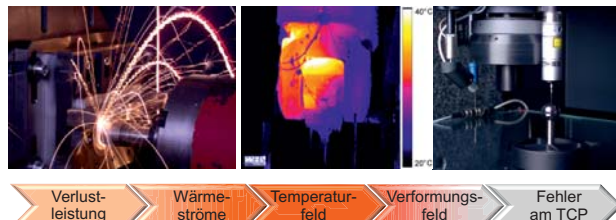

Tagungsband

2. Kolloquium
zum SFB/TR-96

Thermo - Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen -Modellierung und Simulation-

24. / 25.10.2012 in Chemnitz



PROGRAMM

Mittwoch, 24.10.2012

13:00 Uhr

Bedeutung und Konzepte von Modellierung und Simulation für den SFB/TR-96

K. Großmann, Sprecher des SFB/TR-96

13:30 Uhr

Fachkonzeptionelle Modelle als Basis der Integration und Bewertung (C05)

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

Session 1: Grundmodelle zur Beschreibung der Wärmequellen

14:00 Uhr

Grundlagenuntersuchungen der Temperaturverteilung beim kontinuierlichen Schnitt mittels Thermografie (A02)

M. Brockmann, F. Klocke, D. Veselovac; RWTH Aachen, Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren

14:30 Uhr

Modellierung der Verlustquellen in Antriebsmotoren (C04)

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

15:00 Uhr

Simulation der Erwärmung von Spindellagern auf der Basis eines lokalen Reibmodells (B03, B04)

St. Bäumlner, C. Brecher, D. Haber, J. Rossaint; RWTH Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

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

Session 2: Wärmeübertragung

16:00 Uhr

Wärmeübertragung in Aluminium-Leichtbaustrukturen (B04, C06)

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

16:30 Uhr

Wärmeübertragung an Fugenkontakten am Beispiel spanender Werkzeuge (B02, A01)

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

U. Semmler; Fraunhofer IWU Chemnitz

M. Bräunig; TU Chemnitz, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse

17:00 Uhr

Identifikation relevanter Parameter und Strukturbereiche für den Wärmeübergang zwischen Maschine und Umgebung (B01, B05)

St. Ihlenfeldt, C. Zwingenberger; Fraunhofer IWU Chemnitz

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

17:30 Uhr

Analyse und Modellierung der fluidischen Kühlung von Motorspindeln (A04)

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

Donnerstag, 25.10.2012

Session 3: Beiträge zur Effizienzsteigerung von Modellierung und Simulation

9:00 Uhr

Optimale Versuchsplanung für die experimentelle Ermittlung von Kennwerten der Wärmeübertragung an Fugenkontakten (B02, B05)

T. Etling, R. Herzog; TU Chemnitz, Professur Numerische Mathematik

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

9:30 Uhr

Moderne Techniken zur schnellen und hochauflösenden Simulation (A07)

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

10:00 Uhr

Parametererhaltende Modellordnungsreduktion für die Simulation thermo-elastischer Probleme an Werkzeugmaschinen (A06)

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

Session 4: Voraussetzungen zur Systemsimulation des prozessaktuellen Werkzeugmaschinenabbildes für Berechnung und Korrektur

11:00 Uhr

Effiziente Simulation thermo-elastischer Verformungen an Werkzeugmaschinen mit ordnungsreduzierten Modellen bei Berücksichtigung großer Relativbewegungen (A05)

A. Galant, K. Großmann, A. Mühl; TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik

11:45 Uhr

Thermische Analyse bewegter Baugruppen mittels FEM am Beispiel der Führungswagen (A05)

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

12: 15 Uhr

Voraussetzungen und Grenzen einer eigenschaftsmodellbasierten Korrektur (B06)

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

12:45 Uhr

Modularisierung der Datenflüsse und Algorithmen für die steuerungsintegrierte Korrektur thermisch bedingter Verlagerungen in Werkzeugmaschinen (B07)

