaturhubs an Messstellen
- Untersuchung des Einflusses der Motorverlustleistung auf das Temperaturfeld

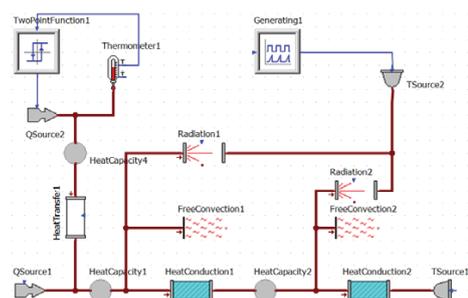
Anforderungen an Berechnungswerkzeug

- thermisches Modell für instationäre Temperaturverteilung
- grobe, der Problemstellung angemessene Diskretisierung
- Berücksichtigung von:
 - Wärmeleitung und Speicherung im Festkörper
 - Wärmeübergang im bewegten Wälzkontakt
 - freie und erzwungene Konvektion von Umgebungsluft und Kühlwasser
 - Verlustleistung von Wälzlagern und Motor
- Unterstützung bei Modellerstellung/-modifikation, Modellrechnung und Auswertung

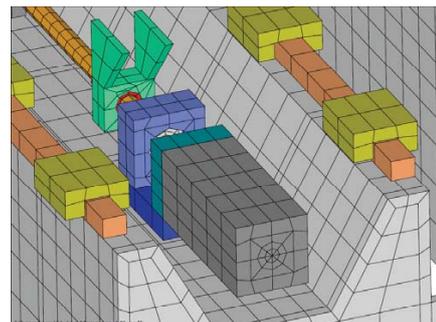
Unterstützung durch Berechnungswerkzeuge

- Werkzeuge: digitale Blocksimulation und Finite Elemente Methode
 - Anforderungen prinzipiell erfüllt
 - Universalwerkzeuge, keine Unterstützung der Problemspezifik „Thermik an Werkzeugmaschinen“
 - fehlende Unterstützung:
 - Modellerstellung: komplexe Teilmodelle für Verlustleistung, Wärmestrahlung, Konvektion und Strukturveränderlichkeit
- Modell-/Ergebnisdarstellung: **Visualisierung von Parametern** und z.T. auch Wärmestrom und Temperaturfeldern relativ abstrakt

Digitale Blocksimulation



Finite Elemente Methode



Quelle: Diss. S. Gleich

Digitale Blocksimulation

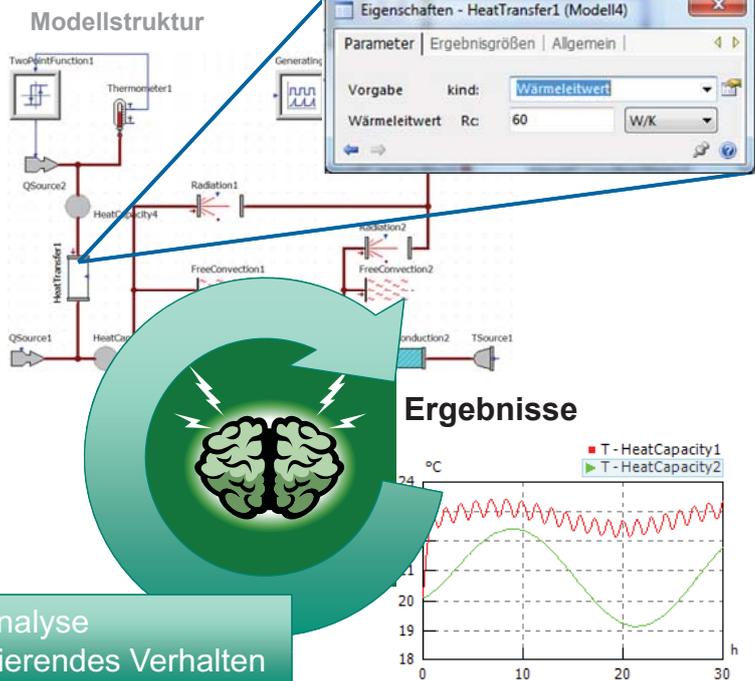
Modell

- Modellstruktur:**
- kleine Modelle mit übersichtlicher Struktur
 - meist kein visueller Geometriebezug
 - meist nur einzelne Modelleigenschaften und Startwerte darstellbar

Ergebnisdarstellung:

- Diagrammverläufe einzelner Größen
- meist kein visueller Geometriebezug

Modell



aufwendige Analyse
Modellparameter ↔ resultierendes Verhalten

Finite Elemente Methode

Modell

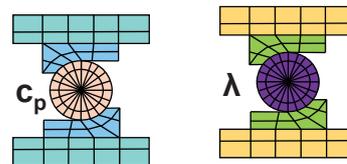
- Modellstruktur:**
- fein diskretisierte Struktur mit Geometriebezug
 - elementbezogene Materialeigenschaften und Randbedingungen
 - keine konzentrierte Darstellung resultierender Bauteileigenschaften

Ergebnisdarstellung:

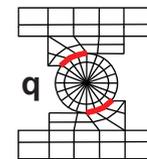
- elementbezogene Temperatur- und Wärmestromfelder

Modell

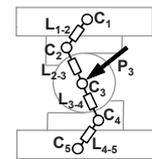
Materialeigenschaften und Geometrie



Verlustleistung

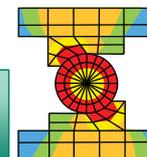


Parameter



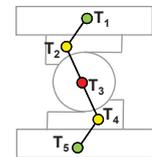
Ergebnisse

Temperaturfeld



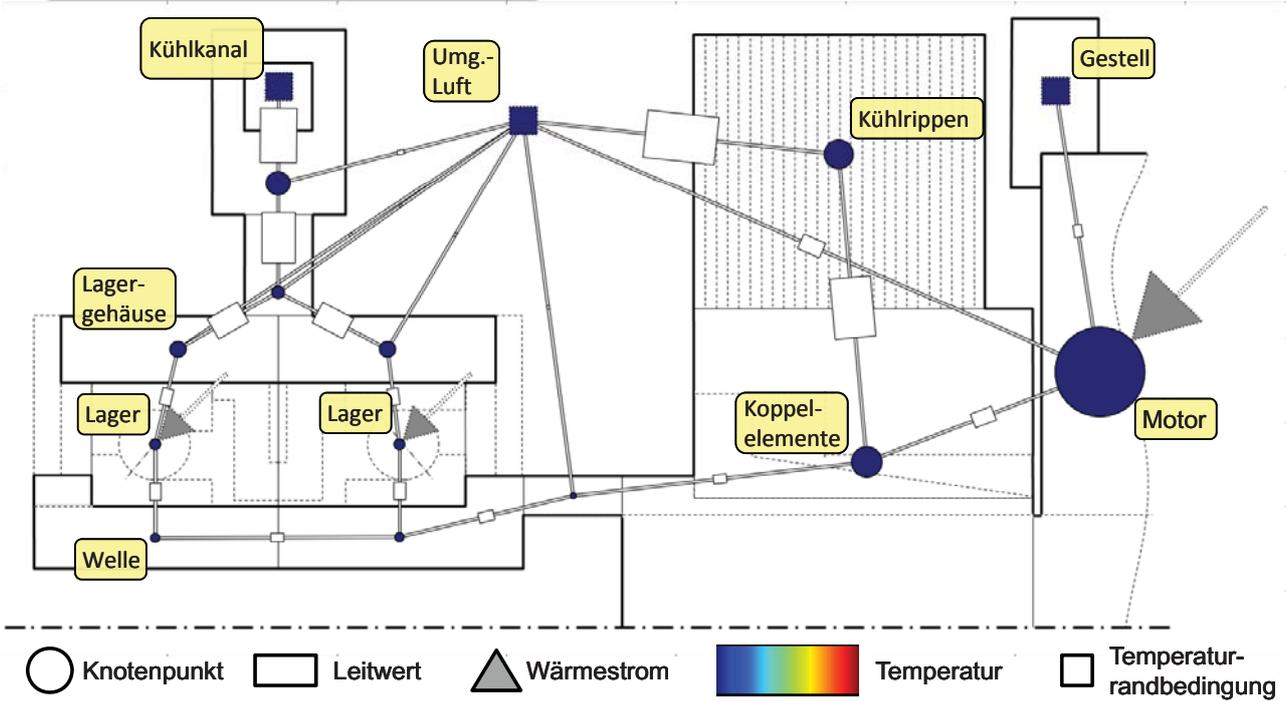
bauteilbezogene konzentrierte Darstellung

Temperaturen

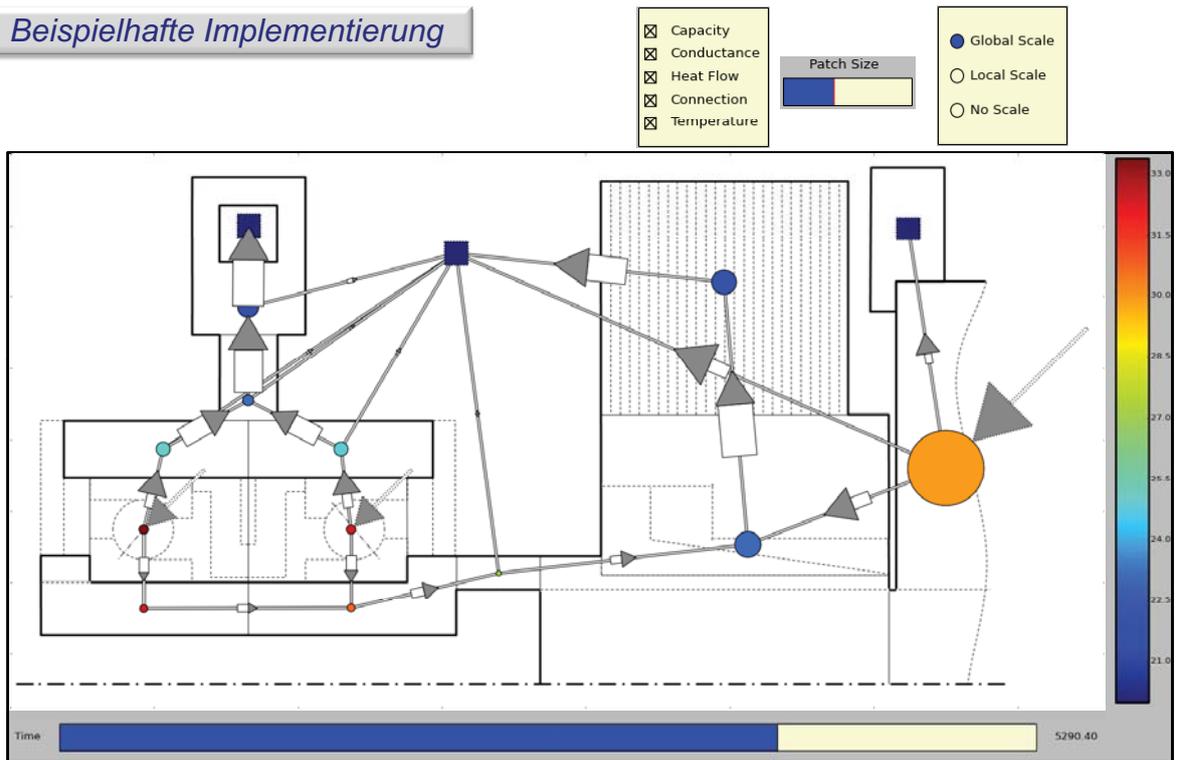


aufwendige Analyse
Modellparameter ↔ resultierendes Verhalten

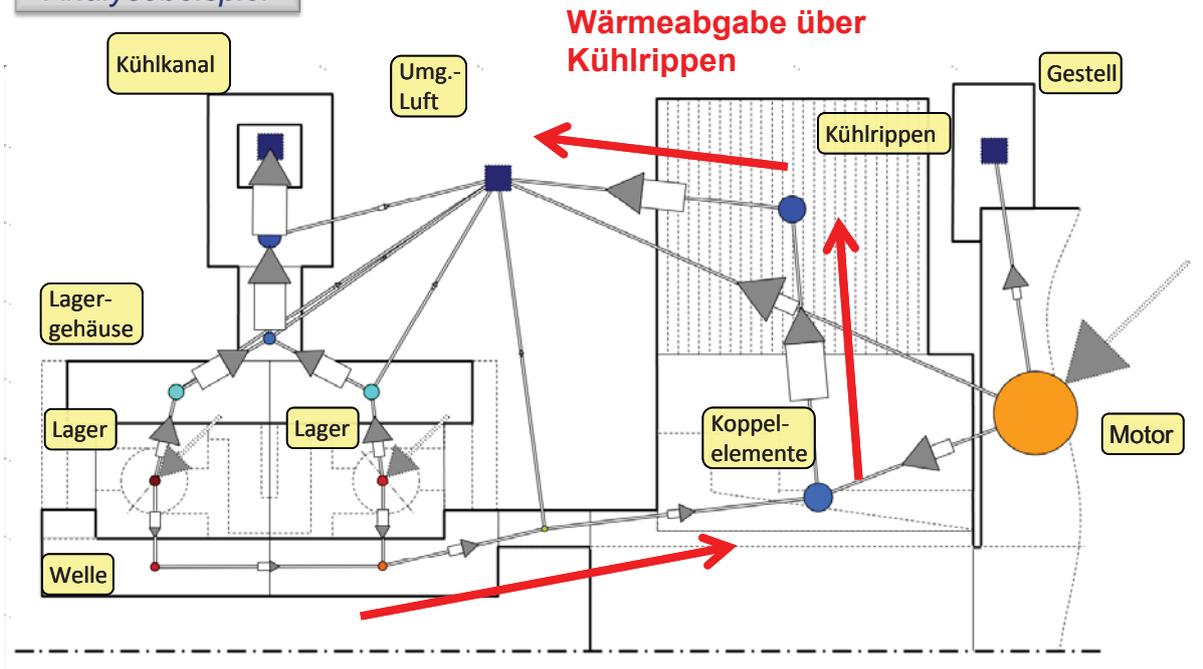
Neuartige Modellvisualisierung



Beispielhafte Implementierung



Analysebeispiel



Zusammenfassung

- Für die Auslegung des Versuchsstandes und die Entwicklung von Lastregimes für die Parameteridentifikation sind zahlreiche Parameter- und Verhaltensanalysen anhand eines thermischen Modells notwendig.
- Viele notwendige Analyseschritte sind in gängigen Werkzeugen der digitalen Blocksimulation und Finite-Elemente-Methode nicht systematisch aufbereitet und automatisiert.
- Für einen Teil der Schritte sind deshalb neue Methoden zur visuellen Analyse von thermischen Modellen entwickelt worden.
- Die neuen Methoden schaffen einen visuellen Zusammenhang zwischen der realen Struktur, der Modellstruktur, den Modellparametern und dem Modellverhalten.
- Die Demonstration und der Nachweis der Wirksamkeit der Methoden erfolgte mit Hilfe einer beispielhaften Umsetzung eines Softwarewerkzeugs.

Charakterisierung komplexer Verformung von Maschinenstrukturen mit strukturintegrierter Sensorik

M. Klatte, Ch. Wenzel; Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Wärmeeinträge in die Werkzeugmaschine durch interne oder externe Wärmequellen führen durch thermoelastische Strukturverformungen zu einer unerwünschten Verlagerung zwischen Werkzeug und Werkstück und schließlich zu Werkstückfehlern. Neben konstruktiven Maßnahmen zur Optimierung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen kann eine Minimierung von temperaturbedingten Werkstückfehlern über die aktive Kompensation von Strukturverformungen oder die steuerungstechnische Korrektur erreicht werden. Letztere kann wiederum indirekt über die Erfassung von Hilfsgrößen wie beispielsweise Umgebungstemperatur oder Spindeldrehzahl beziehungsweise direkt über die Messung von Verlagerungen erfolgen. Ziel des Teilprojekts C03 - „Strukturintegrierte Sensorik“ ist die direkte Messung lokaler thermoelastischer Verformungen von Maschinenstrukturen als Basis für die steuerungstechnische Korrektur thermisch bedingter Werkstückfehler.

Die direkte Messung der Strukturverformung wird durch die Integration von Referenzstäben aus kohlefaserverstärktem Kunststoff in die Maschinenstruktur erreicht. Durch den extrem geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten in Stabrichtung wird diese Maßverkörperung durch Schwankungen der Umgebungstemperatur nur minimal beeinflusst. Die Stäbe sind auf einer Seite festgelagert, auf der anderen Seite losgelagert, so dass sie stets spannungsfrei in der Maschinenstruktur liegen. Auf der Loslagerseite kann folglich mit einem Wegaufnehmer die lokale Längenänderung der Maschinenstruktur relativ zum Referenzstab gemessen werden. Mit einer Anordnung von mehreren Stäben wird neben der Messung reiner Dehnung auch die Erfassung und Quantifizierung von Biegunszuständen möglich.

Die grundsätzliche Wirksamkeit des Messprinzips konnte in umfangreichen Untersuchungen an einem Grundlagenprüfstand verifiziert werden. Werden die Messwerte mehrerer Sensorapplikationen einer Anordnung durch ein mathematisches Modell verarbeitet, können auch einfache Verformungen wie einachsige Biegung mit einem geringen Restfehler von bis zu 3,8 % abgebildet werden.

Für die Abbildung von Verformungen in komplexen Strukturen von Werkzeugmaschinen wurden mehrere Modellansätze entwickelt. Grundsätzlich wird dazu die Maschinenstruktur durch eine Anordnung verketteter Quaderelemente annähernd beschrieben. Dabei wird zunächst über ein vorgelagertes Modell die Verformung jedes einzelnen Quaderelements beschrieben. Durch die Anordnung mehrerer Elemente kann so die gesamte kinematische Kette vom Werkzeug zum Werkstück innerhalb der Maschinenstruktur näherungsweise beschrieben werden.

Die Modellansätze unterscheiden sich zusätzlich nach der einzusetzenden Methode, die für die steuerungstechnische Korrektur verformungsbedingter Werkstückfehler eingesetzt werden soll. Es besteht zum einen die Möglichkeit, den Korrekturwert über die Betrachtung einzelner Schnittebenen durch die Maschine zu berechnen. Die andere Möglichkeit der Korrektur besteht über die Beschreibung von Achsfehlern auf Basis eines Strukturersatzmodells. Diese können von einer gewöhnlichen NC-Steuerung als Fehlerparameter für eine volumetrische Kompensation genutzt werden. Derzeit befindet sich eine Testmaschine im Aufbau, auf der die oben beschriebenen Konzepte getestet und verglichen werden können.

Kontakt

*Dipl.-Ing. Michel Klatte
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Abteilung Produktionsmaschinen
52074 Aachen
Tel.: 0241 – 8904 321
E-Mail: michel.klatte@ipt.fraunhofer.de*

Charakterisierung komplexer Verformungen von Maschinenstrukturen mit strukturintegrierter Sensorik

Dr. Christian Wenzel

Michel Klatte

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie Aachen

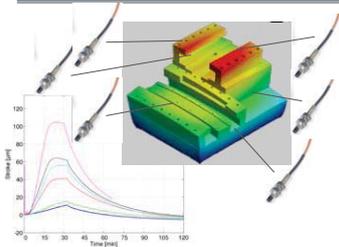
SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Einleitung

Zielsetzung und Lösungskonzept im Teilprojekt C03

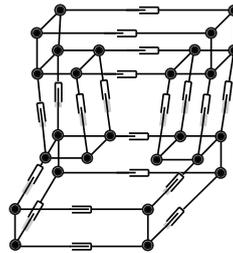
Direkte messtechnische Erfassung thermo-elastischer Verformungen in der Grundstruktur einer dreiachsigen Werkzeugmaschine während der Bauteilbearbeitung durch ein integriertes Sensorsystem sowie die Berechnung von Korrekturdaten für den Tool-Center-Point (TCP) auf Basis der erfassten Messwerte.

Lokale Verlagerungsmessung über Sensorsystem



Im Maschinensystem integrierte Messapplikationen erfassen lokale thermo-elastische Verlagerungen an Strukturpunkten parallel zum Bearbeitungsprozess

Geometrisch-Kinematisches Übertragungsmodell



Die erfassten Einzelverlagerungen werden unter Verwendung eines geometrisch-kinematischen Maschinenmodells in eine TCP Gesamtverlagerung überführt

Korrektur der thermo-elastischen TCP Verlagerung

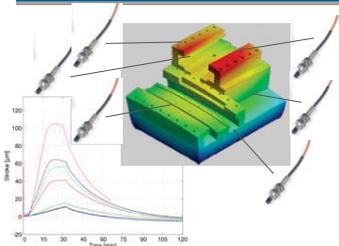


Die ermittelten TCP-Verlagerungen werden in die Maschinensteuerung transferiert und dort über die Anpassung der Fahrbefehle korrigiert.

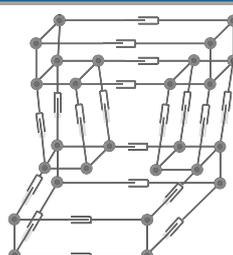
SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Messtechnik und Versuchseinrichtungen

Lokale Verlagerungsmessung über Sensorsystem



Geometrisch-Kinematisches Übertragungsmodell



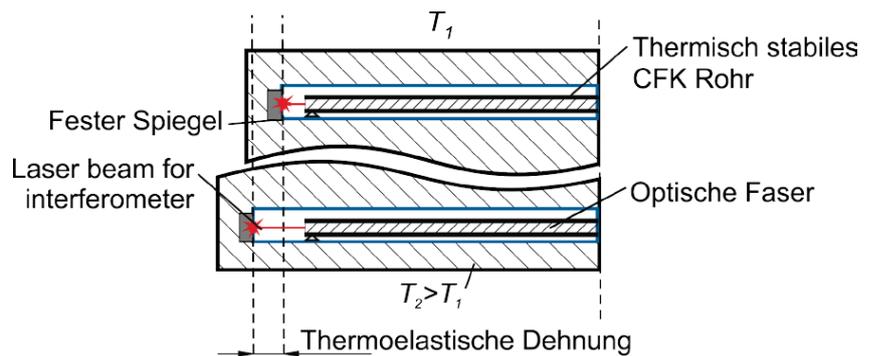
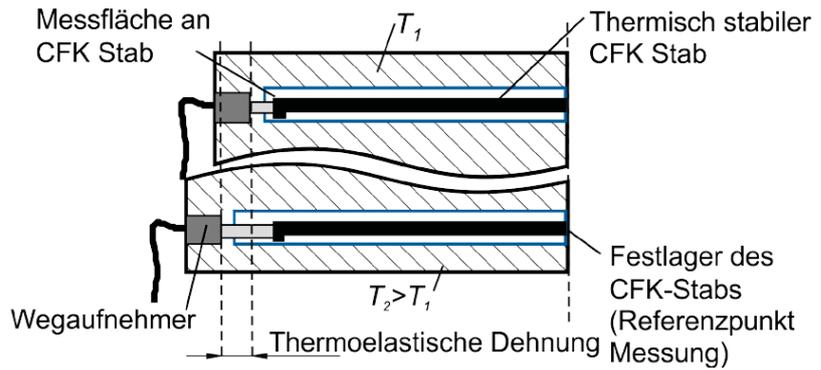
Korrektur der thermo-elastischen TCP Verlagerung



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Messprinzip

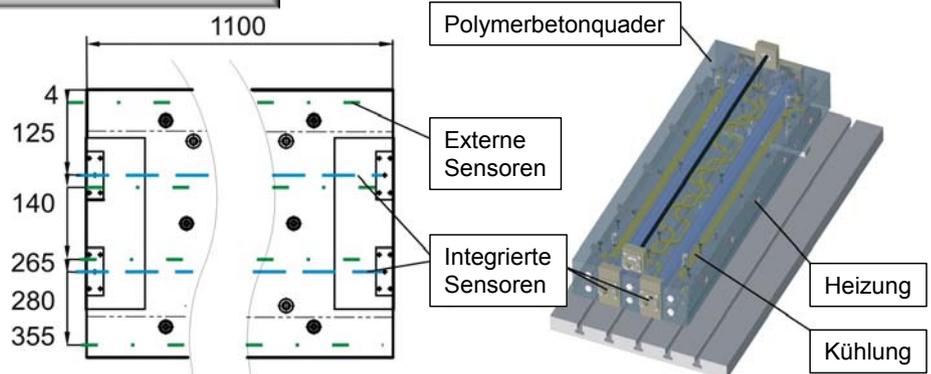
- CFK-Normal
 - Thermische Nulldehnung
- Wegaufnehmer messen gegen Endfläche
- Getestete Aufnahme
 - Berührungslos
 - Kapazitiv
 - Wirbelstrom
 - Messtaster
 - Induktiv
 - Optisch
 - Faseroptische Sensoren



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

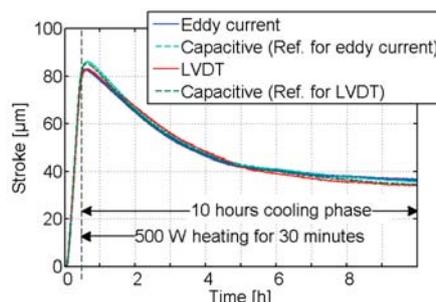
Teststruktur zur Sensorverifikation

- Ausstattung
 - Integrierte Sensoren
 - Externe Sensoren (Verifikation)
 - Regelbare Heizelemente
 - Konstante Kühlung
- Verifikation Messprinzip
 - Symmetrische oder asymmetrische Beheizung
 - Anschließende Abkühlphase
- Ergebnis
 - Dehnung kann mit hoher Genauigkeit gemessen werden
 - Biegung kann detektiert werden

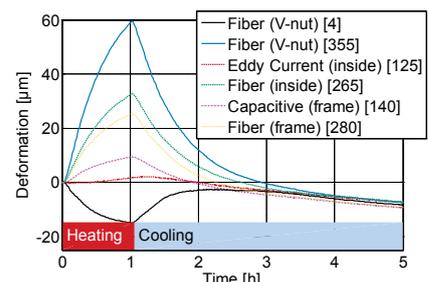


Draufsicht: Sensoranordnung

3D-Ansicht



Ausdehnung



Biegung

SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“



IBS Wireless Eddy Current

- Durchmesser: 5 mm
- Range: 1,25 mm
- Auflösung: 0,05 μm @10 Hz
- 3 Kanäle je Auswerteeinheit



Microplan Solartron LVDT

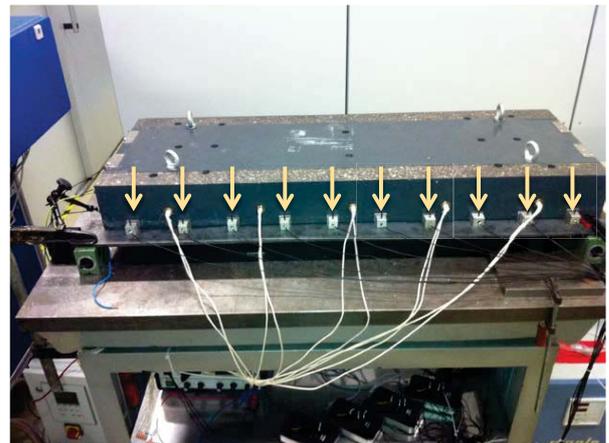
- Durchmesser: 8 mm
- Range: 2 mm
- Auflösung: 0,2 μm
- 1 Kanal je Auswerteeinheit

Quelle: <http://www.microplan-group.com/mpg/DE/REMO.html> [Stand: 12.04.2013]

SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Erweiterung der Teststruktur

- Nutzung der Wireless Eddy Current Systeme zur umfangreichen Ausrüstung der Teststruktur
 - 10 Kanäle zur Erfassung der Biegelinie verfügbar
 - Induzierung und Messung komplexer Verformungszustände möglich
 - 2 Kanäle zur Erfassung der Auslenkung der Endfläche verfügbar
- Systemtest abgeschlossen
 - Alle 8 Systeme lassen sich problemlos gleichzeitig betreiben



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

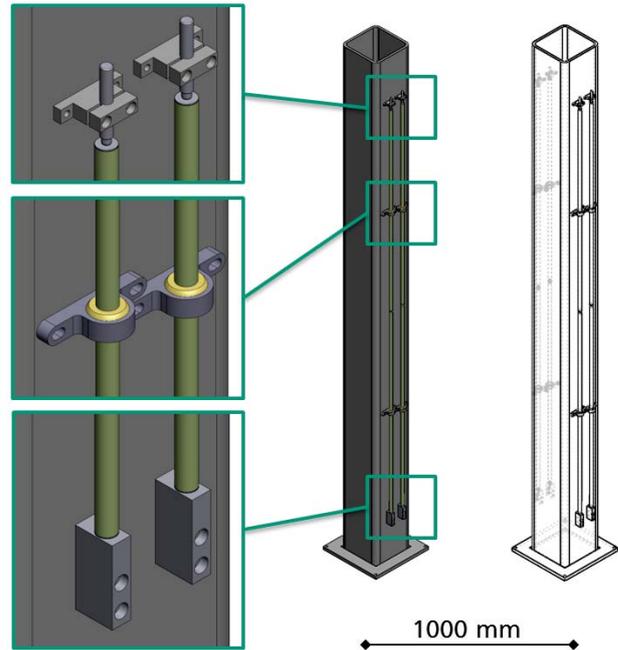
Versuchsträger Nachrüstbarer Messrahmen

- Baukastensystem mit Standardkomponenten
- Pultrudierte CFK-Stäbe mit geringer Wärmeausdehnung ($-0.1 \cdot 10^{-6}$) als Referenzlänge
- Stahlträger als Teststruktur
- Externe Beheizung möglich
- Externe mechanische Belastung möglich

Halterung für Wegaufnahme

Loslager

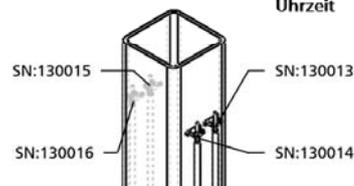
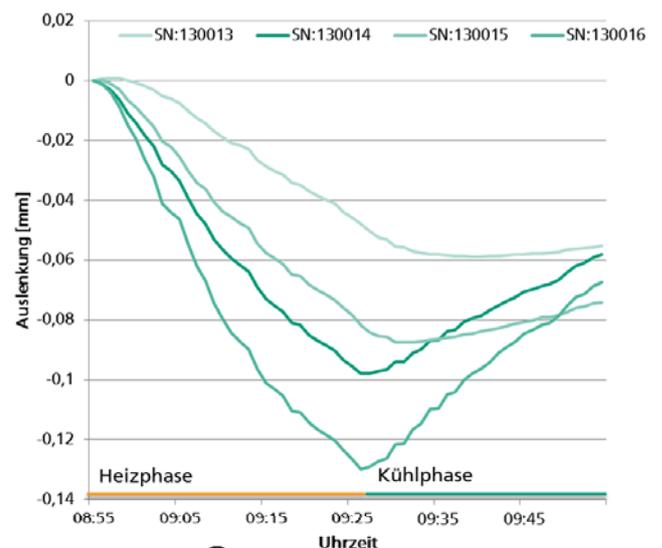
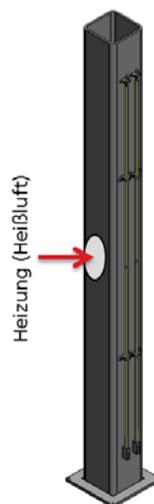
Festlager



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Sensorverifikation für Nachrüstsysteme

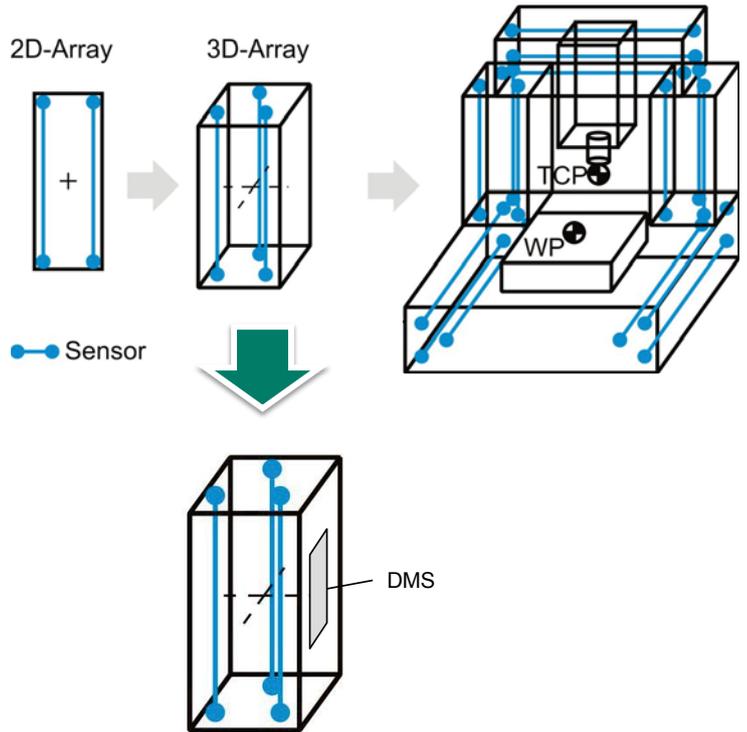
- Versuche zum Übertragungsverhalten des Aufbaus »Nachrüstbarer Messrahmen«
- Messung an 4 Stellen
- Heizung mit Heißluftpistole von einer Seite
- Ergebnis
 - Sauberer Verlauf der Dehnung beobachtbar
 - Kaum Stick-Slip-Effekt



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Möglichkeiten und Grenzen

- Mehrere Sensorapplikationen können kombiniert werden, um komplexe Deformationen zu messen
 - Sensorsystem kann durch weitere, andersartige Sensoren unterstützt werden für
 - Messungen in weiteren Freiheitsgraden
 - Erhöhung der Messgenauigkeit
 - Beispiel: DMS, Neigungswaagen
- Mehrere Sensorsysteme können eingesetzt werden, um eine Maschinenstruktur anzunähern



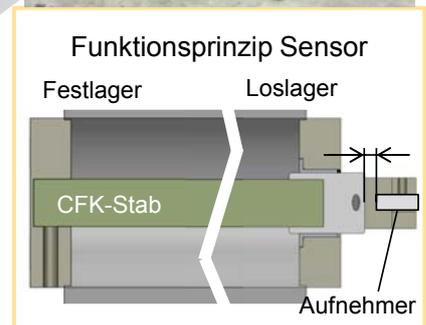
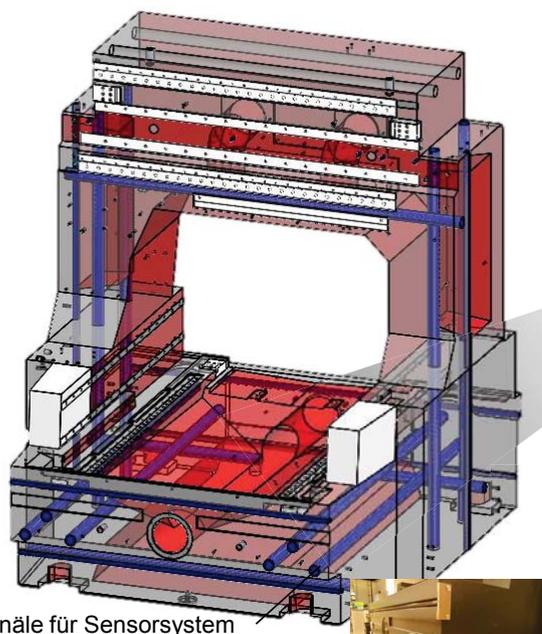
SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Aufbau eines Versuchsträgers

Montierte Sensoraufnahmen Portal



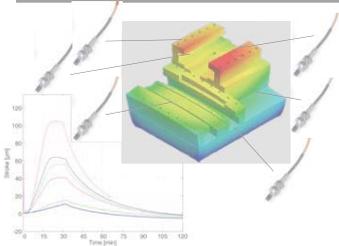
Montierte Sensoraufnahmen Bett



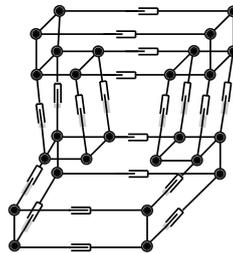
SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Modellierung

Lokale Verlagerungsmessung über Sensorsystem



Geometrisch-Kinematisches Übertragungsmodell

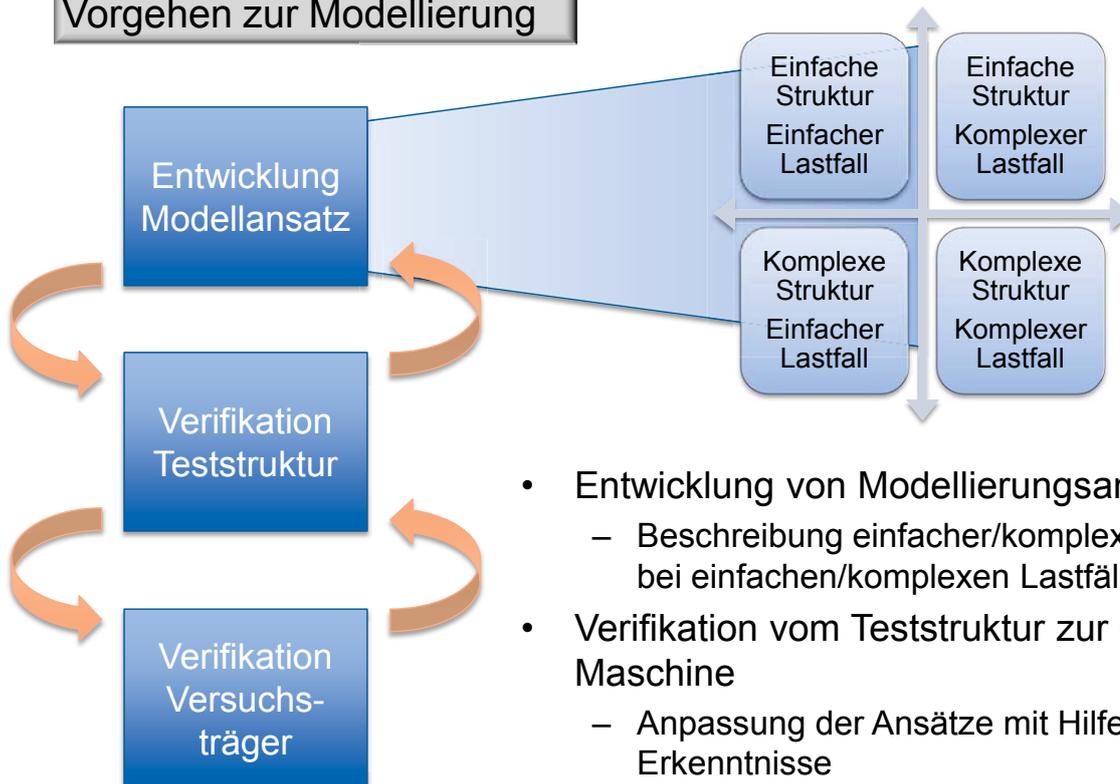


Korrektur der thermo-elastischen TCP Verlagerung



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

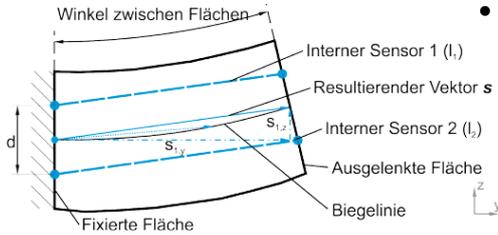
Vorgehen zur Modellierung



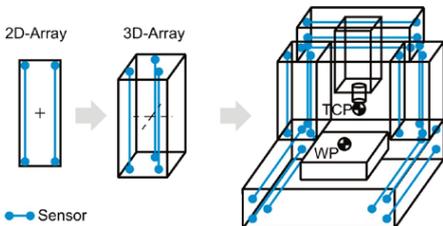
- Entwicklung von Modellierungsansätzen
 - Beschreibung einfacher/komplexer Strukturen bei einfachen/komplexen Lastfällen
- Verifikation vom Teststruktur zur gesamten Maschine
 - Anpassung der Ansätze mit Hilfe gewonnener Erkenntnisse

SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Aktuelle Arbeiten in der Modellierung



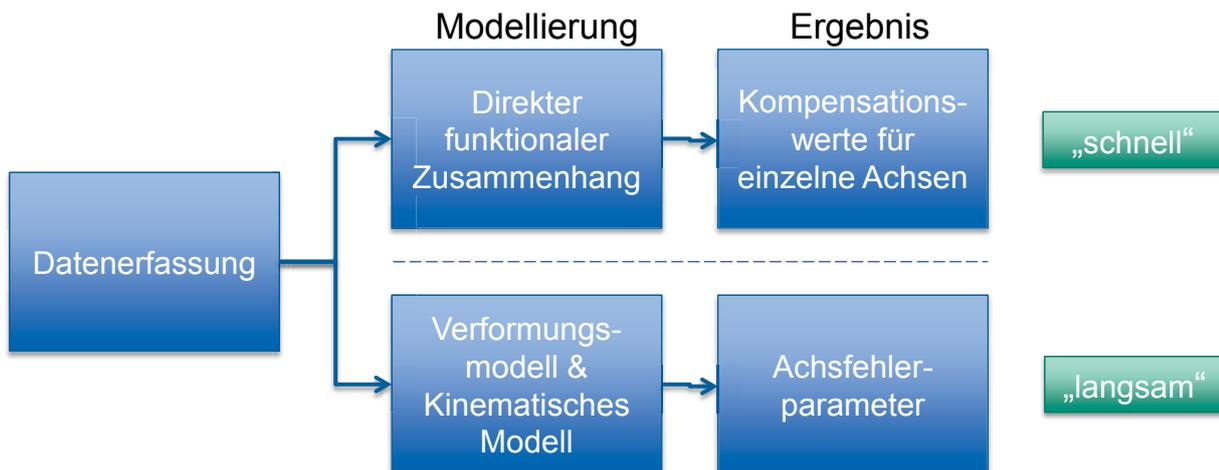
- Beschreibung der Verformung einfacher Strukturelemente für einfache Lastfälle
 - Anwendung: Einzelne Komponenten, z.B. Maschinenständer
 - Verifikation an Teststruktur erfolgt
- Beschreibung komplexerer Maschinenstrukturen
 - Anwendung: Ganzheitliche Beschreibung der Maschinenstruktur (s. Versuchsträger)
 - Entwicklung Quadermodell erfolgt (Verknüpfung mehrerer, einfacher Strukturelemente)



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Alternative Ansätze zur Berechnung der TCP Verlagerung

- Generierung von Kompensationsdaten
 - Direkte Berechnung (Ausgabe X,Y,Z)
 - Generierung von Achsfehlerparametern z.B. für volumetrische Kompensation



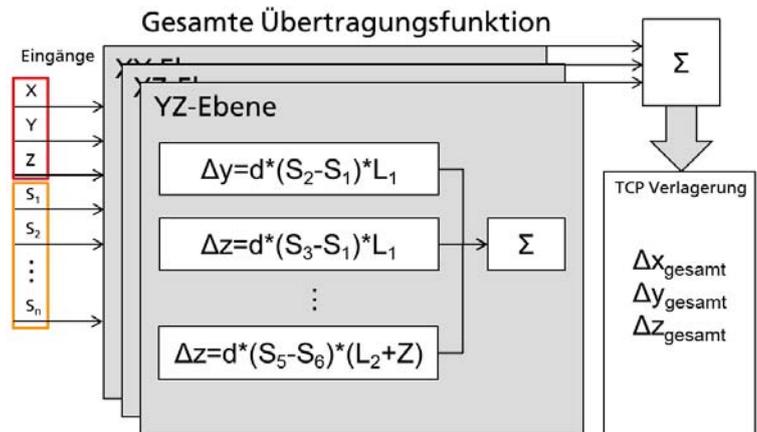
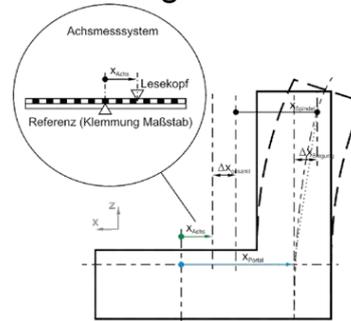
SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Modellierung Alternative 1

Direkter funktionaler Zusammenhang

- Abbildung von TCP Verlagerung als Funktion von Gruppen von Sensorsignalen in Ebenen
 - „Baukasten“ mit Verlagerungstypen
- Superposition der Ergebnisse mehrerer Sensorgruppen zu Gesamtverlagerung
- Direkter Zusammenhang
- Schnelle Berechnung, onlinefähig (möglich auf Steuerung)
- **Limitation:** Statisch überbestimmte Strukturen nur bedingt abbildbar

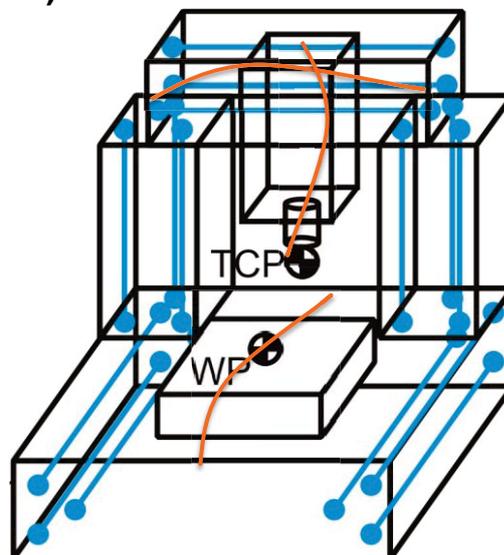
Betrachtung in der Ebene



Modellierung Alternative 2

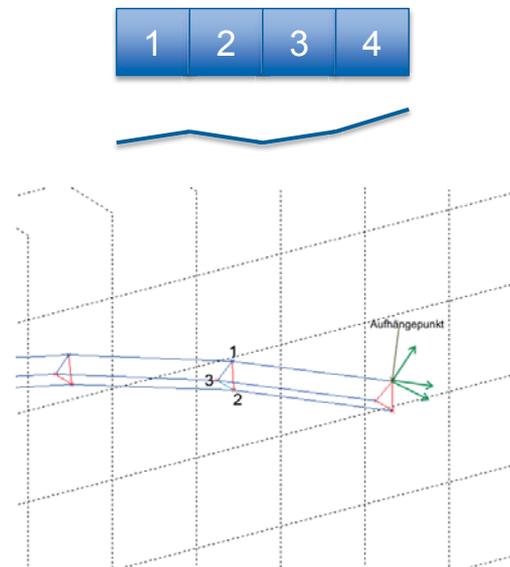
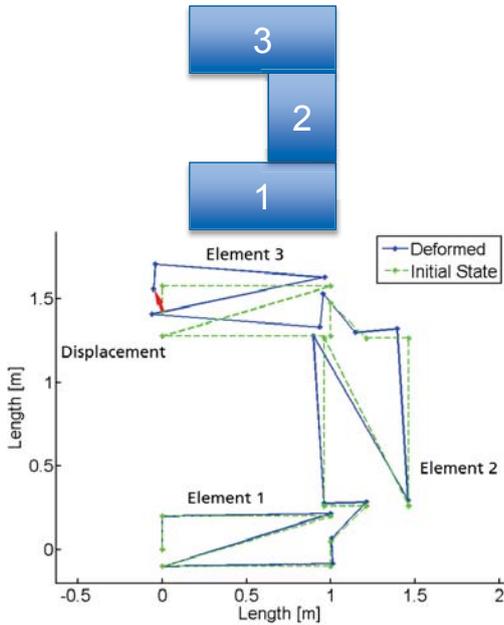
Strukturersatzmodell (Quadermodell)