K. Großmann, A. Mühl, Ch. Städel; TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik

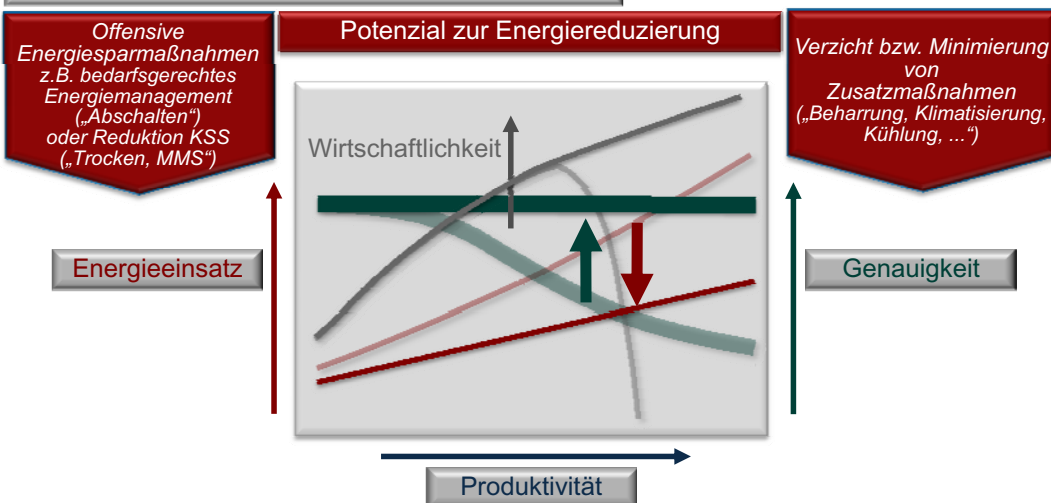
Bedeutung und Konzepte von Modellierung und Simulation für den SFB/TR 96