- Bildung eines Strukturersatzmodells
- Abbildung der Strukturverformung mit Hilfe von Sensorsignalen
- Ableitung von Achspfaden auf Maschinenstruktur
 - Extraktion der Verlagerung von Punkten auf der Struktur, über die Achsen bewegt werden
 - Information über die Verlagerungen jedes Punktes auf der Struktur in allen Koordinatenrichtungen vorhanden
 - Generierung der Fehlerfunktion der entsprechenden Achse
- **Limitation:** Hohe Rechenzeit



Beispiel Verkettung für komplexe Strukturen im Strukturersatzmodell

- Beschreibung komplexer Strukturen
- Beschreibung komplexer Verformung

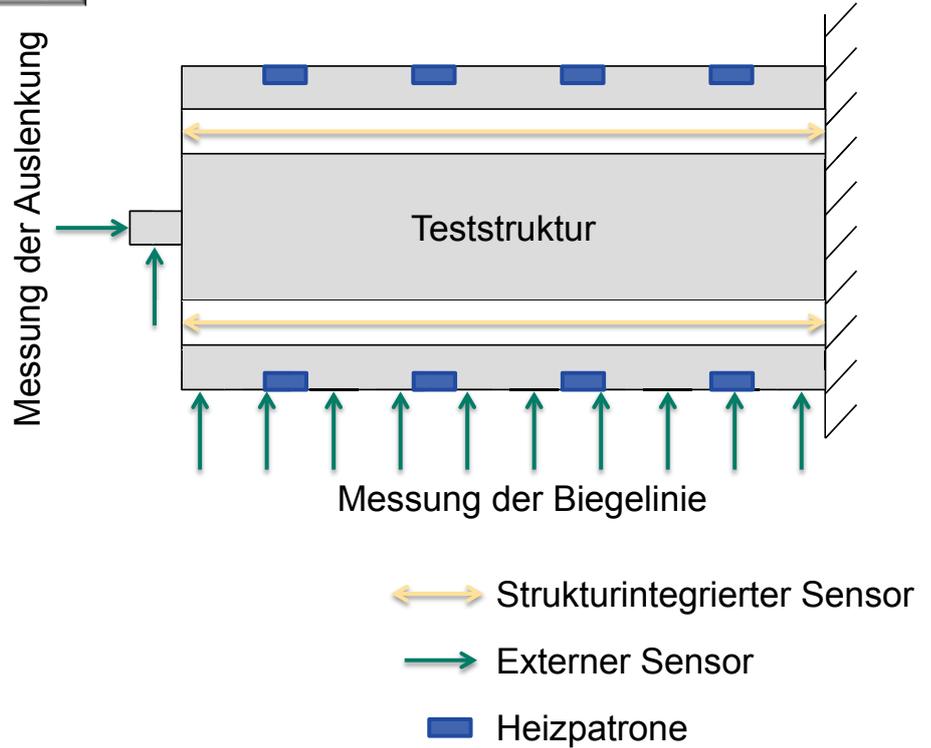


SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Messung und Validierung

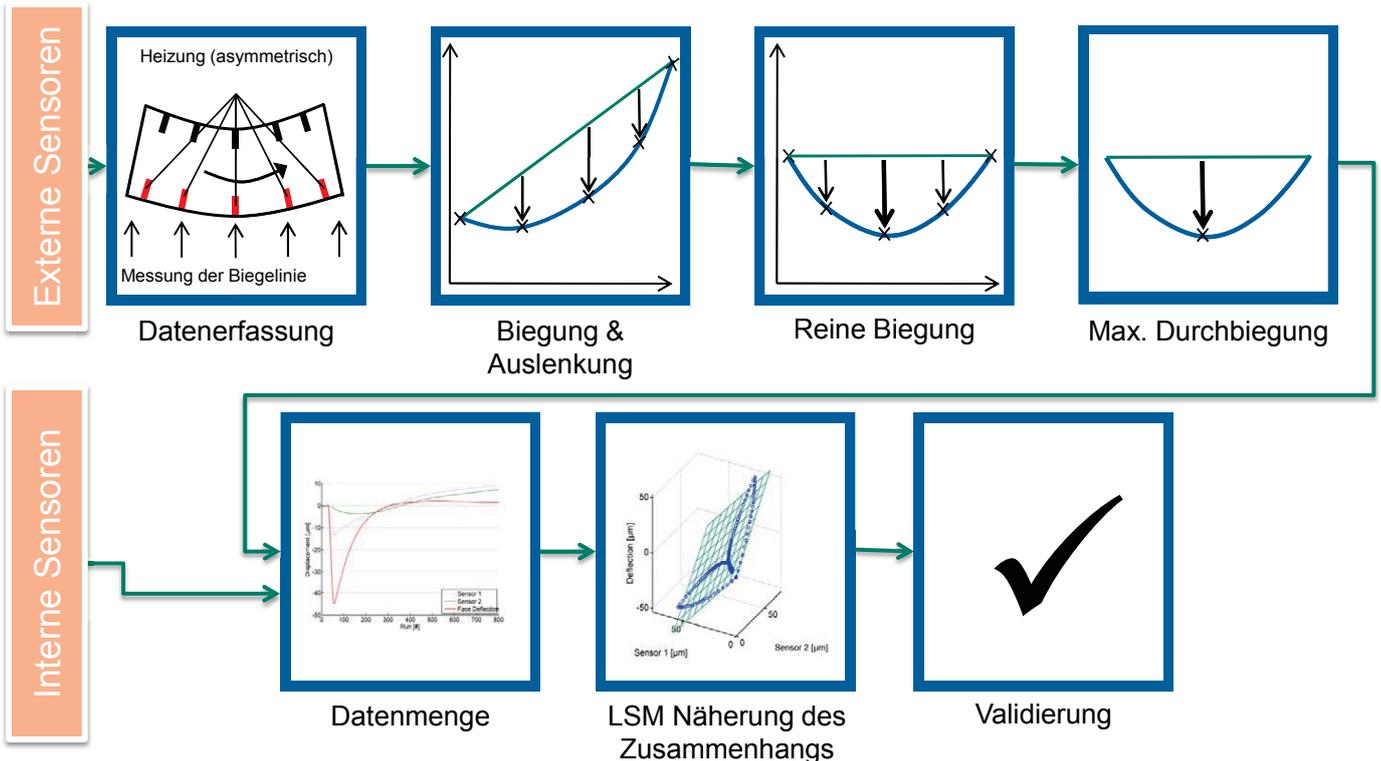
Messaufbau für Validierung

- Messung der Ausdehnung
- Detektion von Biegung
- Bestimmung der Biegung
- Bestimmung der Auslenkung



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

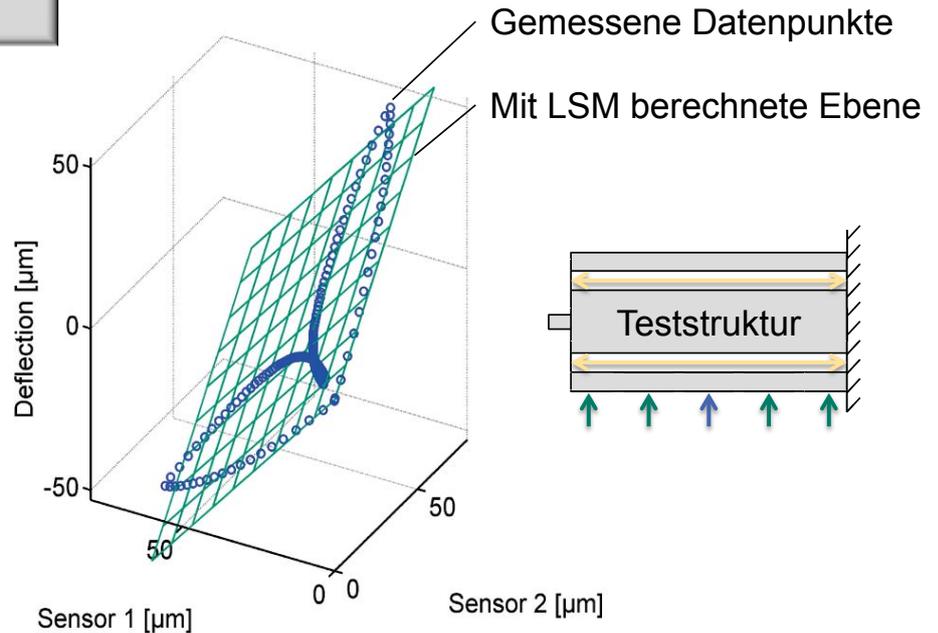
Validierung der Bestimmung von Durchbiegung



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Validierung der Biegelinie

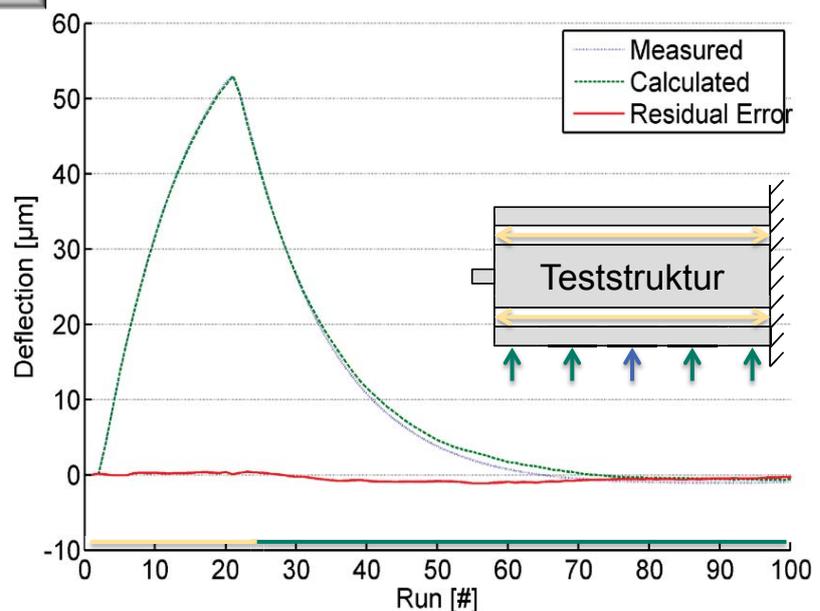
- Graph zeigt maximale Durchbiegung über Messwerte interner Sensoren
- Datenpunkte liegen recht nah an einer Ebene
 - Funktionaler Zusammenhang zwischen Sensorsignalen und Durchbiegung liegt nahe
- Optimale Ebenengleichung kann mit LSM berechnet werden



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

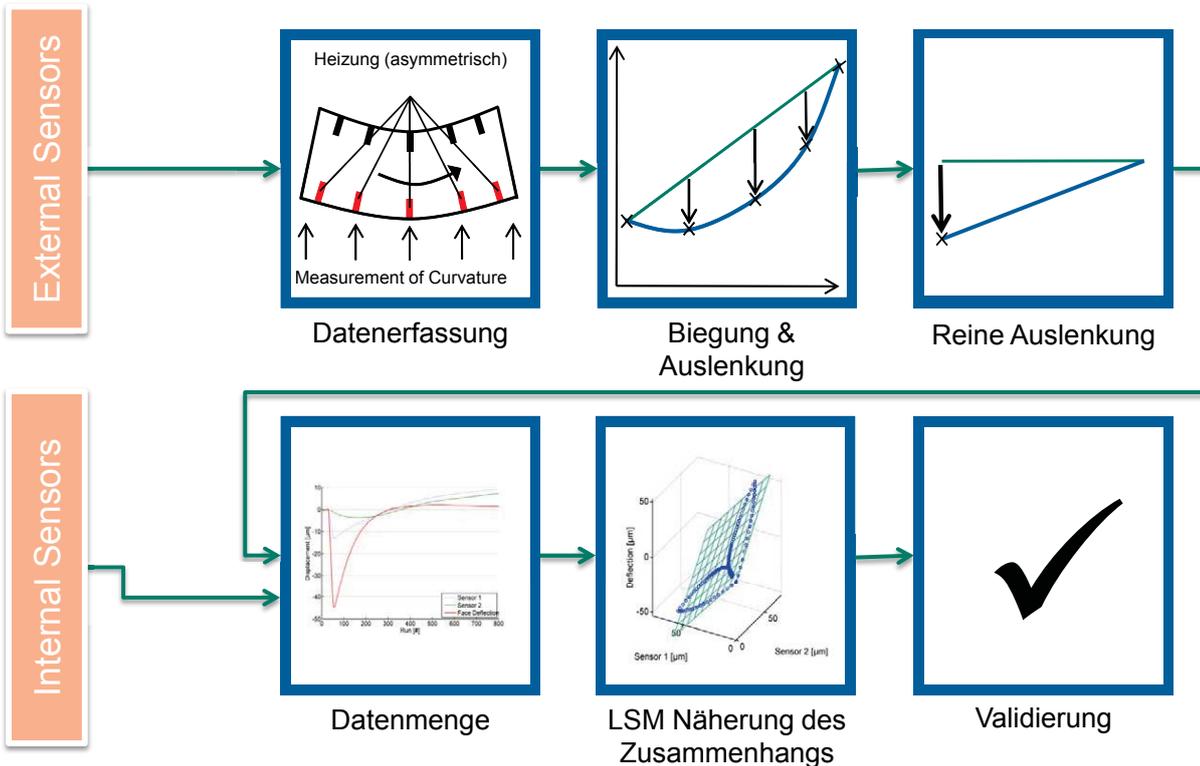
Validierung der Biegelinie

- Graph zeigt Vergleich zwischen gemessener und berechneter Durchbiegung
- Gute Übereinstimmung
- Maximaler Restfehler in Abkühlphase von ~3.8%
- Sehr kleiner permanenter Restfehler
 - Durchbiegung geht komplett zurück



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

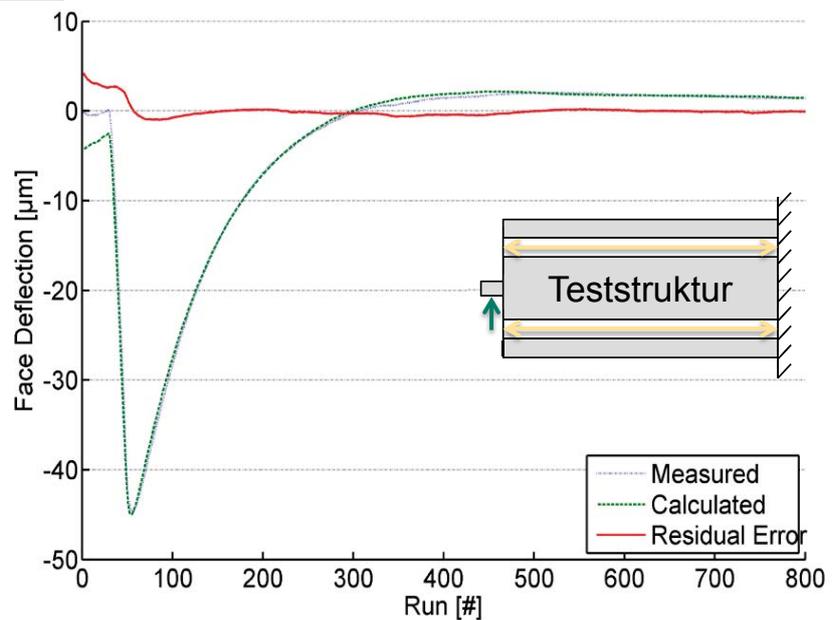
Validierung der Bestimmung von Auslenkung



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Validierung der Auslenkung

- Graph zeigt Vergleich zwischen gemessener und berechneter Auslenkung
- Restfehler deutlich sichtbar
 - Permanente Verschiebung des Messaufbaus
 - Auslenkung geht nicht vollständig zurück
 - Weitere Messungen nötig (s. Ausblick)



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Zusammenfassung

SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Zusammenfassung

- Ein Systemansatz mit unterschiedlichen Sensoren zur Messung von Strukturverformungen wurde entwickelt
- Aufbauend auf dem System soll eine steuerungstechnische Korrektur verformungsbedingter Positionierfehler möglich werden
- Kernkomponente des Korrektursystems ist ein Verformungsmodell, das zur Umrechnung der Sensorsignale in Verlagerungswerte dient
- Mehrere Verformungsmodelle befinden sich in der Entwicklung

VOLUMETRISCHE VERMESSUNG THERMO- ELASTISCHER VERLAGERUNGEN

C. Brecher, M. Wennemer, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen, RWTH Aachen

Teilprojekt B06 „Eigenschaftsmodellbasierte Korrektur lastabhängiger Strukturverformungen“ verfolgt das Ziel, eine ganzheitliche, indirekte Korrekturmethode zu entwickeln, die auf Basis steuerungsinterner Daten die thermisch bedingten Bearbeitungsfehler einer Fräs- sowie einer Schleifmaschine korrigiert.

Der Einfluss der belasteten Achsen inklusive des gesamten Antriebsstranges steht wie die Arbeitsraumabhängigkeit im Mittelpunkt der Untersuchungen.

Im Rahmen dieses Teilprojekts des SFB/Transregio 96 wird dabei ein eigenschaftsmodellbasierter Ansatz zur Korrektur thermo-elastischer Verlagerungen für den gesamten Arbeitsraum von Werkzeugmaschinen entwickelt. Bei der Verfolgung dieses indirekten Ansatzes werden Tool-Center-Point-Verlagerungen (TCP) über physikalische Hilfsgrößen wie Drehzahlen, Achspositionen und Leistungen ermittelt, mit deren Hilfe Verlagerungen der TCP-Position im Arbeitsraum berechnet und anschließend der Maschinensteuerung als Offset übergeben werden können. Vorteil einer indirekten Vorgehensweise liegt im Verzicht auf zusätzliche externe Messtechnik, denn alle erforderlichen Informationen zur Korrektur können bereits der Maschinensteuerung entnommen werden.

Diese indirekte steuerungsinterne Korrekturmethode wurde bereits am WZL für den spindellastbedingten Anteil erfolgreich entwickelt und wird in diesem Projekt auf den achslastbedingten Anteil unter Betrachtung der Arbeitsraumabhängigkeit übertragen. Für ein ganzheitliches Korrekturmodell müssen allerdings auch externe Einflüsse wie beispielsweise Tag-/Nachtschwankungen abgebildet werden. Hierzu wird die eigenschaftsmodellbasierte Korrektur schließlich mit einer bestehenden Korrekturmethode auf Basis von neuronalen Netzen und Umgebungstemperaturmessungen synthetisiert.

Im ersten Schritt des Projektes ist die Last-Verformungs-Beziehung bezüglich der Maschinenachsen für eine einzelne TCP-Position durch Luftschnitte experimentell ermittelt worden. Auf Basis dieser Daten wurden im Anschluss Übertragungsfunktionen zwischen den steuerungsinternen Maschinendaten als Ursache und der TCP-Verlagerung als Wirkung parametrisiert. Im Ergebnis konnte mit der gewählten Methode einer eigenschaftsmodellbasierten Korrektur der Restfehler achsbedingter Verlagerungen für einen Arbeitsraumpunkt um über 60% auf einen Betrag von unter 5 µm reduziert werden.

In diesen ersten Versuchen wurden die translatorischen Verlagerungen während Aufwärm- wie auch Abkühlphasen mit einem Messdorn sowie -winkel und fünf induktiven Messtastern gem. ISO 230-3 gemessen. Thermoelastische Verlagerungen der Maschinenstruktur bewirken allerdings eine poseabhängige Verlagerung der TCP-Position, sodass eine volumetrische Betrachtung erforderlich wird.

Diese Vermessung des gesamten Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine kann dabei mit dem LaserTracer-System der Firma Etalon erfolgen. Um thermische Verlagerungen mit diesem System messen zu können, wurde der Messablauf automatisiert und eine zugehörige Software entwickelt. Die Software umfasst dabei Module zur automatischen Verlagerungsmessung, Berechnung der Verlagerungen als 3D-Punktwolke oder als Achsfehlerparameter, Analyse des thermoelastischen Verhaltens mittels umfangreicher Darstellungsmöglichkeiten sowie zur Parametrierung eines eigenschaftsmodellbasierten Korrekturmodells. Im weiteren Verlauf des Projektes wird die volumetrische eigenschaftsmodellbasierte Korrekturmethode um die achslastabhängige Komponente erweitert. Hierzu wird das thermoelastische Verhalten mit einer eigens entwickelten Belastungseinheit, die eine reproduzierbare, einzelne wie auch simultane Belastung der Maschinenachsen ermöglicht, experimentell untersucht und Korrekturmodelle abgeleitet.

Im Anschluss wird das entwickelte eigenschaftsmodellbasierte Korrekturverfahren für den achsbedingten Anteil mit den am Werkzeugmaschinenlabor Aachen bereits entwickelten Methoden zur spindellastabhängigen und umgebungsbedingten thermischen Verlagerung synthetisiert.

Kontakt:

*Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Matthias Wennemer
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen, RWTH Aachen
52074 Aachen
Tel.: 0241-8028387
E-Mail: M.Wennemer@wzl.rwth-aachen.de*

Volumetrische Vermessung thermoelastischer Verlagerungen

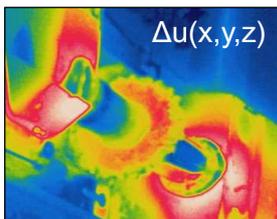
Teilprojekt B06

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

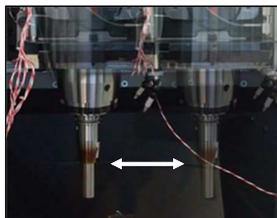
Dipl. Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Matthias Wennemer



Agenda



1 Forschungsfeld



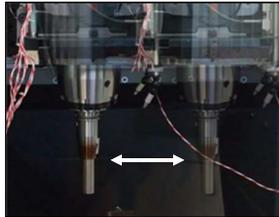
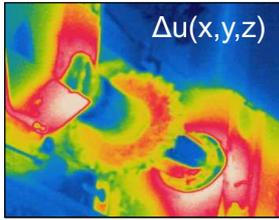
2 Korrekturansatz

3 Volumetrische Vermessung thermischer Verlagerungen



4 Ausblick

Agenda



1 Forschungsfeld

2 Korrekturansatz

3 Volumetrische Vermessung thermischer Verlagerungen

4 Ausblick

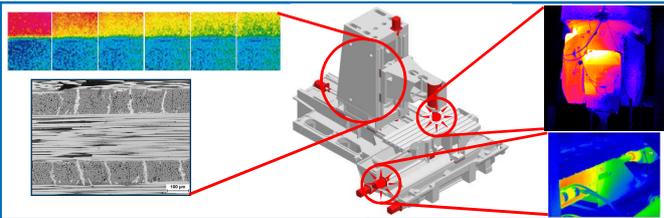
Interne Einflüsse



Externe Einflüsse



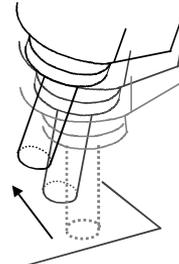
Wärmequellen und -senken



Materialeigenschaften
thermische Kapazitäten und
Konduktivitäten

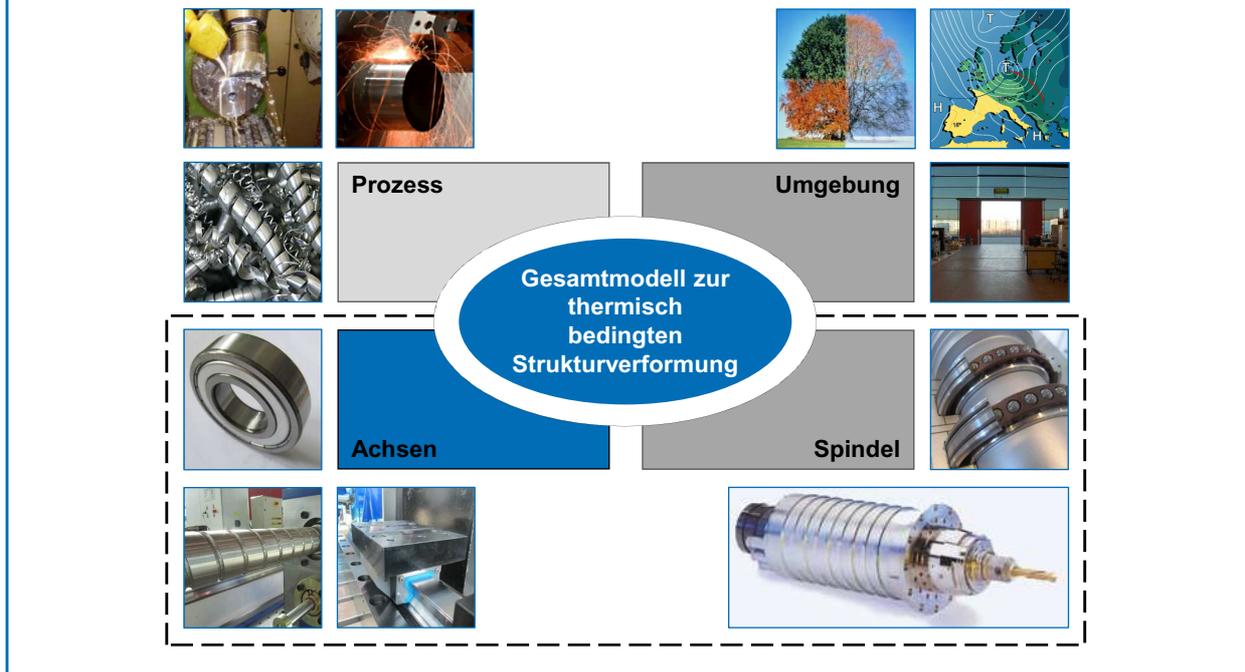
Konstruktion
Verteilung der Massen sowie
Wärmequellen und -senken

Tool Center Point
Verlagerungen



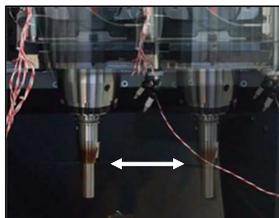
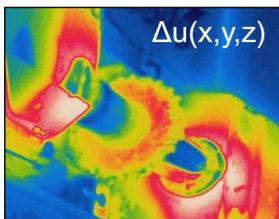
Fehler am
Werkstück

Kontext Korrekturmethode



Forschungsfeld

Agenda

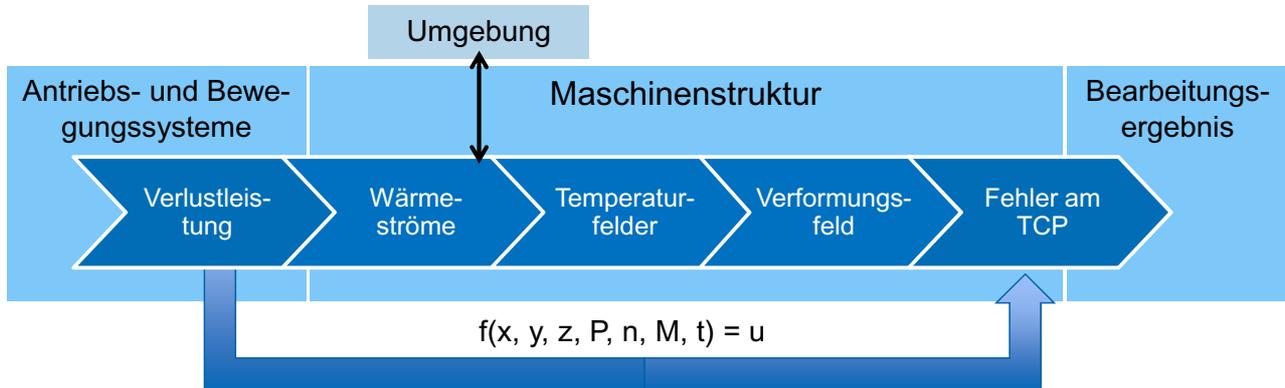


1 Forschungsfeld

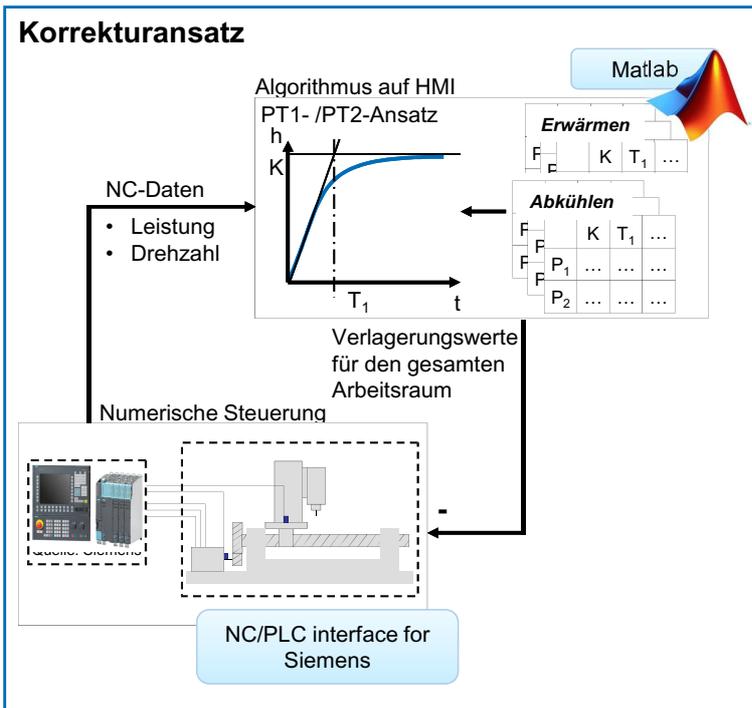
2 Korrekturansatz

3 Volumetrische Vermessung thermischer Verlagerungen

4 Ausblick

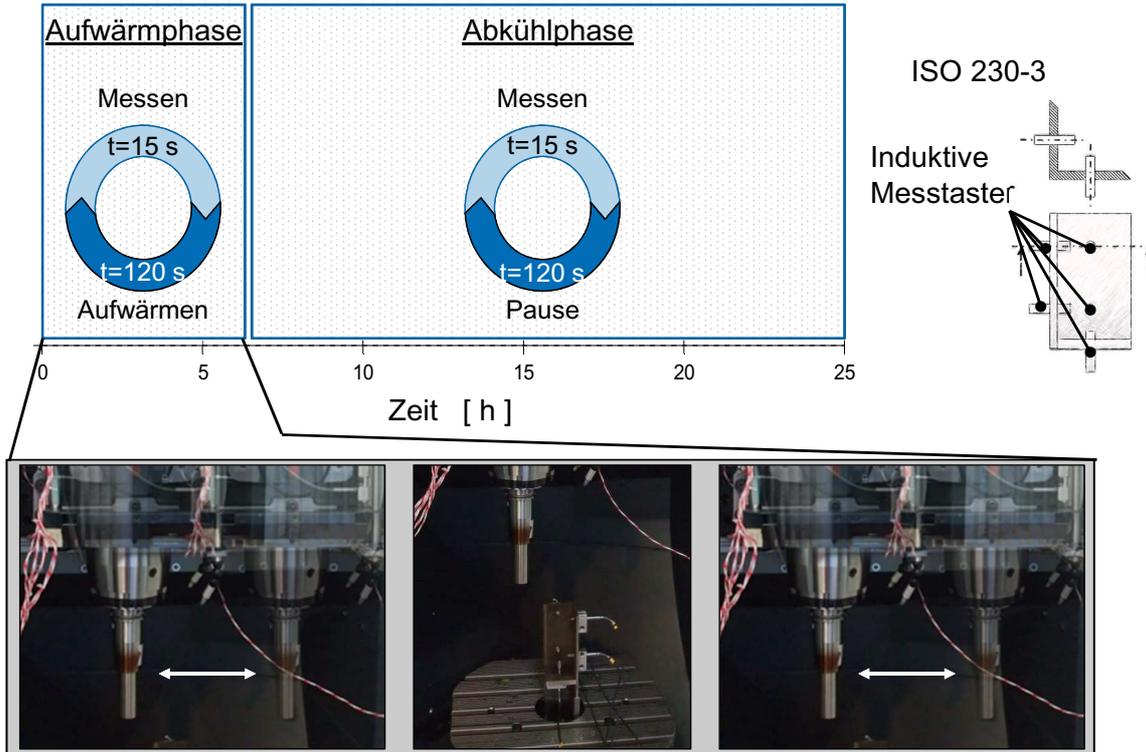


Korrekturansatz



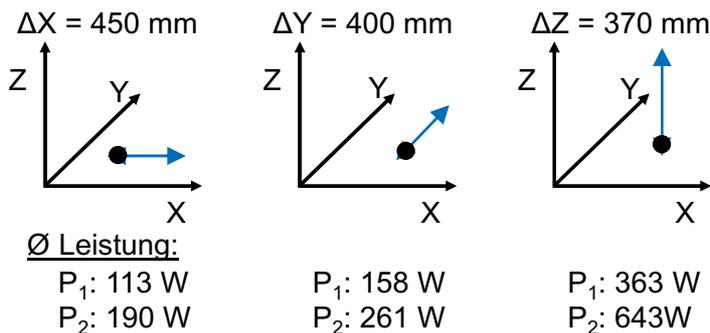
- Methode zur steuerung-internen Korrektur lastabhängiger, thermisch bedingter Bearbeitungsfehler im gesamten Arbeitsraum einer Fräs- und einer Schleifmaschine
- Auf der Basis von Daten, die der Steuerung entnommen werden können
 - » keine zusätzliche, externe Messtechnik notwendig
- Korrektur des achsbedingten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

Korrekturansatz

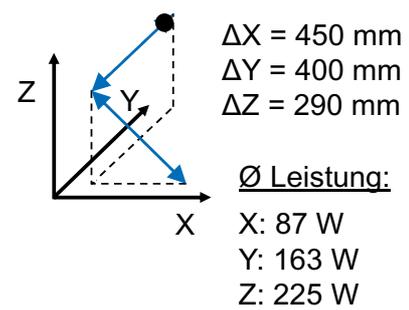


Versuchsaufbau für einen Punkt im Arbeitsraum

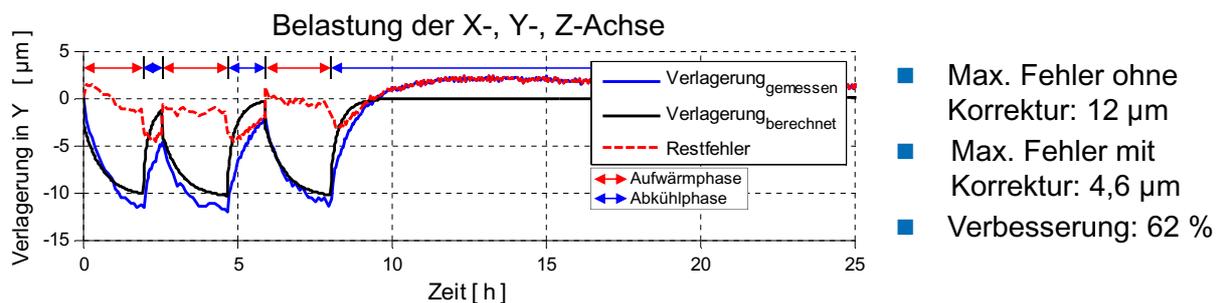
Modellierung ($v_1: 20 \text{ m/min}$, $v_2: 30 \text{ m/min}$)



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

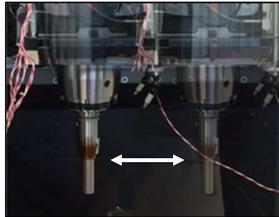
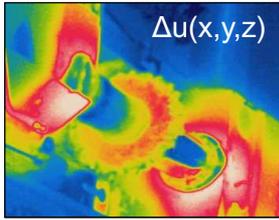


Validierungsergebnis



Korrekturmodell für einen Punkt im Arbeitsraum

Agenda



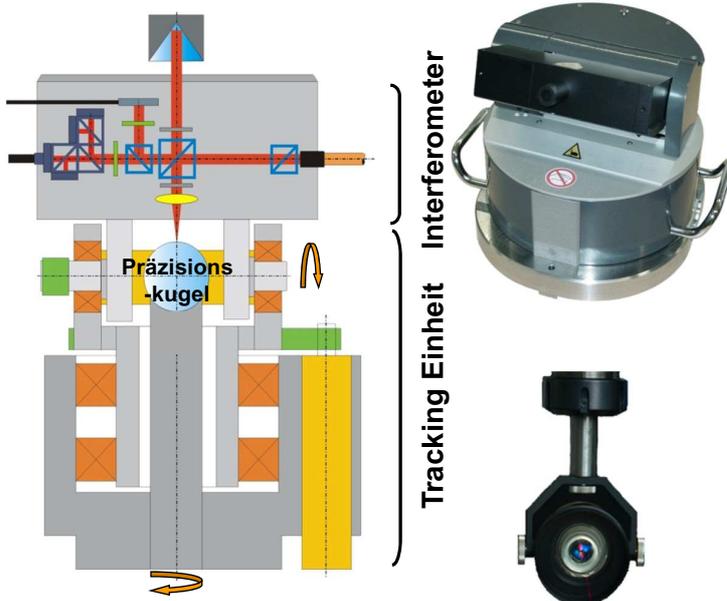
1 Forschungsfeld

2 Korrekturansatz

3 Volumetrische Vermessung thermischer Verlagerungen

4 Ausblick

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 m³ ca. 2 h

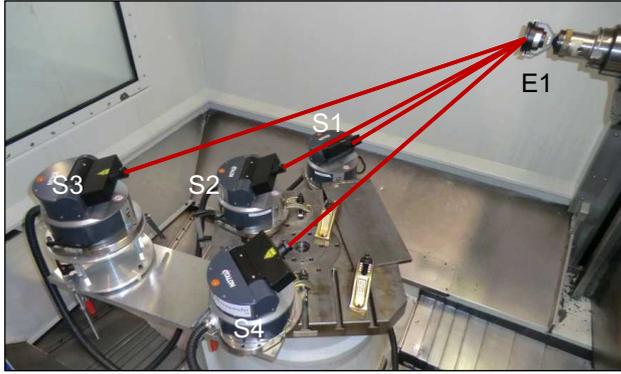
Möglichkeiten

- Genauigkeit: 0,2 μm + 0,3 μm/m
- Kompletter Arbeitsraum kann vermessen werden

Grenzen

- Sichtkontakt notwendig
- Großer Raumbedarf
- ~100.000 €

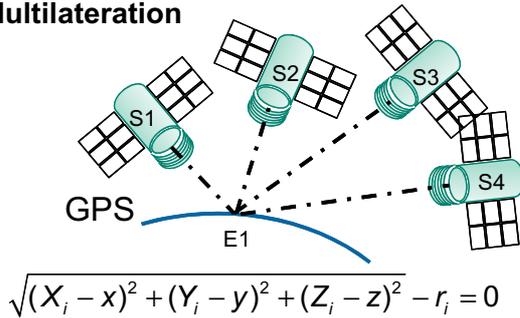
LaserTracer



LaserTracerMT



Multilateration



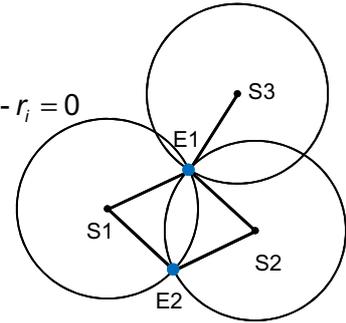
2-dimensionaler Fall:

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

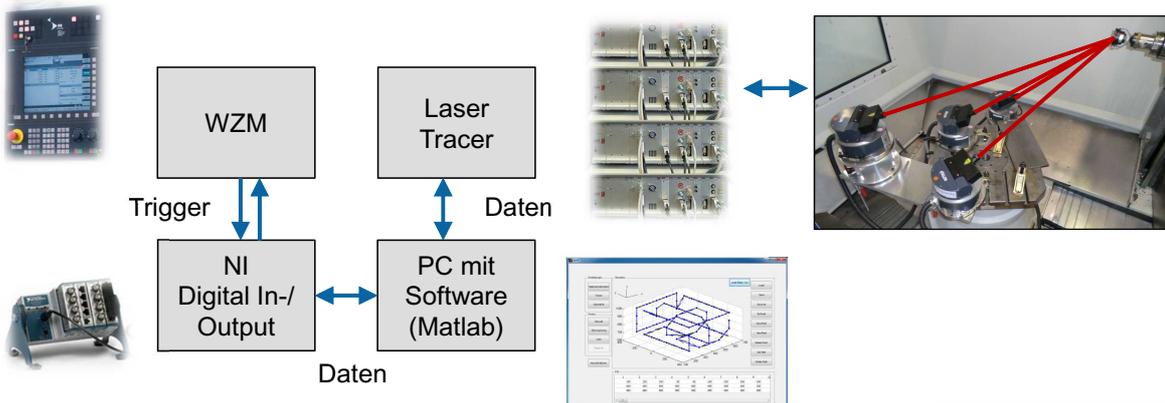
X_i, Y_i : Position S_i

x_j, y_j : Position E_j

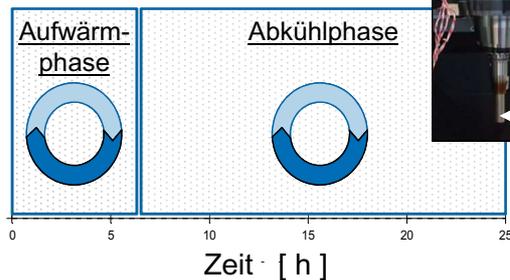
r_i : Strecke $\overline{S_i E_i}$



Volumetrische Vermessung thermischer Verlagerungen



- Kommunikation über Triggersignale
→ Breites Einsatzspektrum
- Messung kann durch erneutes Anvisieren auch bei Strahlunterbrechungen fortgesetzt werden



Versuchsaufbau für eine volumetrische Vermessung

Automatisierte Aufnahme volumetrischer Verlagerungen

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
350	250	350	50	-150	-250	-350	-250	350	50
600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
600	600	600	600	600	600	600	600	600	600

Berechnung von 3D-Verlagerungen sowie Bestimmung d. 21 (18) Fehlerparameter

```

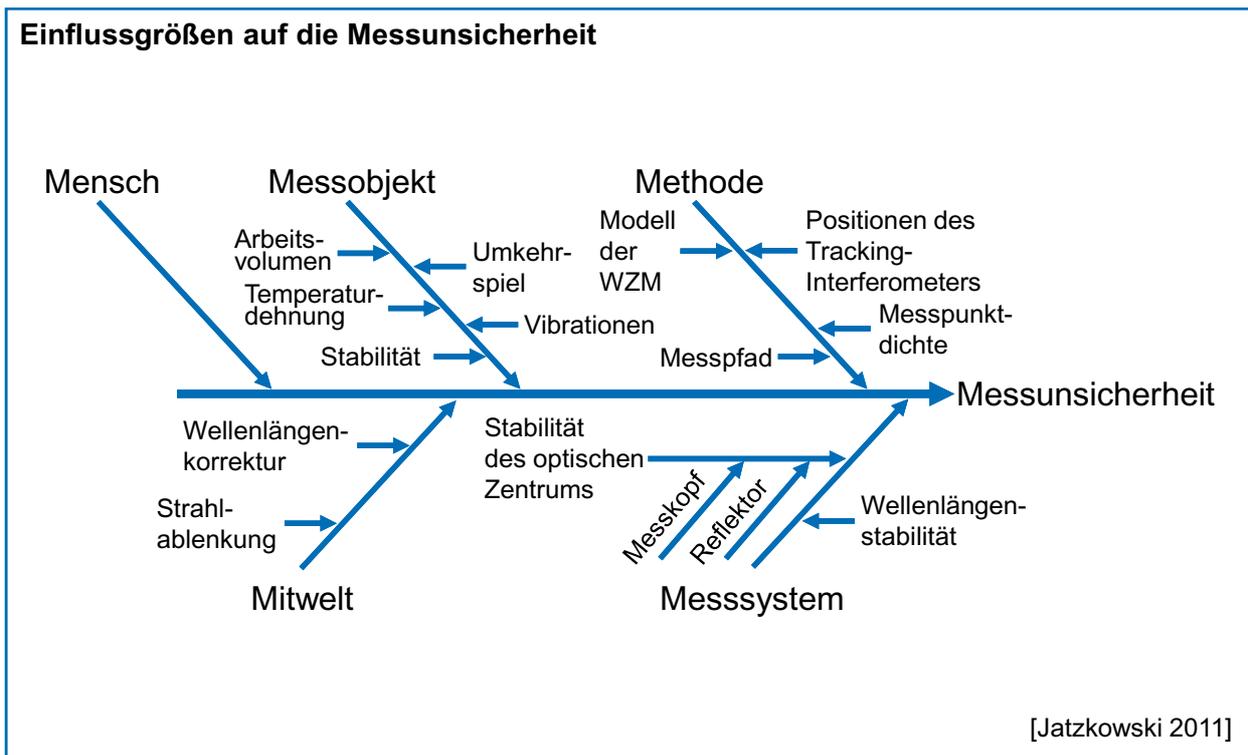
//proprio.mex
[t, dev, densid, inliers, outliers] = gpr_3d_timeline(id,data);
h.\3\Procedure_21.m
    
```

Iteration	Func-count	f(x)	Norm of step	First-order optimality	CG-iterations
0	497	642.032		3.09e+05	
1	994	0.048999	0.288389	0.992	0
2	1491	0.000117901	0.259117	0.0396	0
3	1988	0.63077e-05	0.154921	0.0213	0
4	2485	5.53906e-05	0.0366668	0.00123	0
5	2982	5.53906e-05	0.0312298	0.000397	0
6	3479	5.53906e-05	0.00780746	1.3e-05	0
7	3976	5.53906e-05	0.00392186	2.3e-05	0

Darstellungsmöglichkeiten zur Analyse des thermoelastischen volumetrischen Maschinenverhaltens

Parametrierung des eigenschaftsmodellbasierten Korrekturmodells

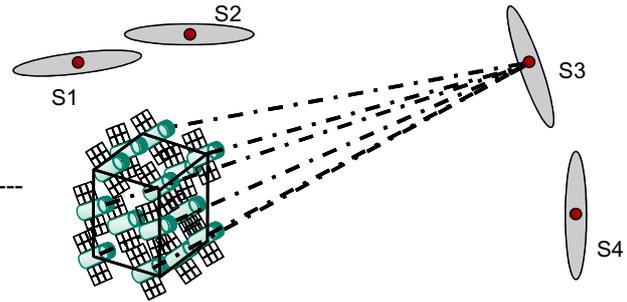
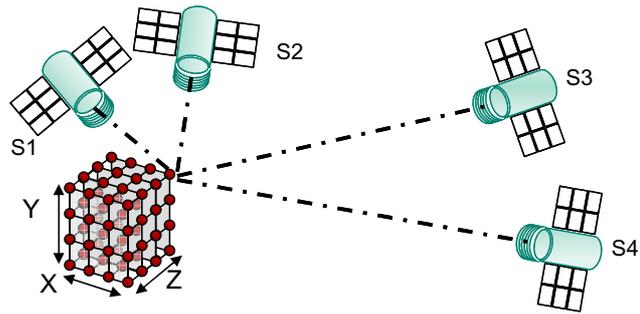
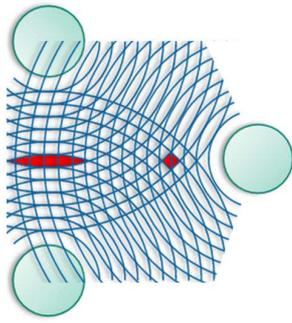
Messsoftware