K. Großmann

Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik,
TU Dresden

SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

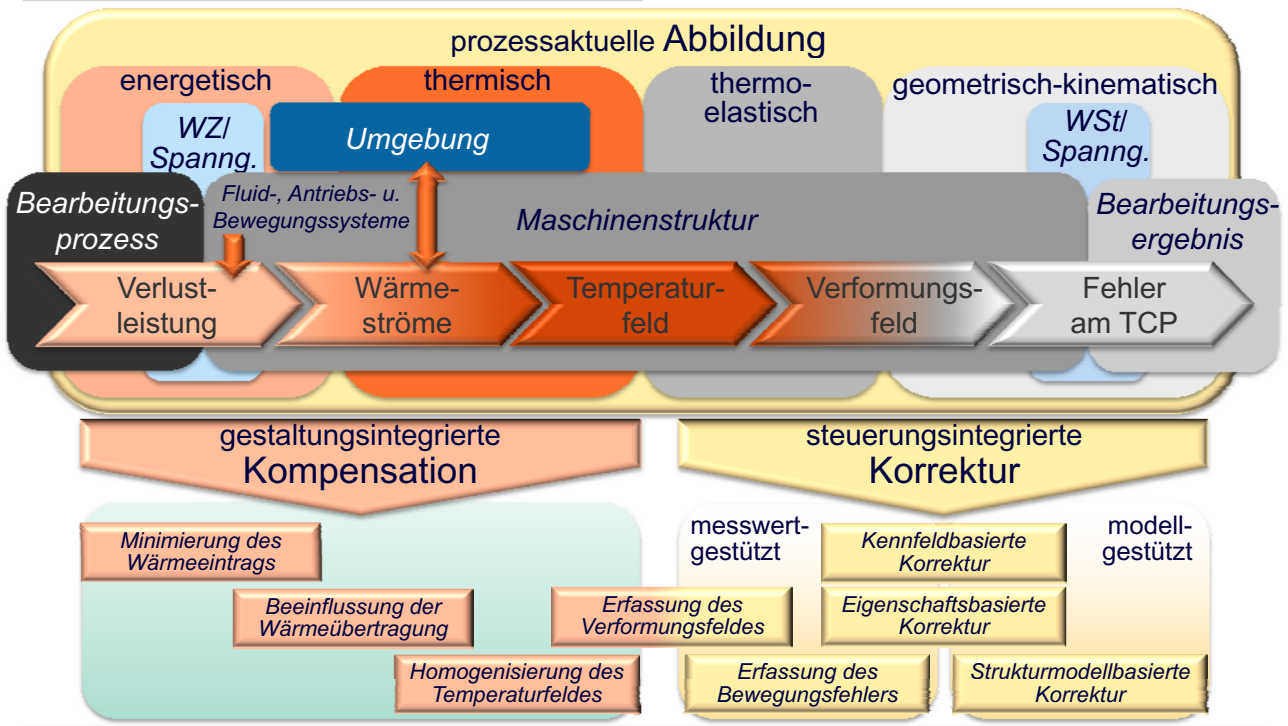
Zielstellung



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

SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Lösungsansatz



SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

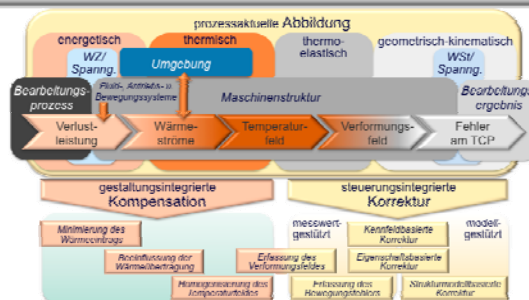
Modellbasierte Vorgehensweisen

z.B. Parametersensitivitäten

Modellgestützte Systemanalyse

Anspruch: prozessaktuelles Abbild

- Systemmodell unter Objektaspekt (Bearbeitg.technologie u. -proz., WZ, Antr.-, Bewegg.- u. Fluidsysteme, Masch.struktur, Umgeb., WSt)
- Systemmodell unter Domänenaspekt (energet., therm., thermo-elast., geometr.-kinemat.)
- Systemmodell unter Aktualitätsaspekt (Struktur/Pose im Arb.raum u. Zustand/Betrieb in Abhängigk. vom technolog. Ablauf/Proz.param.)



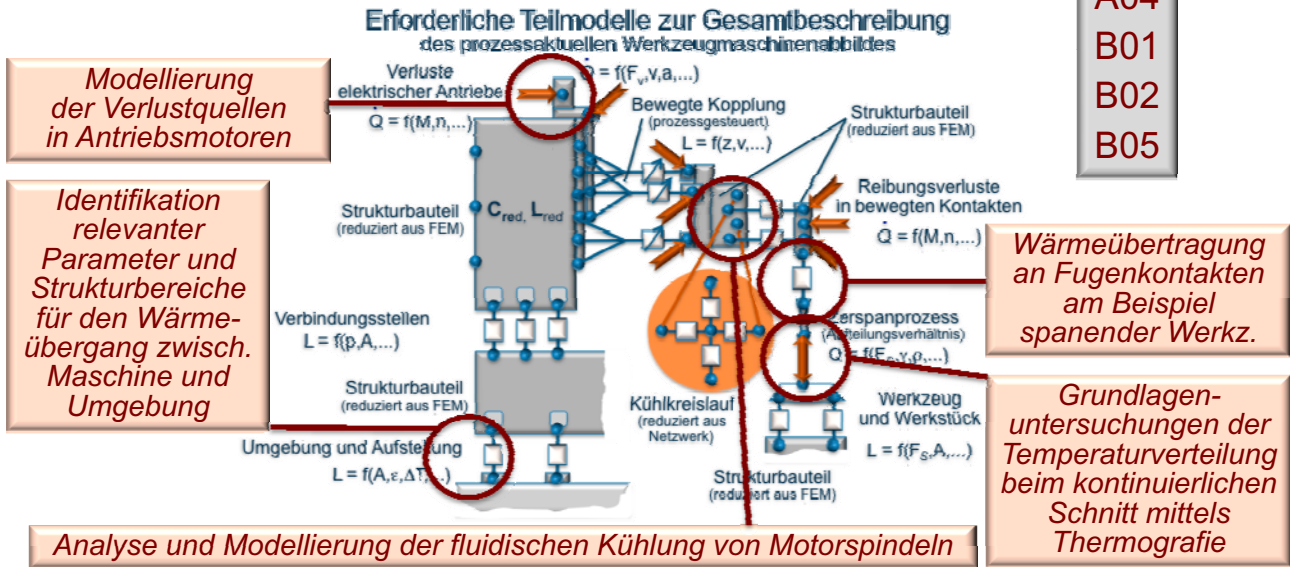
SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Modellbasierte Vorgehensweisen

z.B. Parametersensitivitäten

Modellgestützte Systemanalyse

- A01
- A02
- A04
- B01
- B02
- B05



SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Modellbasierte Vorgehensweisen