[Jatzkowski 2011]

Messunsicherheit für eine volumetrische Vermessung

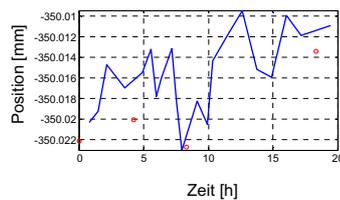
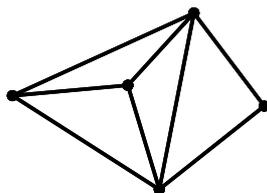
Messunsicherheit



- Auflösung Interferometer: $0,001 \mu\text{m}$
 - 95% Konfidenzintervall Längenmessung:
 $\sim U_{k=2} = 0,2 \mu\text{m} + 0,3 \mu\text{m}/\text{m}$
 - Stabilität Referenzkugel: $\pm 1 \text{K} \rightarrow \pm 0,1 \mu\text{m}$
-
- 95% Konfidenzintervall Multilateration ohne Modellannahme: $\sim 7\text{-}18 \mu\text{m}$
 - 95% Konfidenzintervall bei Annahme eines Maschinenmodells: $\sim 2 \mu\text{m}$

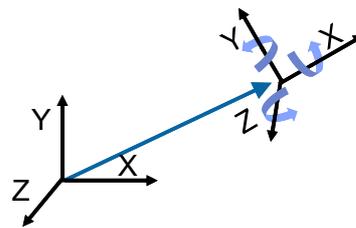
Einfluss der Messstrategie auf die Unsicherheit

Freier Netzausgleich



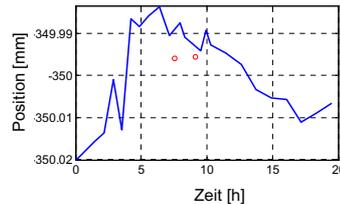
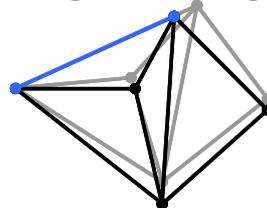
- Tracerpositionen: $\sim 20 \mu\text{m}$
- Reflektorpositionen: $\sim 1\text{-}6 \mu\text{m}$
- Nur relative Verlagerungen zwischen Messpunkten messbar

Helmert Transformation



- Überlagerung der Einzelmessung durch Helmerttransformationen
- Fixpunkte bilden die relativen Lagen der 4 Lasertracer

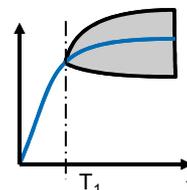
Bedingter Netzausgleich



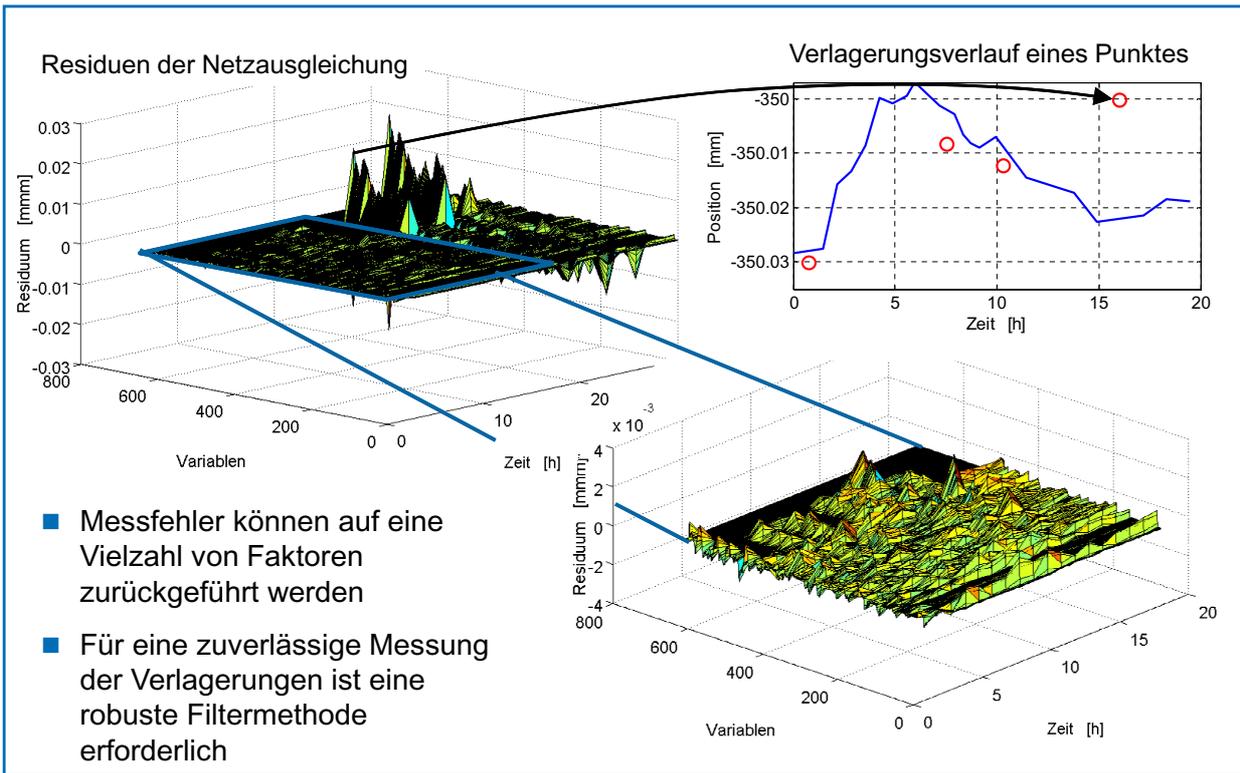
- Tracerpositionen: $\sim 20 \mu\text{m}$
- Reflektorpositionen: \uparrow
- Absolutverlagerungen der Reflektoren messbar

Zeitreihenanalyse

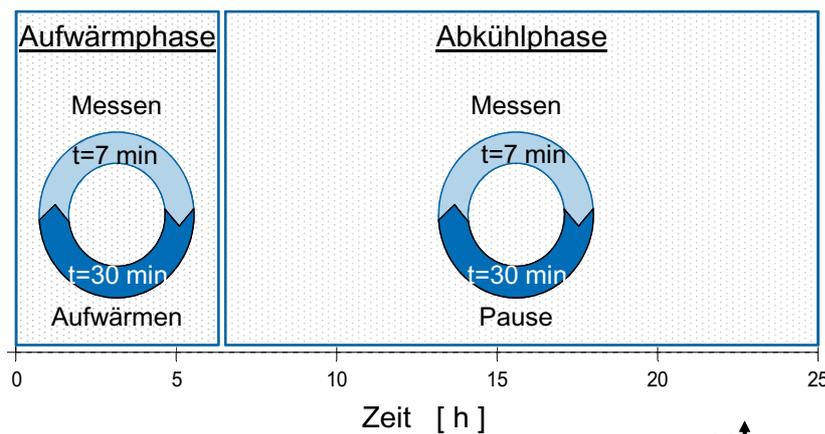
- Einbezug eines Prognosemodells



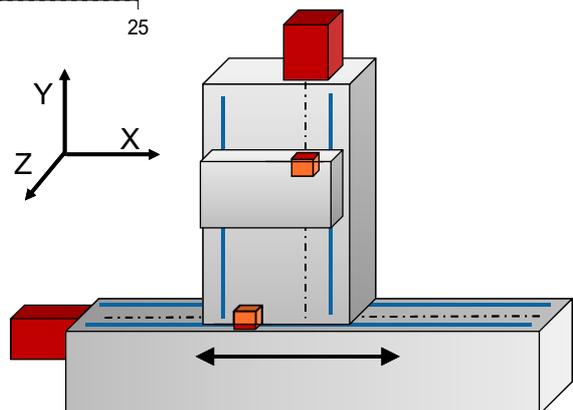
Auswertung



Robuste Berechnungsmethode

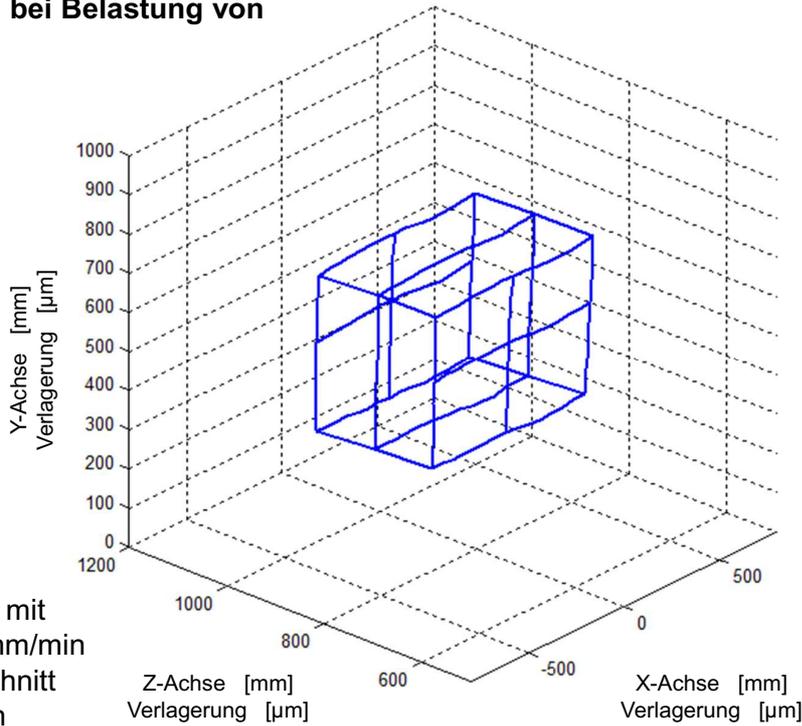


- Belastung der X-Achse während der Luftschritte mit $\varnothing 1350$ W
- Geschwindigkeit: 30.000 mm/min
- Verfahrensweg: +/- 350 mm



Beispielmessung

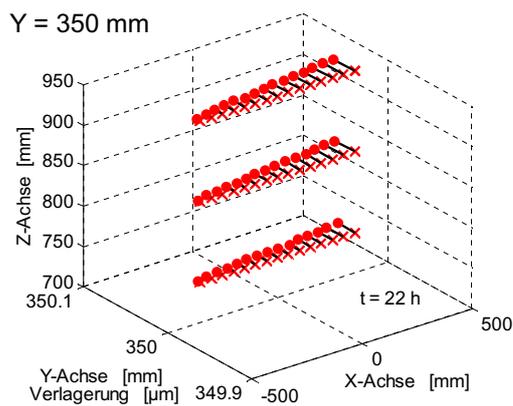
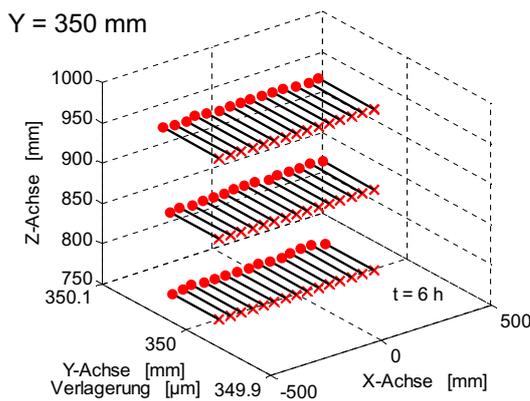
Verlagerung bei Belastung von X+Y-Achse



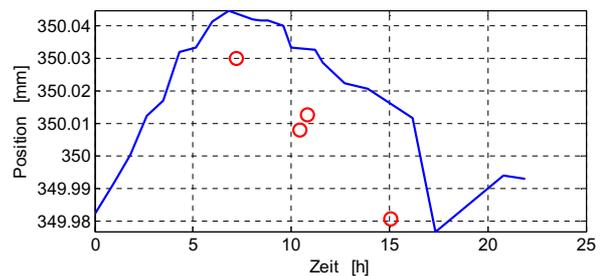
- Diagonal mit 25.000 mm/min im Luftschnitt verfahren

Beispielmessung

Relative Verlagerungen in der XZ-Ebene in Y-Richtung



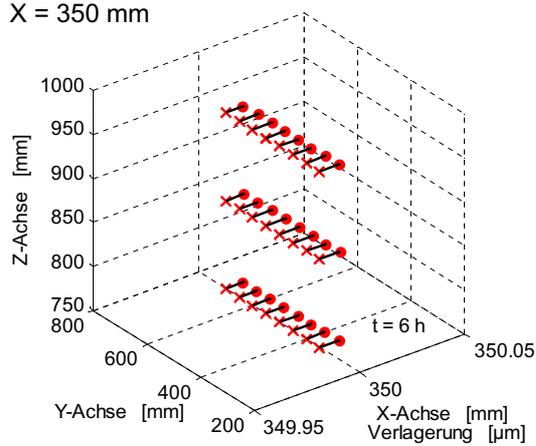
- Gleichmäßiges Ständerwachstum über einen Betrag von 60 µm
- Ständer verlagert sich an der Antriebsseite (X+) langsamer zurück



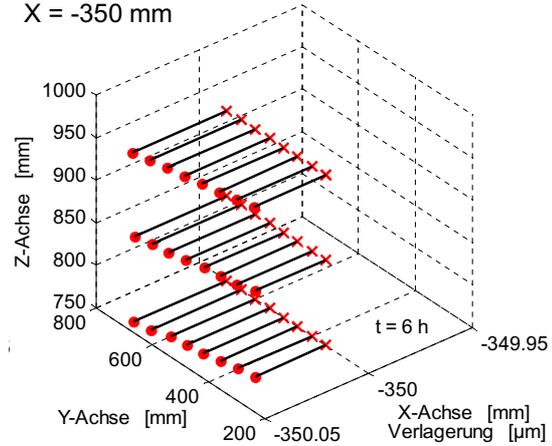
Beispielmessung X-Achsbelastung

Relative Verlagerungen in der YZ-Ebene in X-Richtung

X = 350 mm



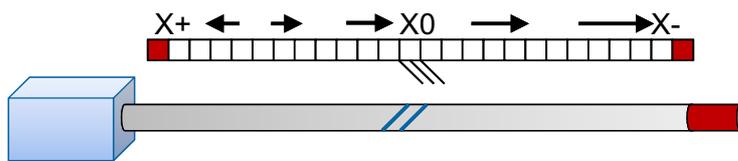
X = -350 mm



- Verlagerungen in negative X-Richtung nehmen mit Abstand zur Festlagerseite zu.
- Innerhalb der YZ-Ebene ist die Verlagerung nahezu konstant

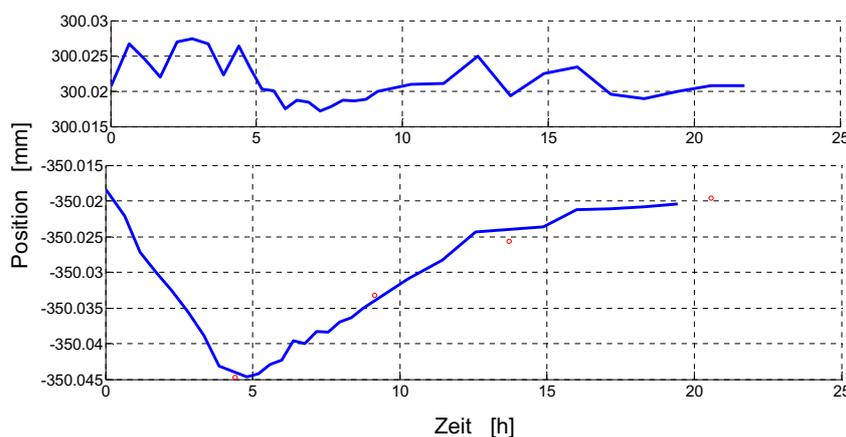
Beispielmessung X-Achsbelastung

Achsaufbau



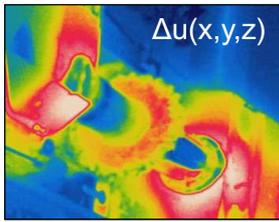
- Verlagerungen in negative X-Richtung nehmen mit Abstand zur Festlagerseite zu.
- Innerhalb einer YZ-Ebene ist die Verlagerung nahezu konstant
- Typisches Verhalten für eine Regelung über den Drehgeber des Antriebs
- Linearmaßstab ist aktiv (Ausdehnungskoeffizient $\sim 8 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$)

Verlagerungen für verschiedene X-Positionen

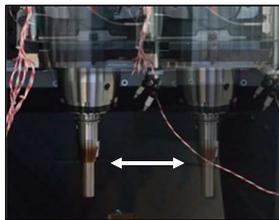


Beispielmessung X-Achsbelastung

Agenda

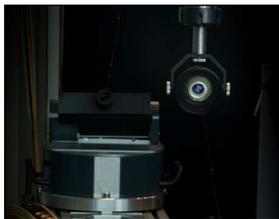


1 Forschungsfeld

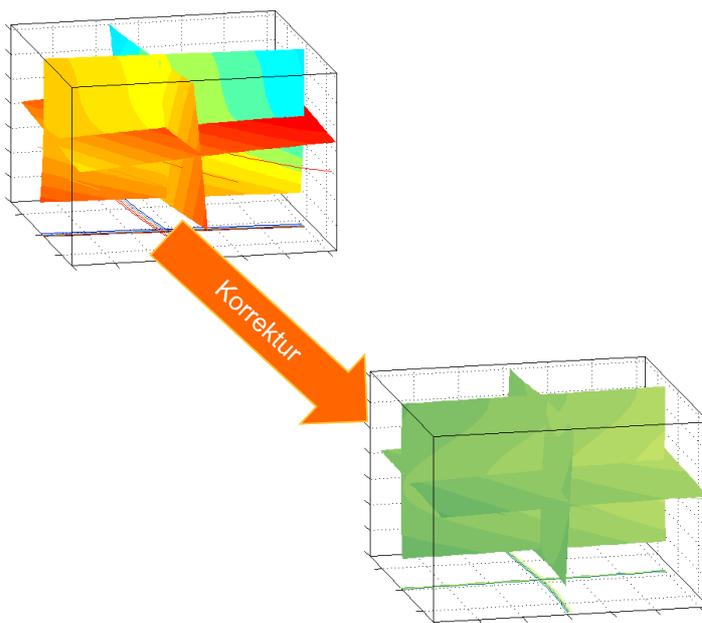


2 Korrekturansatz

3 Volumetrische Vermessung thermischer Verlagerungen



4 Ausblick



- Durchführung weiterer Messreihen mit Belastung der Achsen
- Kalibrierung der Tracerpositionen zu Beginn der Messung
- Einbezug eines thermischen Verlagerungsmodells in die Berechnung zur Verbesserung der Genauigkeit
- Entwicklung, Validierung und Vergleich von volumetrischen Korrekturmodellen für thermoelastische TCP-Verlagerungen

Temperatur- und Verlagerungsmessung an einem Versuchsträger mittels selektiver Thermografie und Nahbereichsphotogrammetrie

K. Großmann, M. Merx, M. Riedel; Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, TU Dresden

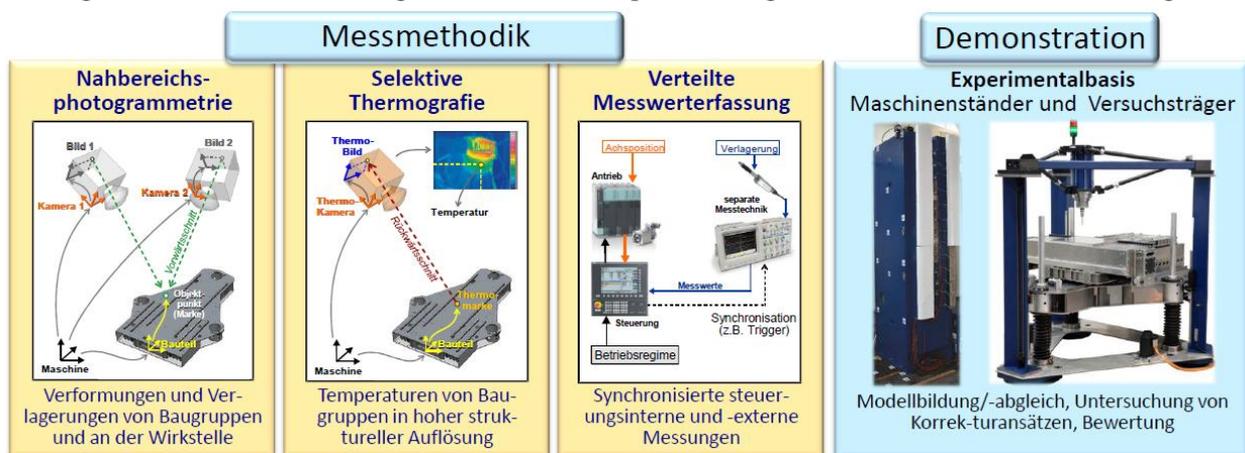
Das thermo-elastische Verhalten hat an modernen Werkzeugmaschinen vielfach einen dominanten Einfluss auf die erreichbare Bearbeitungsqualität. Mit dem Einsatz von Verfahren zur Kompensation bzw. Korrektur der thermisch bedingten Wirkpunktabweichungen soll bei weiterer Steigerung der Produktivität die Bearbeitungsqualität erhalten oder sogar gesteigert werden können. Die Analyse der Maschinen (Ausgangszustand) und die Auslegung und Bewertung der Korrektur- und Kompensationsverfahren erfordert experimentelle Untersuchungen. Hierzu wird im SFB/TR 96 eine neuartige Messmethodik entwickelt, welche die Analyse von Werkzeugmaschinen entlang ihrer thermischen Wirkungskette verbessert indem:

- der Zeitaufwand für Vorbereitung und Durchführung von Messungen verringert,
- die begrenzte Strukturauflösung der Temperatur- und Verformungsmessung erhöht und
- ein Bezug zwischen steuerungsintern und -extern verfügbaren Messdaten hergestellt wird.

Zur Erfassung von Temperaturfeldern mit hoher struktureller Auflösung bedient sich die Messmethodik der selektiven Thermografie. Die Temperaturmessung erfolgt auf an der Struktur applizierten Messpunkten (aufgeklebte Papiermarken), welche definierte Emissionseigenschaften aufweisen. Diese Messpunkte sind zudem im sichtbaren (optischen) Spektralbereich gekennzeichnet und ggf. codiert, so dass sie mittels photogrammetrischer Verfahren automatisch erfasst werden können (siehe „Selektive Thermografie“ im Bild unten). Über die bekannte relative Orientierung (Abstand und Winkel) der optischen zur thermografischen Kamera erfolgt die Zuordnung der Temperaturinformationen zu den im optischen Bild identifizierten Messpunkten. Diese Zuordnung funktioniert auch bei einer Relativbewegung von Kamera(s) und Objekt.

Zudem kann mittels abgestimmter photogrammetrischer Messkonfigurationen eine hochauflösende berührungslose Verlagerungs- und Deformationsmessung auch an bewegten Baugruppen realisiert werden (siehe „Nahbereichsphotogrammetrie“ im Bild unten). Die in der Maschinensteuerung verfügbaren Daten werden ebenfalls aufgezeichnet, mit den außerhalb der Steuerung gewonnenen Messdaten synchronisiert (siehe „Verteilte Messwerterfassung“ im Bild unten) und schließlich zur Auswertung herangezogen.

Die neuartige Messmethodik soll im Rahmen des SFB/TR 96 im Teilprojekt C06 an einem spezifischen Versuchsträger in Leichtbauweise evaluiert werden. Im vorliegenden Beitrag werden schwerpunktmäßig die Grundlagen der selektiven Thermografie und eine Beispielmessung an einem Maschinenständer vorgestellt.



Kontakt

Dipl.-Ing. Marcel Merx
 TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
 01062 Dresden
 Tel.: 0351 – 463 33613
 E-Mail: marcel.merx@tu-dresden.de

Temperatur- und Verlagerungsmessung an einem Versuchsträger mittels selektiver Thermografie und Nahbereichs-Photogrammetrie

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

1

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

4 Thermografische Temperaturmessung

4.1 Versuchsaufbau mit Maschinenständer

4.2 Bildaufnahme

4.3 Auswertung im Photogrammetrie-Toolkit

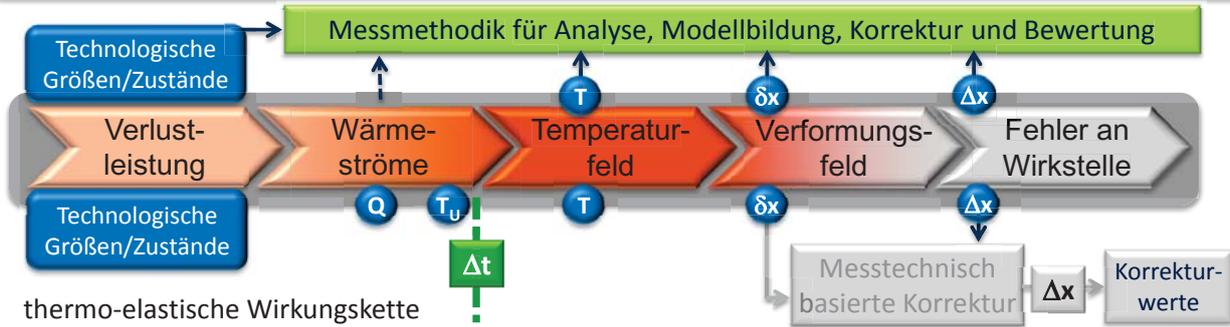
4.4 Versuchsergebnisse

5 Photogrammetrische Verlagerungsmessung

6 Zusammenfassung und Ausblick

1 Motivation und Zielstellung

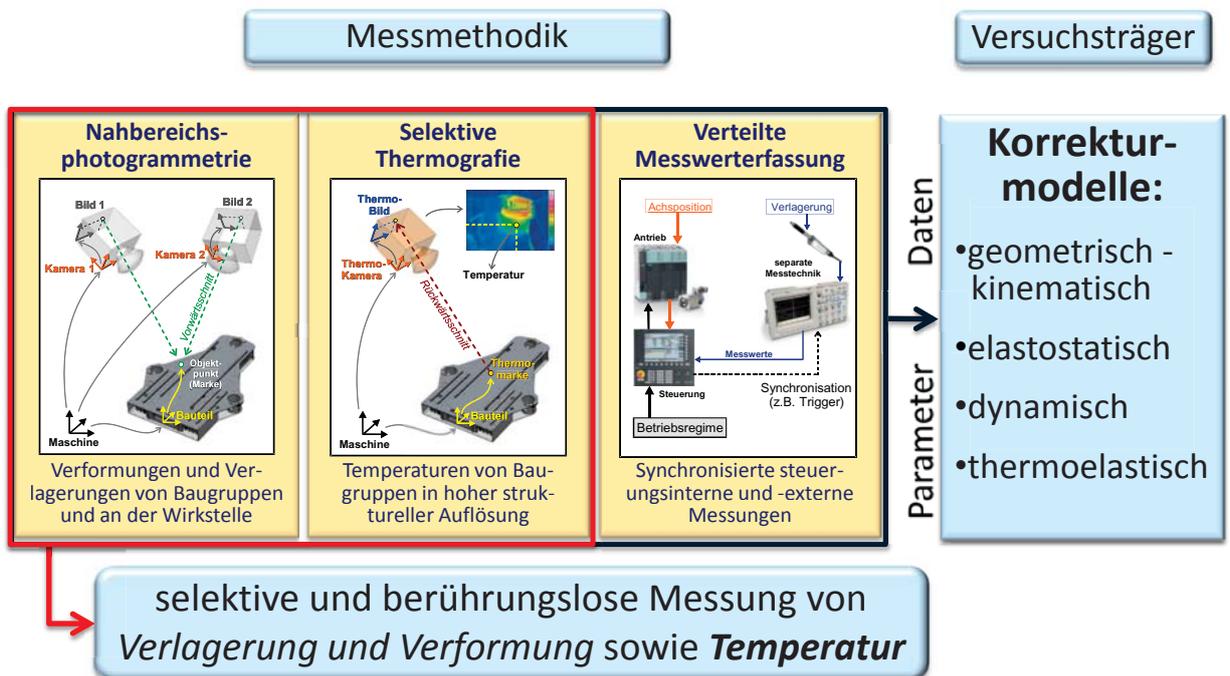
Teilprojekt C06: „Messtechnische Erfassung von verhaltens- und betriebszustandsrelevanten Größen entlang der thermischen Wirkungskette für Analyse, Bewertung, Simulation und Korrektur (...)“



- gegenwärtige Hauptdefizite**
- erheblicher Zeitaufwand zur Instrumentierung & Messung von δx , Δx , 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. Δx)**
 - **spezifische, optimierte, messtechnisch basierte Korrekturansätze**

1 Motivation und Zielstellung

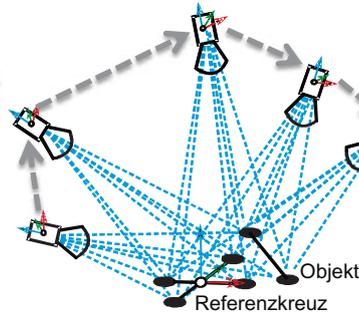


2 Grundlagen

2.1 Nahbereichs-Photogrammetrie



Quelle: Aicon



Quelle: Aicon

Quelle: Nikon

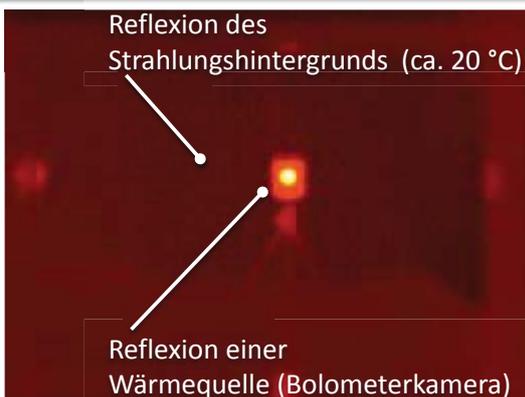


	Bündeltriangulation	Stereobildauswertung
Kameraanzahl	1 (meist)	2 - 3
Blickfeld	variabel	variabel oder fest
Kalibrierung	Selbstkalibrierung	separater Kalibrierschritt / vorkalibriert
Messunsicherheit	$\pm 2 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$ (RMS)* $\pm 3 \mu\text{m} + 7 \mu\text{m}/\text{m}$ (3 Sigma)*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

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 ϵ 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 ΔT_{Oberfl} bei $\epsilon = \text{const.}$
- \rightarrow thermografische Temperaturmessung auf **definierter Oberfläche** = „Marke“

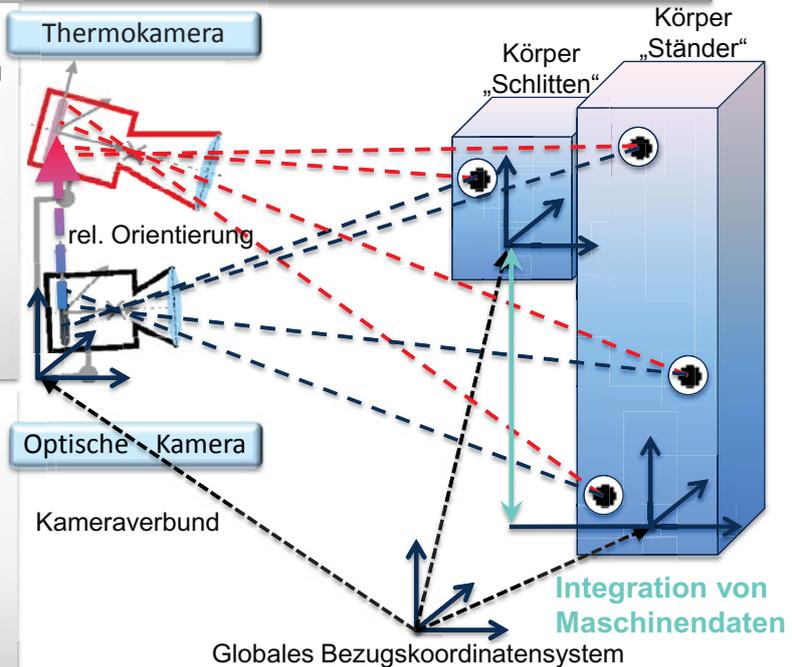


3 Selektive Thermografie

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) und Verlagerung (δx bzw. Δx) vorhanden
- allgemeines 3D-Modell mit bewegten Objekten (Kameras und Körper)

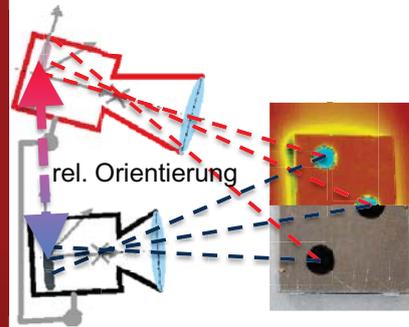
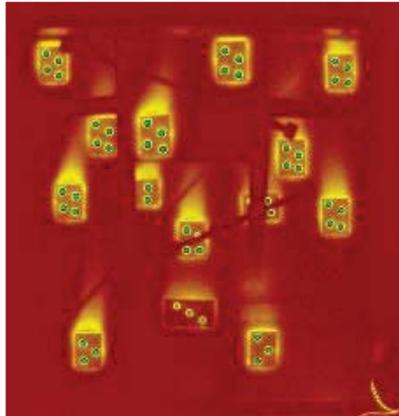
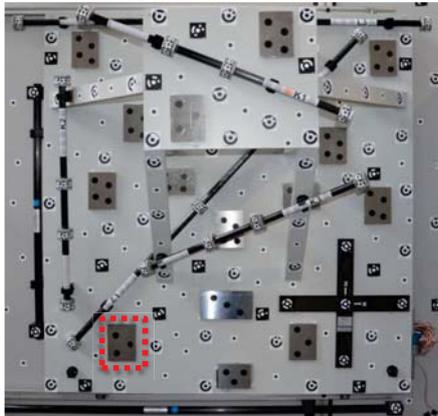


3 Selektive Thermografie

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 gering)
- möglichst gesamtes Sichtfeld der Kameras mit Marken abdecken

3 Selektive Thermografie



3.3 Erweitertes Kalibrierfeld u. Ablauf der Kalibrierung

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

4 Thermografische Temperaturmessung

Werkzeugmaschinenständer

4.1 Versuchsaufbau mit Maschinenständer

- Maschinenständer (Grauguss)
- Emulation P_{Verlust} der Gleitführung (1400 ... 2800 W/m²) durch Heizung



4 Thermografische Temperaturmessung

Werkzeugmaschinenständer

4.1 Versuchsaufbau mit Maschinenständer

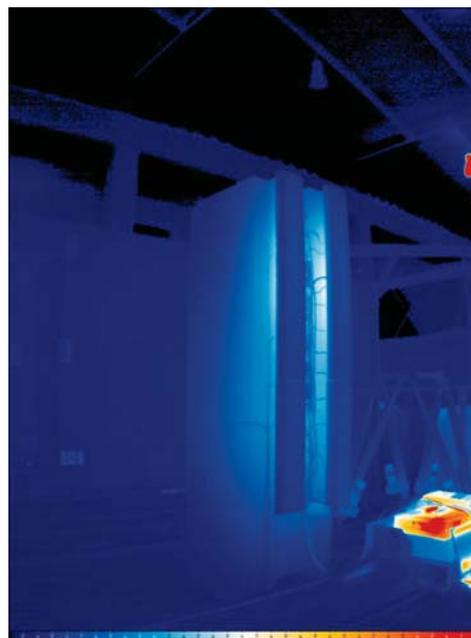
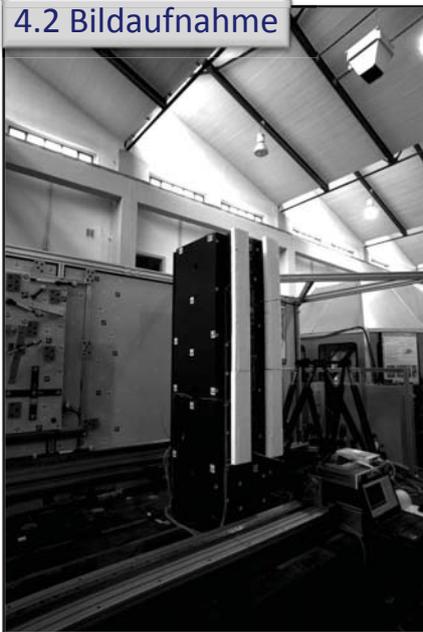
- Maschinenständer (Grauguss)
- Emulation P_{Verlust} der Gleitführung ($1400 \dots 2800 \text{ W/m}^2$) durch Heizung
- Lastkollektiv: *1h 44min untere* 7x2, anschließend *1h 5min obere* 7x2 Heizfolien eingeschaltet (1400 W/m^2)
- Papiermarken als Messpunkte für Deformationsmessung und selektive Thermografie ($\epsilon = 0,9 \dots 0,95$)
- taktile Temperaturmessung (Pt100)
- Deformationsmessung (photogrammetrisch; u.a. Kamera am Ständer)



Ablauf thermograf. Messung: Kameraverbund positionieren
 → Foto aufnehmen (PC-1) → Thermobild aufnehmen (PC-2)

4 Thermografische Temperaturmessung

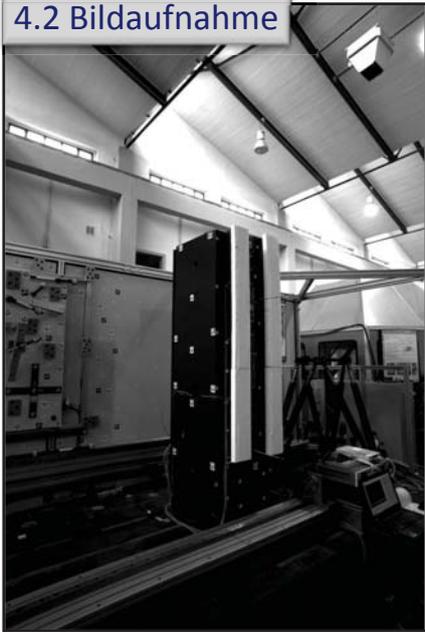
4.2 Bildaufnahme



- Messung an 17 codierten Marken an 3 Ständerseiten
- Temperaturdaten als ASCII
- 80 Aufnahmeepochen (2h 50min)

4 Thermografische Temperaturmessung

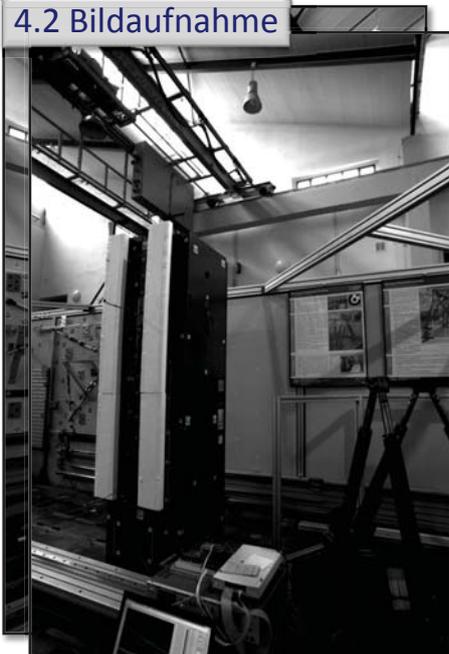
4.2 Bildaufnahme



- Messung an 17 codierten Marken an 3 Ständerseiten
- Temperaturdaten als ASCII
- 80 Aufnahmeepochen (2h 50min)

4 Thermografische Temperaturmessung

4.2 Bildaufnahme



- Messung an 17 codierten Marken an 3 Ständerseiten
- Temperaturdaten als ASCII
- 80 Aufnahmeepochen (2h 50min)

4 Thermografische Temperaturmessung

4.2 Bildaufnahme



- Messung an 17 codierten Marken an 3 Ständerseiten
- Temperaturdaten als ASCII
- 80 Aufnahmeepochen (2h 50min)

SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

4 Thermografische Temperaturmessung

4.3 Auswertung im Photogrammetrie-Toolkit

Optisches Bild mit erkannten Marken

Profil_06029
 Mittel: 0,39
 Max: 0,45
 Anz: 11
 Sigma: 0,02

Residuen (Pixel):
 Mittel: 0,29
 Max: 0,43
 Anz: 09
 Sigma: 0,02

Residuen (Pixel):
 Mittel: 0,09
 Max: 0,09
 Anz: 09
 Sigma: 0,00

Epochen
 Epoch 48
 Mittel: 0,398
 Max: 0,565
 Anz: 098
 Sigma: 0,018

Epoch 48
 Mittel: 0,49
 Max: 0,57
 Anz: 08
 Sigma: 0,02

Epoch 48
 Mittel: 0,398
 Max: 0,565
 Anz: 098
 Sigma: 0,018

Epoch 48
 Mittel: 0,49
 Max: 0,57
 Anz: 08
 Sigma: 0,02

Marken

Bildanzeige / Epochen

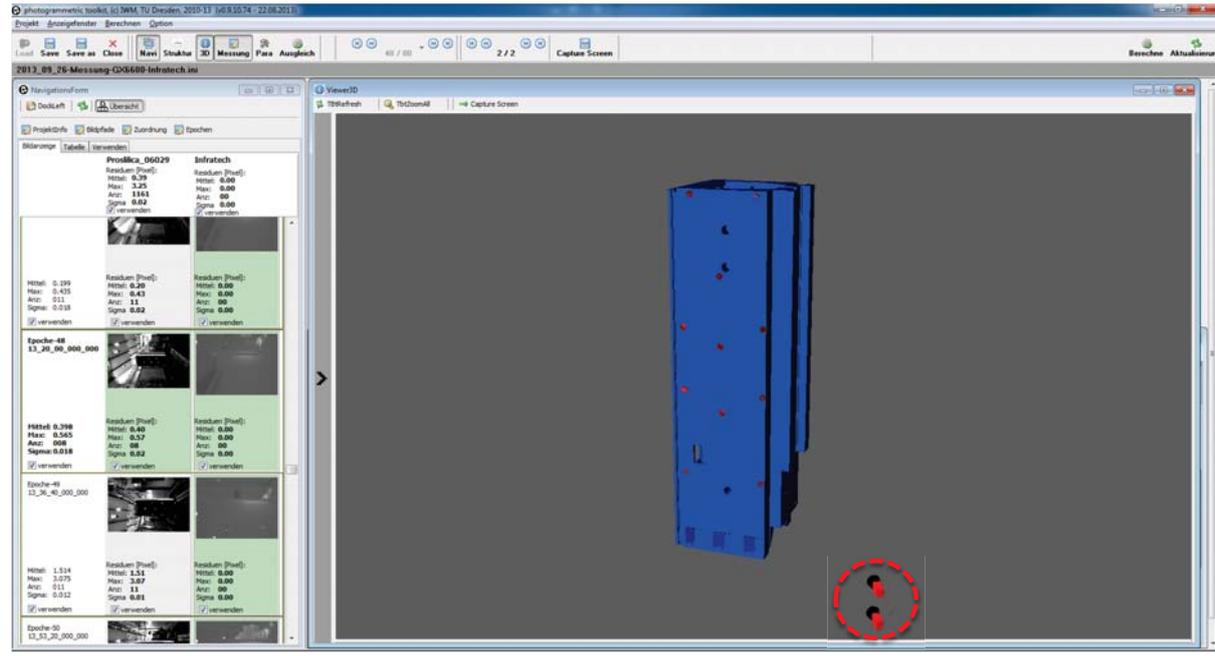
ausgewähltes Bild

SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

4 Thermografische Temperaturmessung

4.3 Auswertung im Photogrammetrie-Toolkit

3D-Modell des Ständers mit Marken (rot)