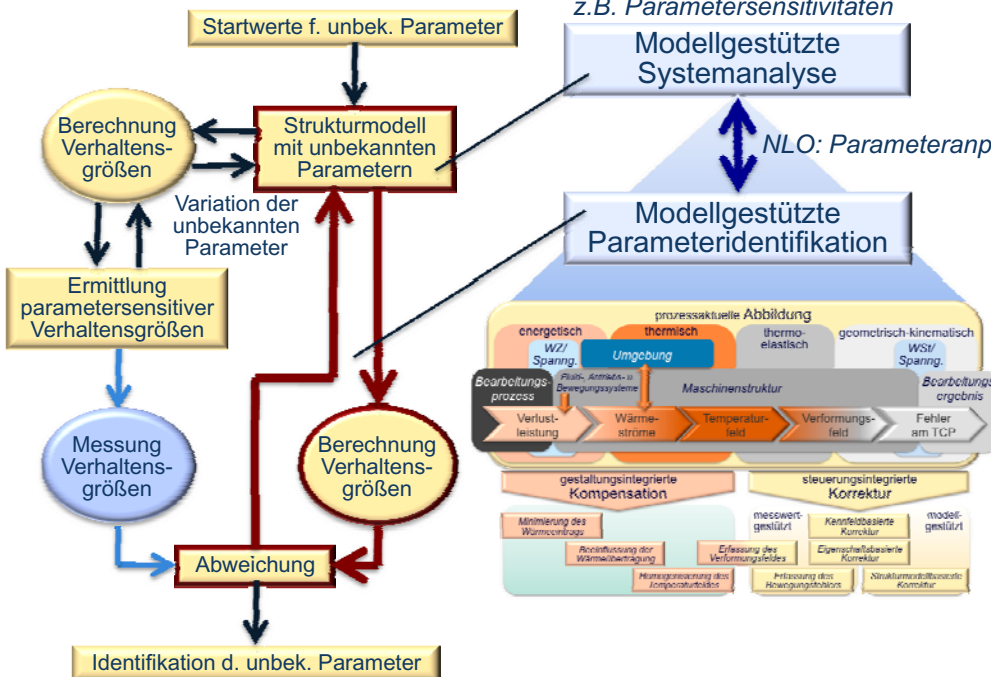
z.B. Parametersensitivitäten

Modellgestützte Systemanalyse

NLO: Parameteranpassung

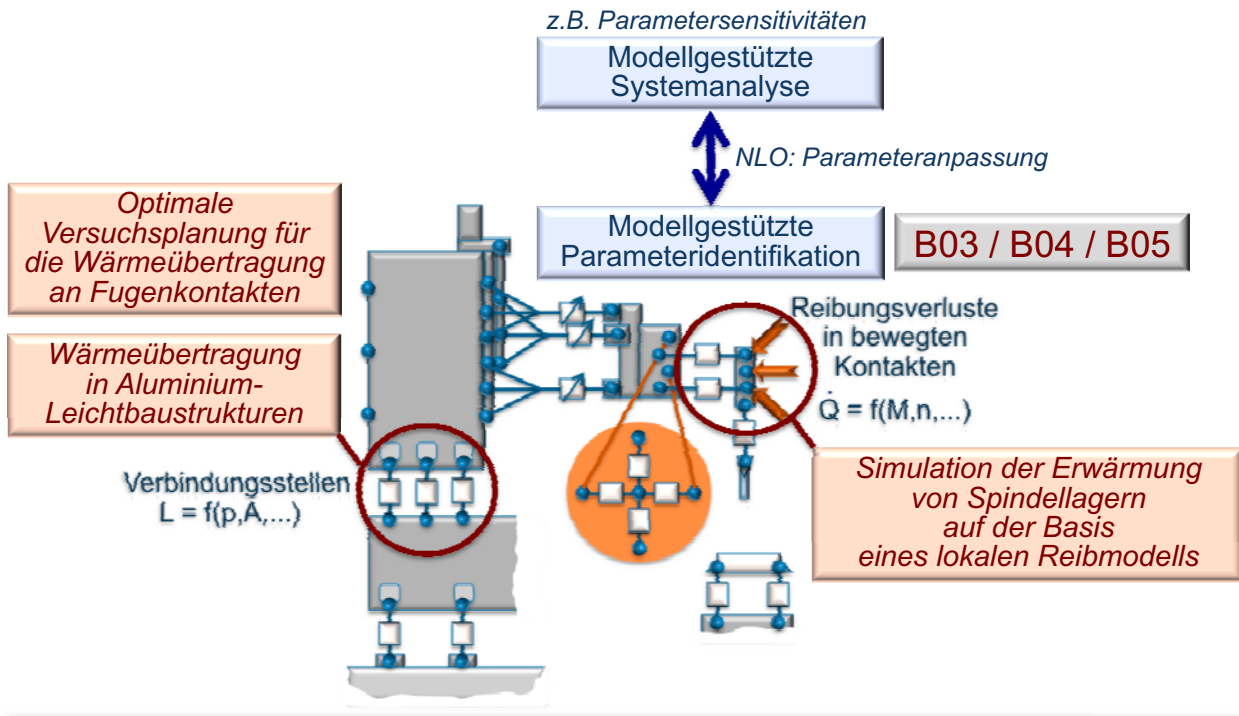
Modellgestützte Parameteridentifikation

Parameter zur Beschreibung von Wärmequellen und -übertragung sind vielfach exemplarischer Natur