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

4 Thermografische Temperaturmessung

4.3 Auswertung im Photogrammetrie-Toolkit

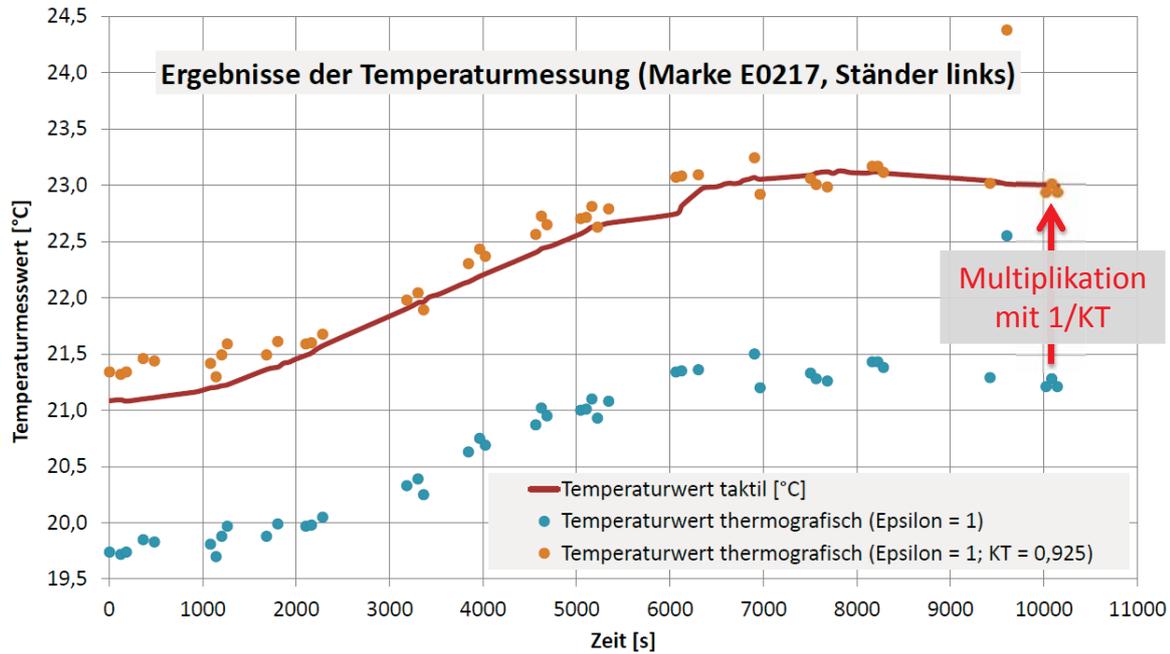
Thermobild mit projizierten Marken



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

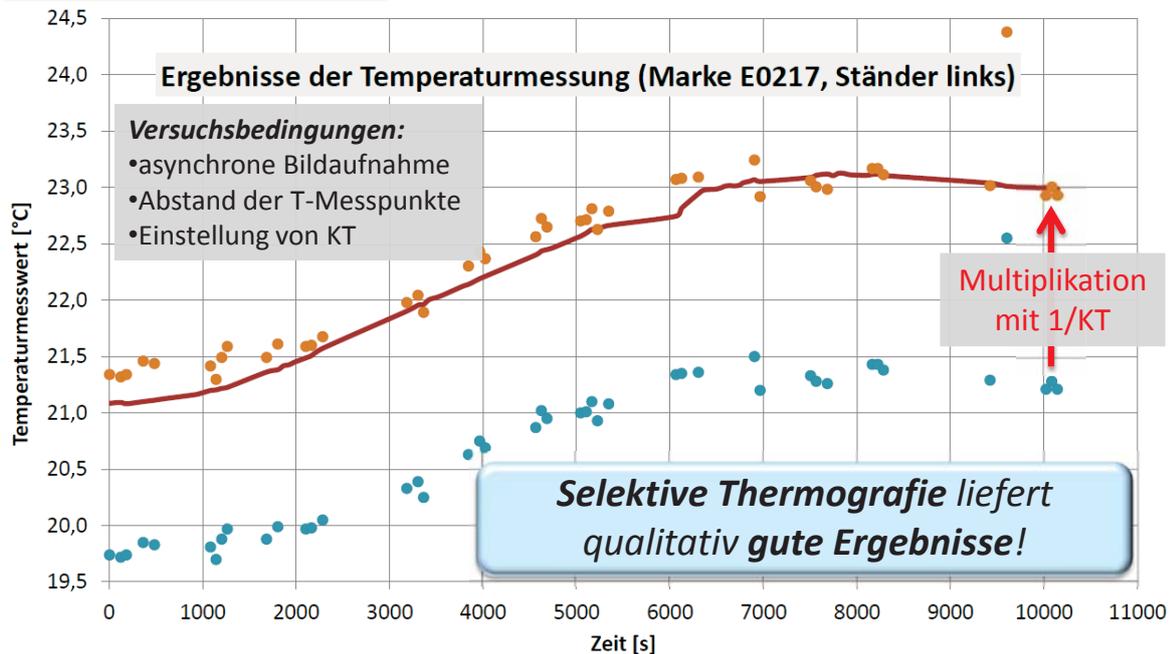
4 Thermografische Temperaturmessung

4.4 Versuchsergebnisse



4 Thermografische Temperaturmessung

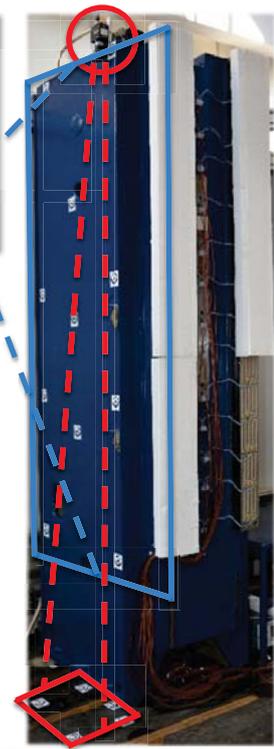
4.4 Versuchsergebnisse



5 Photogrammetrische Verlagerungsmessung

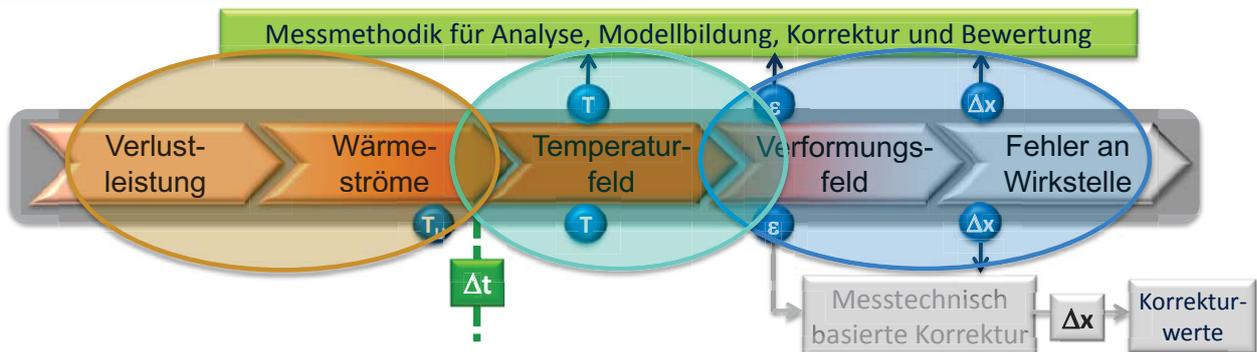
Messung am Maschinenständer

- Lastkollektiv: Beheizen der unteren 5x2 Heizfolien mit 2800 W/m²
- 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
 - Unsicherheit $\sigma_{Bild} \approx 0,01 Px$



Photogrammetrie zur Messung thermisch bedingter Deformationen einsetzbar!

6 Zusammenfassung und Ausblick

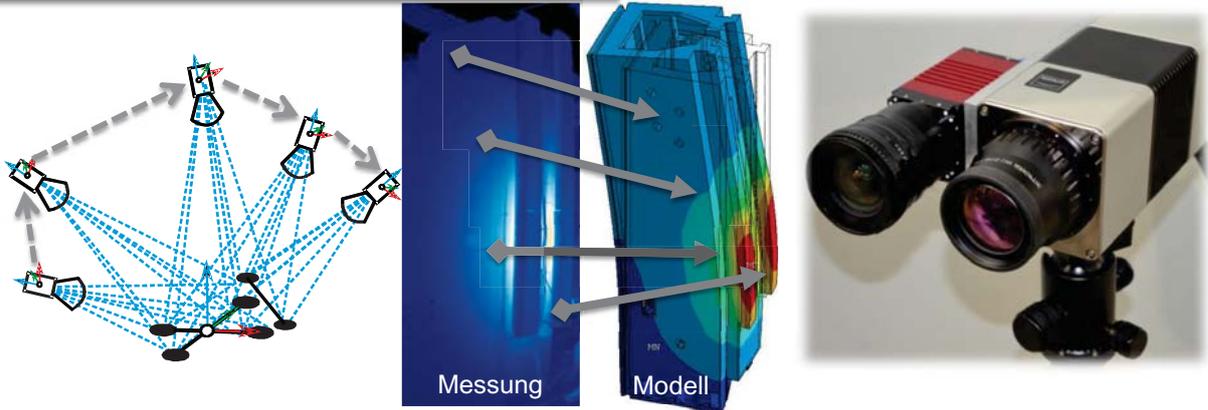


verteilte Messwerterfassung & selektive Thermografie & Photogrammetrie

Zusammenfassung
<ul style="list-style-type: none"> • Besonderheiten der thermograf. Temperaturmessg. → Maßnahmen • Selektive Thermografie als Lösung • Photogrammetrie zur Def.-Messg. • Modellabgleich wird signifikant vereinfacht und verbessert

Ausblick

6 Zusammenfassung und Ausblick

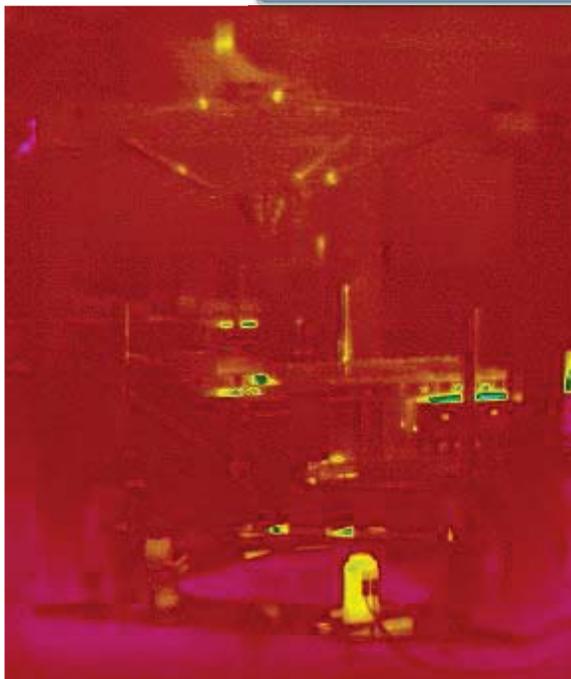


- Zusammenfassung**
- Besonderheiten der thermograf. Temperaturmessg. → Maßnahmen
 - **Selektive Thermografie** als Lösung
 - **Photogrammetrie** zur Def.-Messg.
 - Modellabgleich wird signifikant vereinfacht und verbessert

- Ausblick**
- Verfahren im Photogrammetrie-Toolkit **integrieren** (Thermokamera)
 - Verfahren **optimieren** (Marken und Temperaturkoeffizient, Kalibrierung und Kalibriertafeln → **Unsicherheit**↓)
 - Steuerungsanbindung MAX (TwinCAT)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Einsatz der Verfahren am Versuchsträger MAX



Bewertung von Verfahren zur Korrektur bzw. Kompensation thermisch bedingter Verlagerungen von Werkzeugmaschinen

R. Braun, W. Esswein; Lehrstuhl für Systementwicklung, TU Dresden

L. Neidhardt, H. Wiemer; Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, TU Dresden

Übergeordnetes Ziel des Teilprojekts ist die ganzheitliche Bewertung von Verfahren zur Korrektur bzw. Kompensation thermisch bedingter Verlagerungen von WZM. Eine solche Bewertung muss dabei auf der Einzelbewertung der relevanten, nachfolgend aufgeführten Kriterien beruhen.

- Produktqualität
- Prozessqualität
- Produktivität
- Energieeffizienz
- Kosten
- Zeitbedarf
- Verfügbarkeit
- Flexibilität

Mit den bisherigen Arbeiten wurden Modelle für die Einzelbewertung dieser Kriterien entwickelt. Zum einen wurden auf dem Weg der Recherche zu den einzelnen Bewertungskriterien Beschreibungsgrößen gefunden und zum anderen Methoden entworfen, mit denen diese ermittelt werden können.

Für die Bewertung der Produkt- und Prozessqualität sowie der Produktivität wurde ein Experiment entwickelt, mit dem benötigte Beschreibungsgrößen ermittelbar werden. Bei der Auswertung der Resultate des Experiments zur Bestimmung der Beschreibungsgrößen können Szenarien der technologischen Anwendung sowie teilweise auch der Randbedingungen beim Maschinenbetreiber berücksichtigt werden.

Die Ermittlung von Beschreibungsgrößen für die Bewertung der Energieeffizienz von WZM erfolgt auf der Basis des messtechnisch erfassten Energieverbrauchs relevanter Komponenten. Zur Bewertung des Kostenkriteriums wird recht detaillierte Erfassung unterschiedlicher Bestandteile erforderlich. Um dabei einen Rahmen vorzugeben, soll eine Orientierung an den Phasen des Produktlebenszyklus erfolgen, wobei innerhalb der Phasen Entstehung, Betrieb und Verwertung für verschiedene Bereiche Komponenten-, Infrastruktur und Arbeitskosten erfasst werden müssen. Das Vorgehen für die Ermittlung des Zeitbedarfs ist ähnlich aufgebaut.

Zur Bewertung des Kriteriums der Verfügbarkeit werden Daten zur Ausfallwahrscheinlichkeit sowie zur Dauer von Reparaturen herangezogen. Ob dabei für die in der Zukunft zu untersuchenden Korrektur- bzw. Kompensationsverfahren alle notwendigen Beschreibungsgrößen vorhanden sind, muss sich noch zeigen.

Ein Einfluss von Verfahren zur Korrektur bzw. Kompensation thermisch bedingter Verlagerungen von WZM wird sich erwartungsgemäß außer durch die angestrebte Reduzierung der Fertigungsunsicherheit nicht auf die *Flexibilität* einer WZM auswirken. Die Reduzierung der Fertigungsunsicherheit wird jedoch bereits durch die Kriterien Produkt- und Prozessqualität bewertet. Aus diesem Grund wird eine Bewertung der Flexibilität vorerst nicht angestrebt.

Zu allen Bewertungskriterien wird letztlich eine skalare Einzelbewertungsgröße geliefert. Im Rahmen der Gesamtbewertung sollen stets auch alle Einzelbewertungsgrößen genannt und hinsichtlich der Einsatzszenarien gewichtet werden. Grundsätzlich erfolgt die Bewertung eines Verfahrens zur Korrektur bzw. Kompensation thermisch bedingter Verlagerungen von WZM mit Bezug zu einem Referenzzustand.

Kontakt

Dipl.-Ing. Lars Neidhardt

TU Dresden

Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik

01062 Dresden

Tel.: 0351 – 463 33907

E-Mail: lars.neidhardt@tu-dresden.de

C05 Bewertung

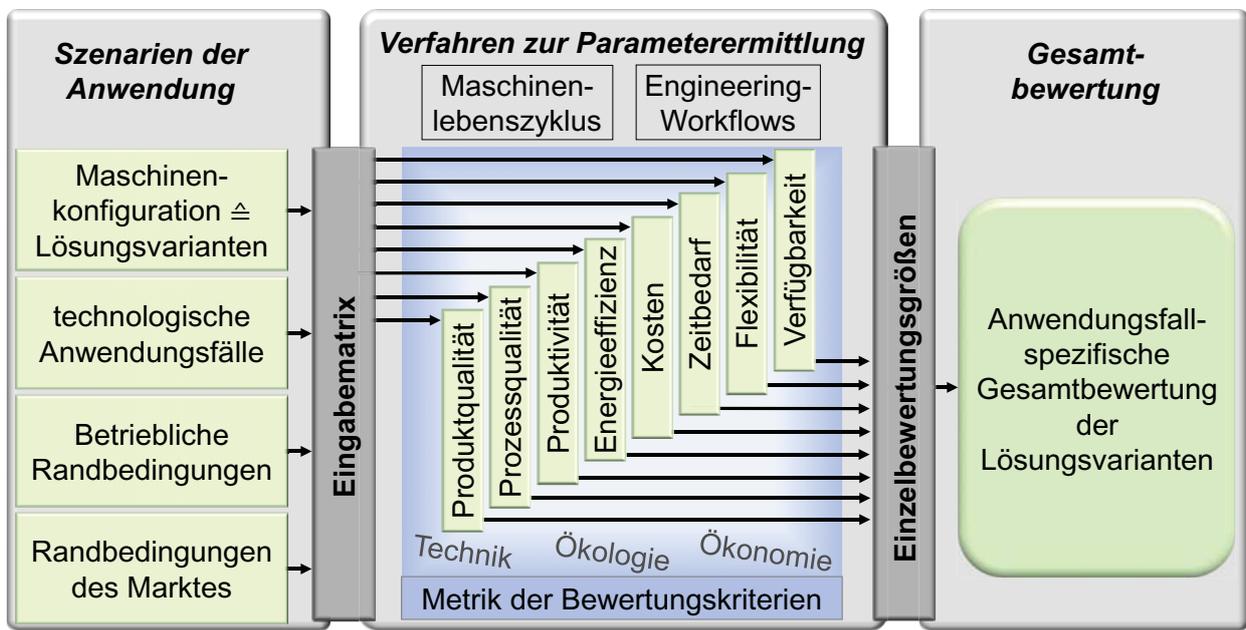
von Verfahren zur Korrektur bzw. Kompensation thermisch bedingter Verlagerungen von WZM

Richard Braun, Werner Esswein,
Lars Neidhardt, Hajo Wiemer
TU Dresden

SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

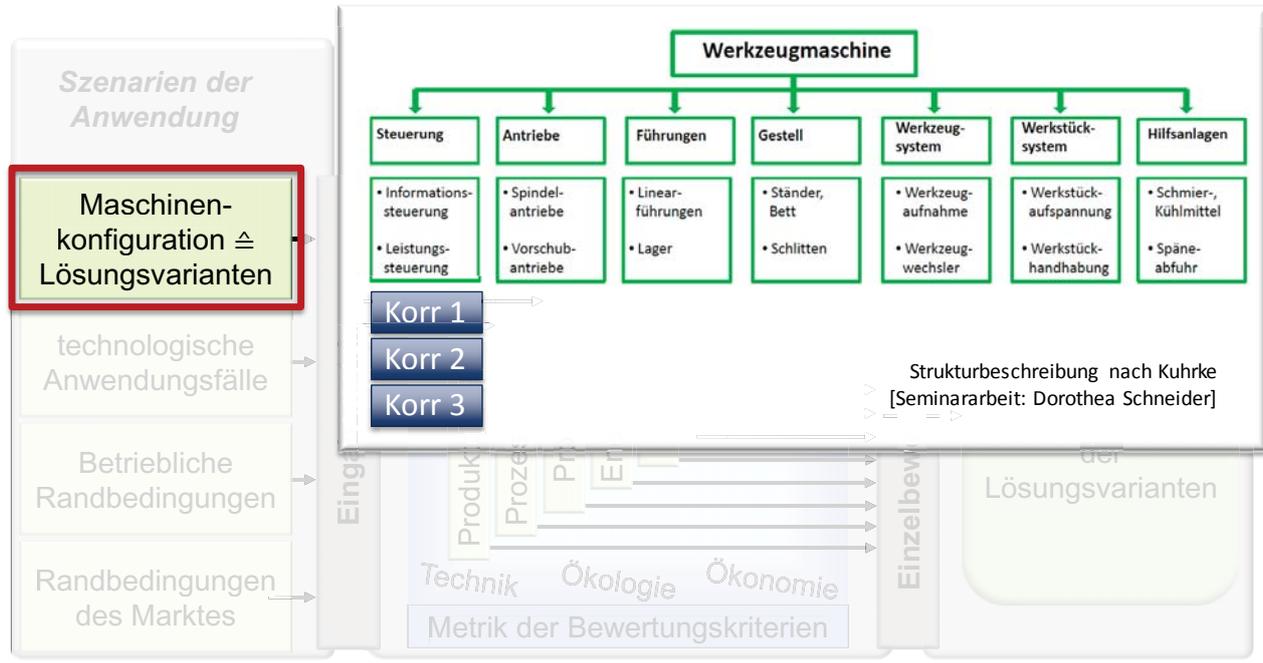
Zielstellung und Lösungsweg

Strukturierung



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Maschinenkonfiguration



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Szenarien



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Bewertungskriterien



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Kriterien

Definitionen und Beschreibungsgrößen

Produktqualität

Erfüllung der Anforderungen an das Ergebnis eines Prozesses

- Fertigungstoleranzen
- Oberflächenrauheit
- ...

Angelehnt an ISO 9000

Prozessqualität

Verhältnis zwischen den Spezifikationsgrenzen eines Qualitätsmerkmals und seiner prozessbedingten Streuung

- Fertigungstoleranzen
- Kosten
- ...

VDI/VDE 3712

Produktivität

Ausbringung pro Maschinenstunde

C. Schneeweiß: Einführung in die Produktionswirtschaft

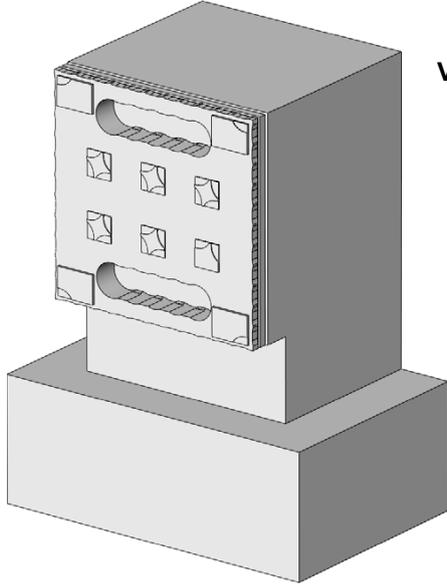
- In einer Bezugszeit produzierte Gutteile
- Nebenzeiten
- ...

SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

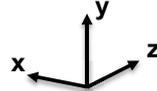
Prüfwerkstück

Ermittlung von Beschreibungsgrößen

CAD-Modell des Prüfwerkstücks



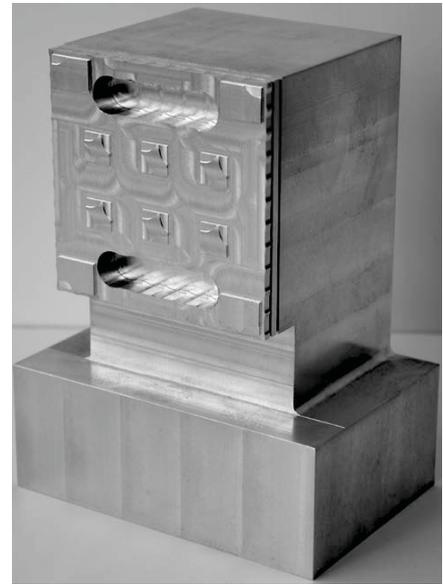
Überführung der thermisch bedingten translatorischen Verlagerungen Δx , Δy und Δz der Maschine in das gefertigte Prüfwerkstück



Das Prüfwerkstück besitzt:

- Bezugsflächen für Δx , Δy , Δz
- Formelemente zur Überführung von Δx , Δy , Δz
- Referenzierungsflächen
- Konturen zur Erfassung verschleißbedingter Änderungen des WZ-Durchmessers

Prüfwerkstück gefertigt auf HEC 630

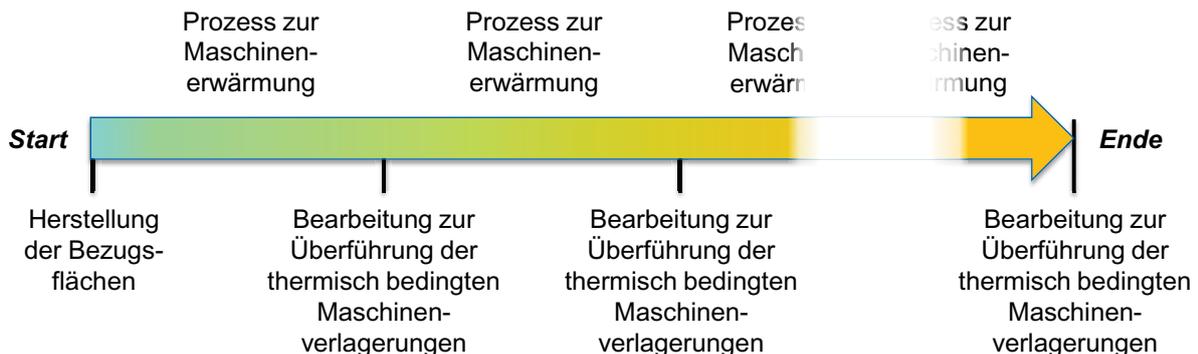


SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Versuchsablauf

Vorbereitungen

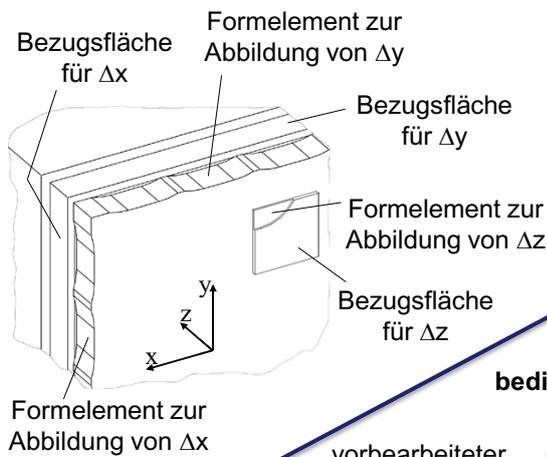
- Daten der zu untersuchenden Maschine beschaffen
- NC-Programm zur Maschinenerwärmung und Überführungsbearbeitung erstellen
- Vorbearbeiten des Prüfwerkstücks



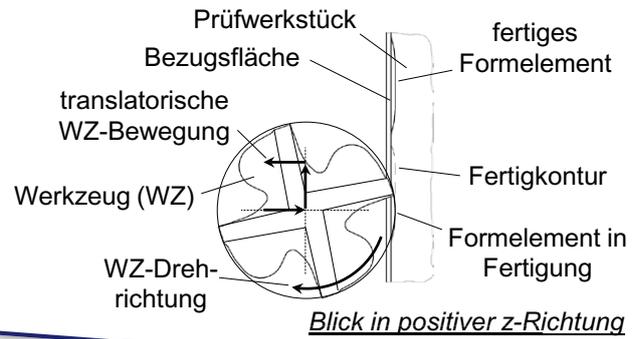
SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Prüfwerkstück

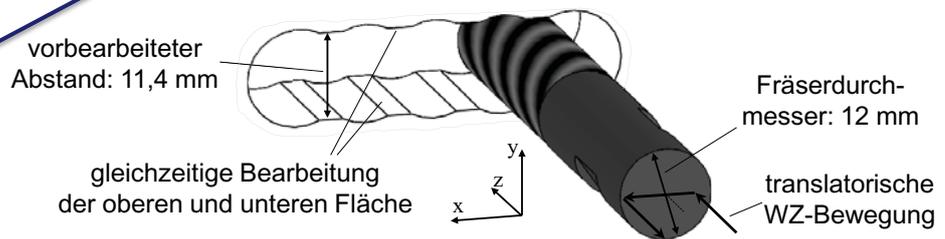
Formelemente und Bezugsflächen



Fertigung eines Formelements



Erfassung verschleißbedingter Änderungen des WZ-Durchmessers



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Prozess zur Maschinenerwärmung

Anforderung

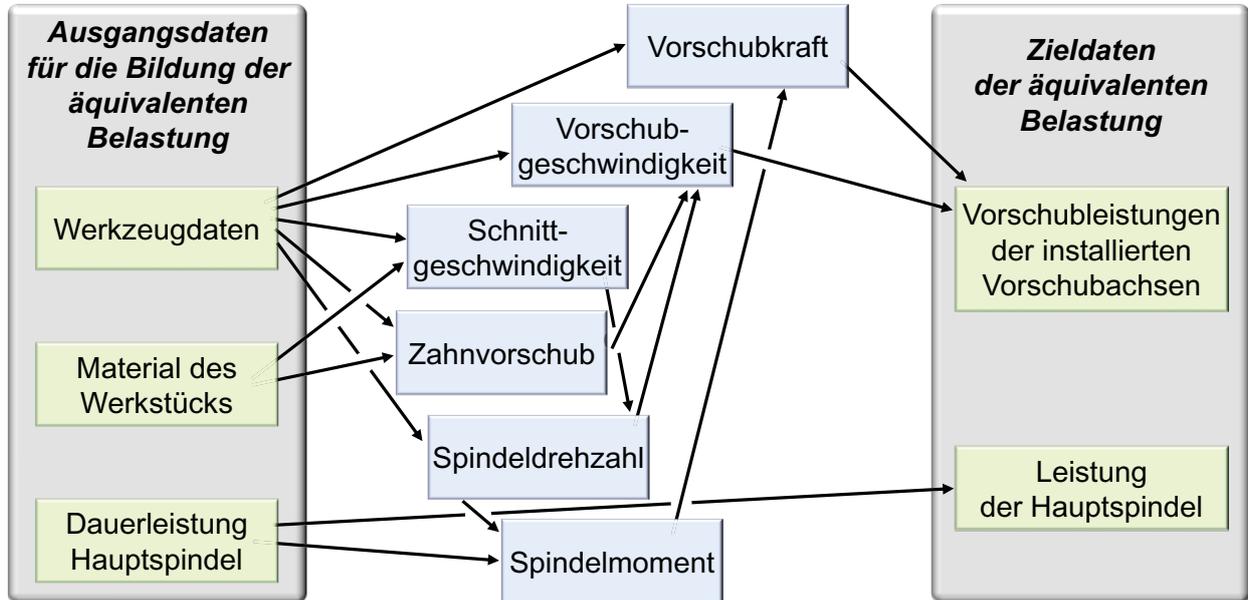
- einfach und ohne zusätzliche Einrichtungen durchführbar
- Gesamtdauer bis nahe an die Beharrung - daher ist der Energieeintrag über einen Zerspanprozess ungünstig

Lösung

- Energieeintrag über Beschleunigungsprozesse der Vorschubachsen und der Hauptspindel

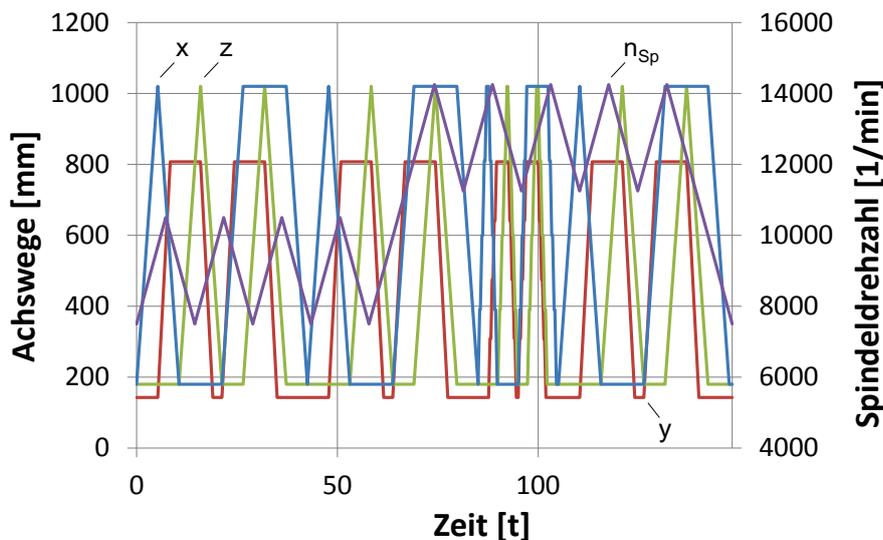
SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Ableitung der äquivalenten Belastung



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Prozess zur Maschinenerwärmung ohne Zerspanung



Hauptspindel
benötigte Daten:

Motorspindel: Trägheitsmoment

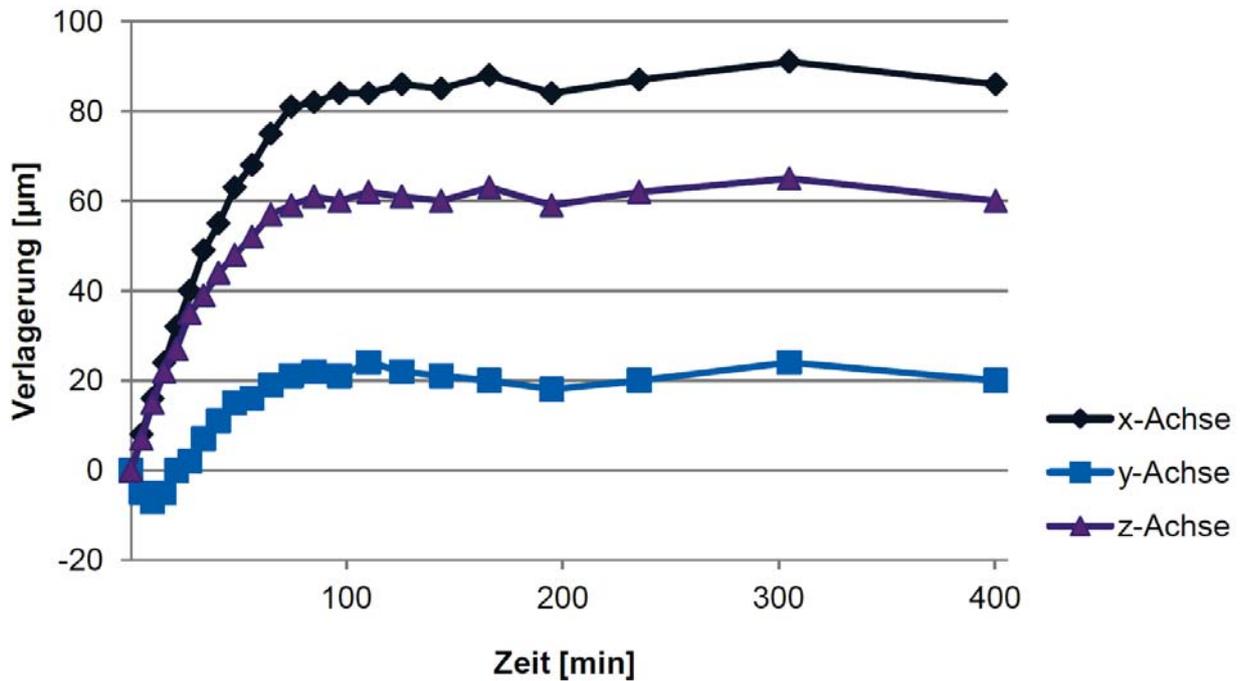
Getriebespindel: Trägheitsmomente, Übersetzungen

Vorschubachsen
benötigte Daten:

Übersetzungen, Spindelsteigungen, Kupplungsträgheit, Riemenscheibenträgheiten, Motorträgheiten, KGT-Spindelträgheiten, Tischmasse, maximaler Verfahrweg, maximale Geschwindigkeit, maximale Beschleunigung

SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Ergebnisse



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Ableitung von Einzelbewertungsgrößen aus dem Versuch

Produktqualität

- mittlerer zeitlicher Anstieg der Verlagerung in drei Zeitabschnitten

Prozessqualität

- Standardabweichung der thermisch bedingten Verlagerung zu ihrem Mittelwert in zwei Zeitabschnitten bei einer szenarioabhängigen Bearbeitungszeit

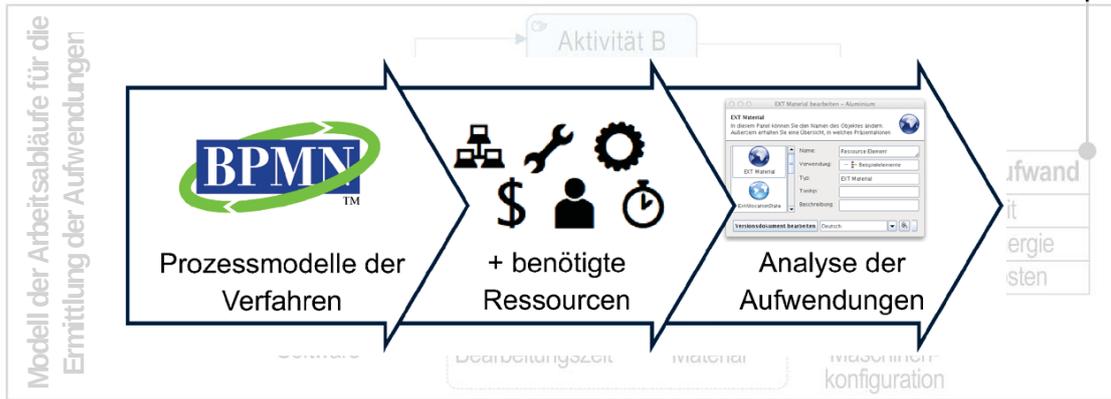
Produktivität

- Anzahl von Gutteilen in einer festgelegten Zeit
 - Ableitung durch Anzahl und Dauer von Aufwärmphasen sowie der szenarioabhängigen Bearbeitungszeit
 - die Dauer einer Aufwärmphase ist abhängig von der Sollgenauigkeit
 - die Anzahl der Aufwärmphasen ist abhängig von betrieblichen Randbedingungen

SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Kriterien Zeit und Kosten

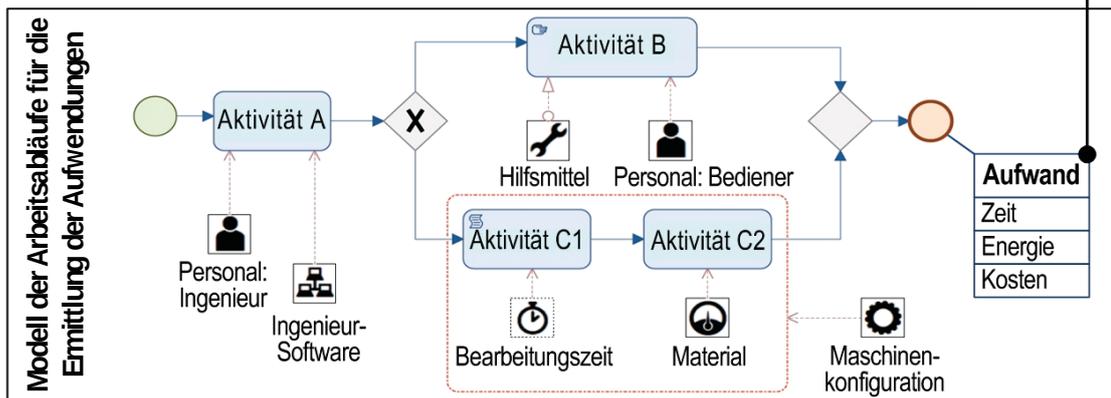
Kostenrahmen für die Bewertung im TR 96	Gestaltung-mechanisch
	Gestaltung-elektrisch
	Simulation, Analyse
	Kooperation
	Fertigungsplanung
	Material
	Fertigung
	Montage
	Inbetriebnahme
	Modellabgleich
	Infrastruktur
	Sonstige Entstehungsk.
	Beschaffungskosten
	Raum
	Material
Energie	
Hilfs- u. Betriebsstoffe	
Rüsten	
Personal	
Wartung u. Inspektion	
Abgleich Korrekturmodelle	



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

Kriterien Zeit und Kosten

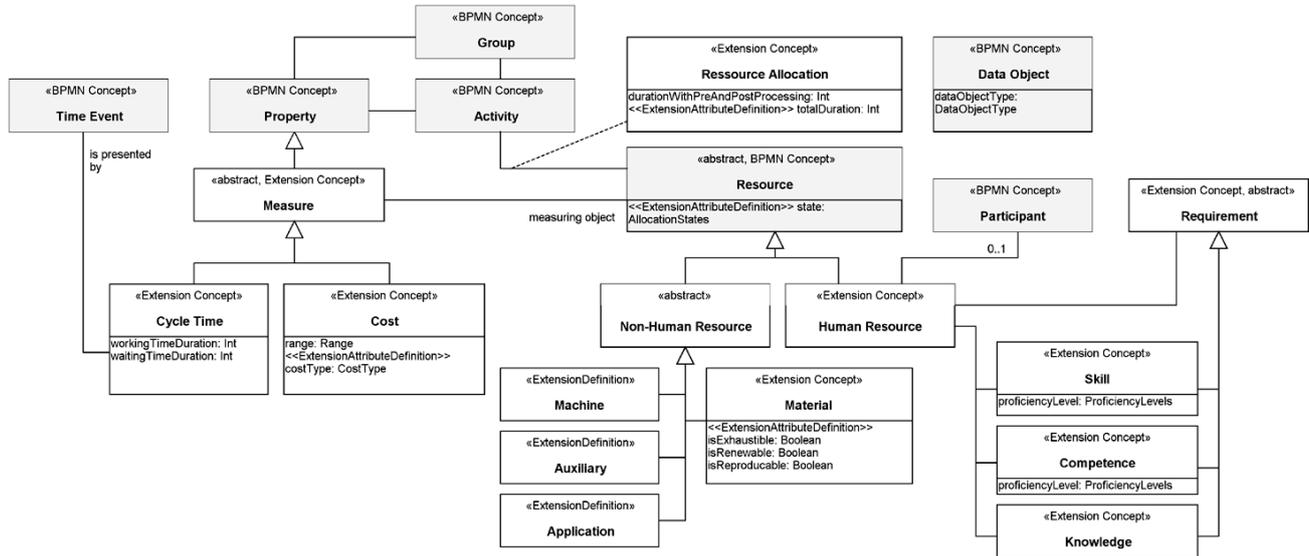
Kostenrahmen für die Bewertung im TR 96	Gestaltung-mechanisch
	Gestaltung-elektrisch
	Simulation, Analyse
	Kooperation
	Fertigungsplanung
	Material
	Fertigung
	Montage
	Inbetriebnahme
	Modellabgleich
	Infrastruktur
	Sonstige Entstehungsk.
	Beschaffungskosten
	Raum
	Material
Energie	
Hilfs- u. Betriebsstoffe	
Rüsten	
Personal	
Wartung u. Inspektion	
Abgleich Korrekturmodelle	



SFB/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“

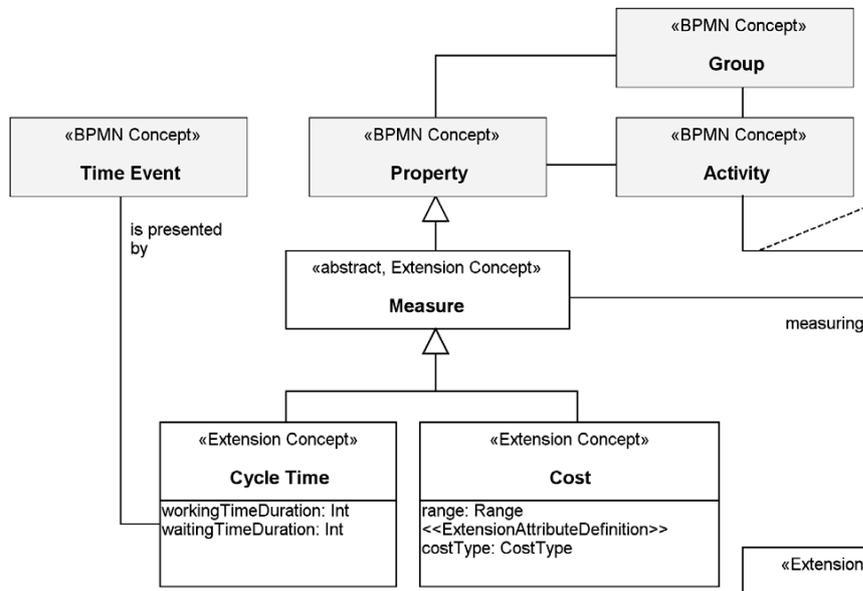
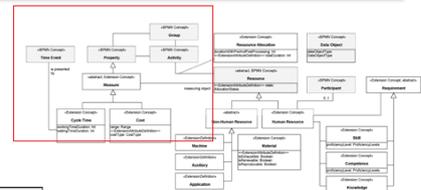
BPMN-Extension

Theoretischer Hintergrund: Meta-Modell



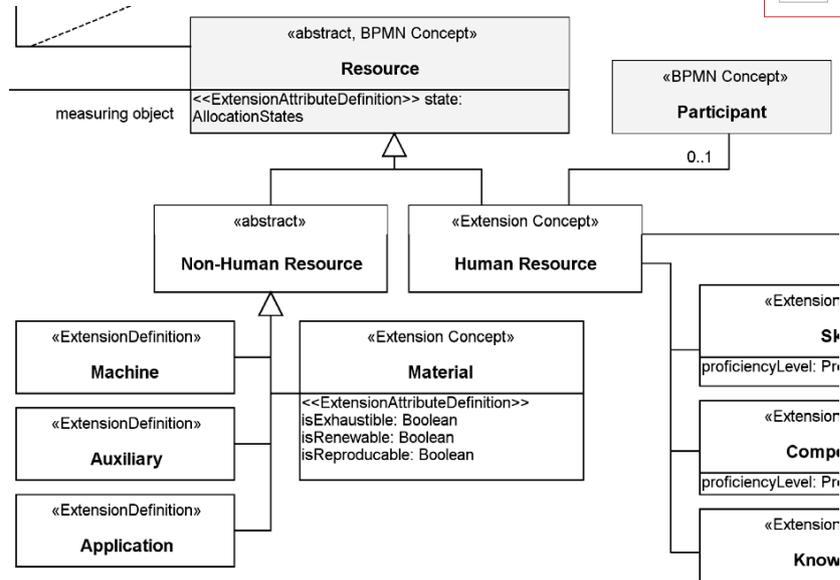
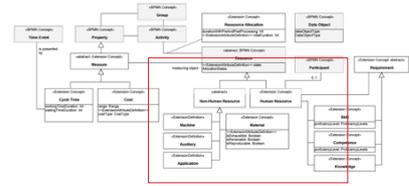
BPMN-Extension

Theoretischer Hintergrund: Meta-Modell



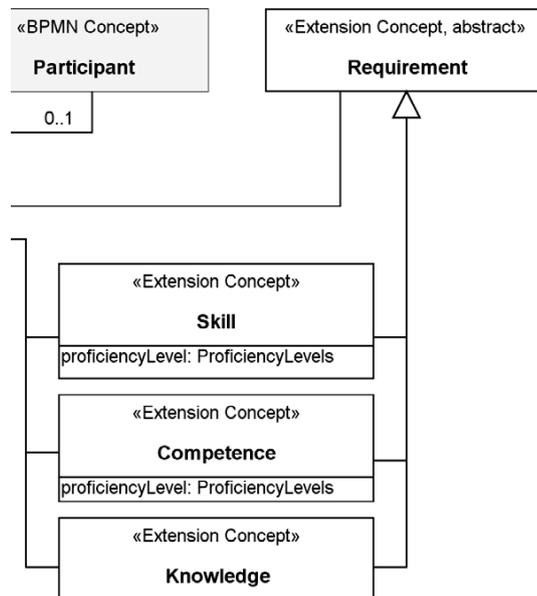
BPMN-Extension

Theoretischer Hintergrund: Meta-Modell



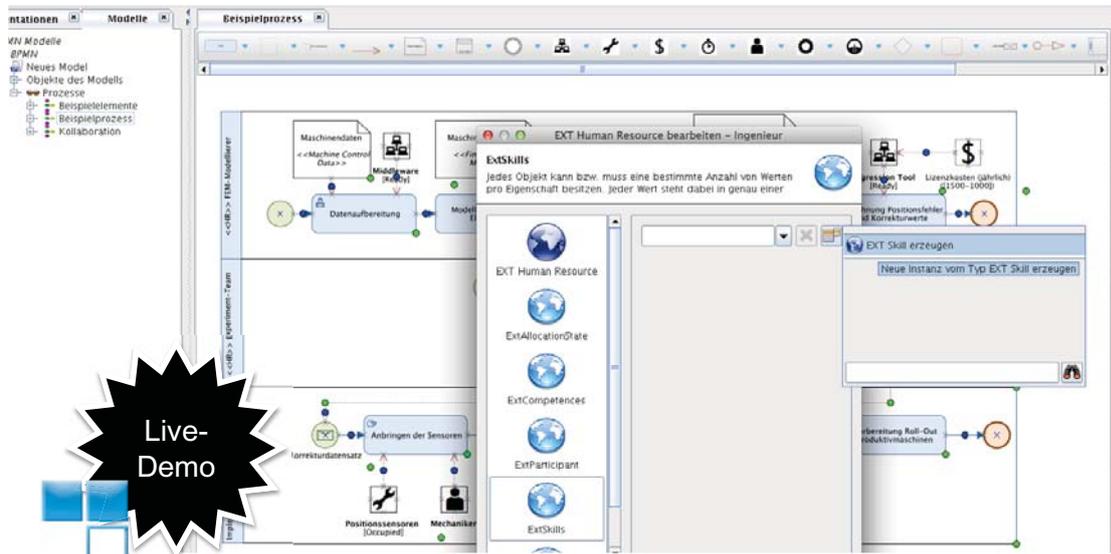
BPMN-Extension

Theoretischer Hintergrund: Meta-Modell



BPMN-Extension

Praktische Anwendung im Cubetto Toolset – Prozessmodell B07



Abschließende Bewertung

Absolut

- Ergebnisse für die Einzelbewertungsgrößen explizit genannt

Bewertung einer Maschine im untersuchten Zustand

Differenz

- Bildung der Differenzen der Einzelbewertungsgrößen für:
 - Grundmaschine
 - Maschine mit integriertem Lösungsansatz

Bewertung von Lösungsansätzen

Relativ

- Angabe der Einzelbewertungsgrößen in Bezug zu einer Referenz

Entscheidungshilfe für Betreiber bei der Anschaffung einer Maschine

Gesamtbewertung

Spinnennetzdiagramm