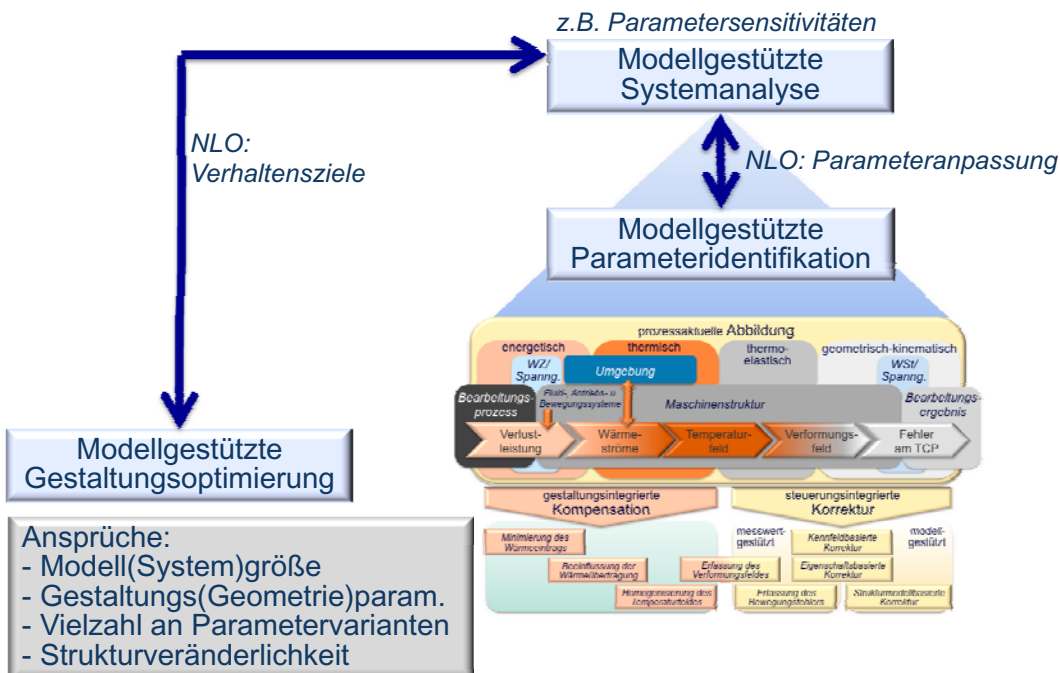
SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Modellbasierte Vorgehensweisen



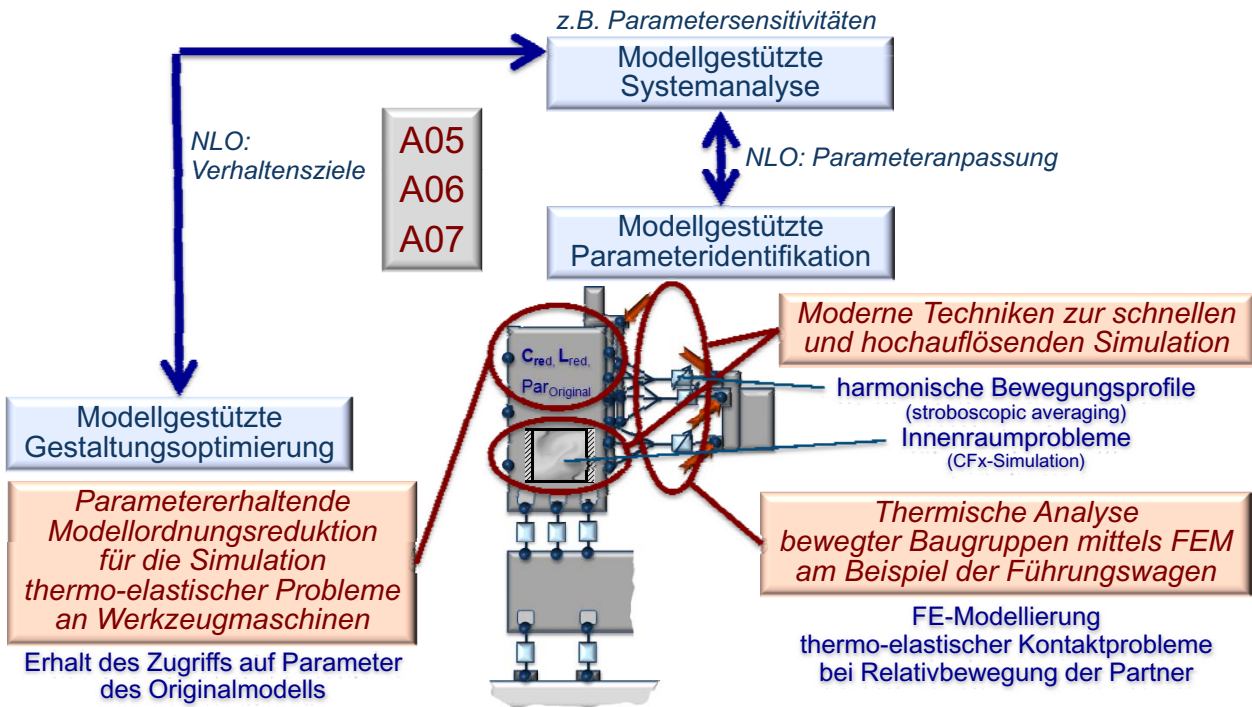
SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Modellbasierte Vorgehensweisen



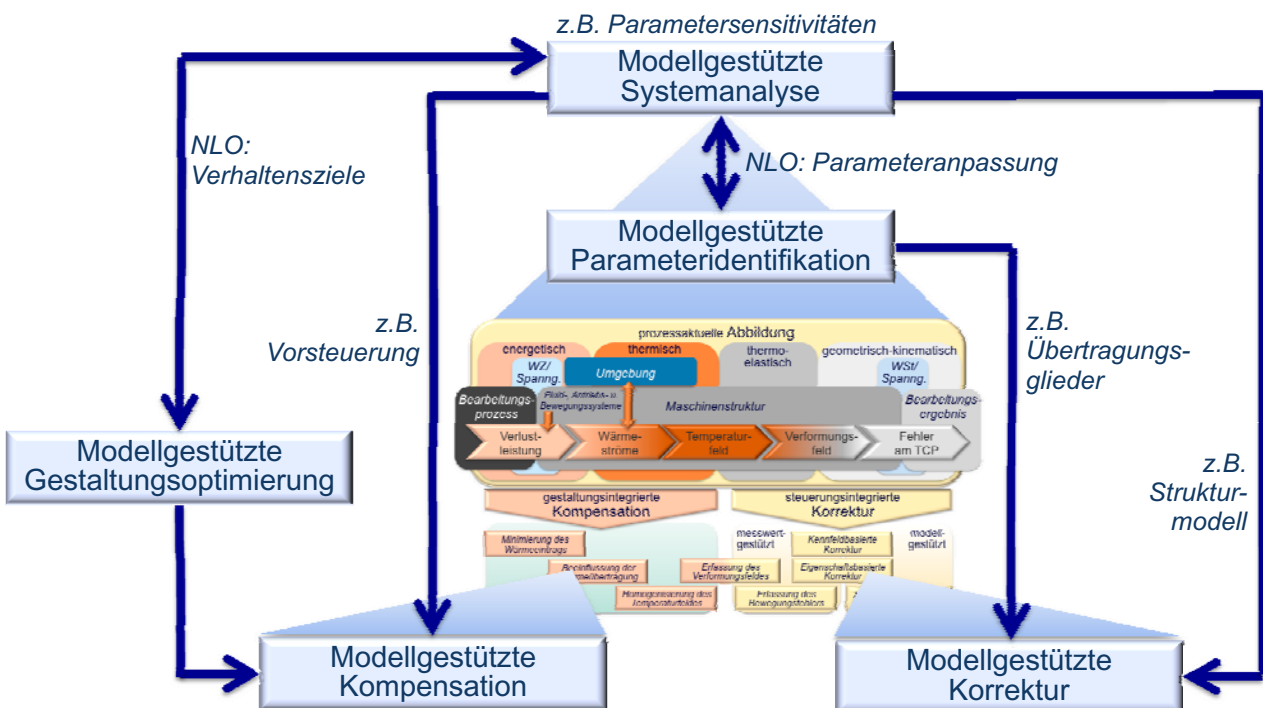
SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Modellbasierte Vorgehensweisen



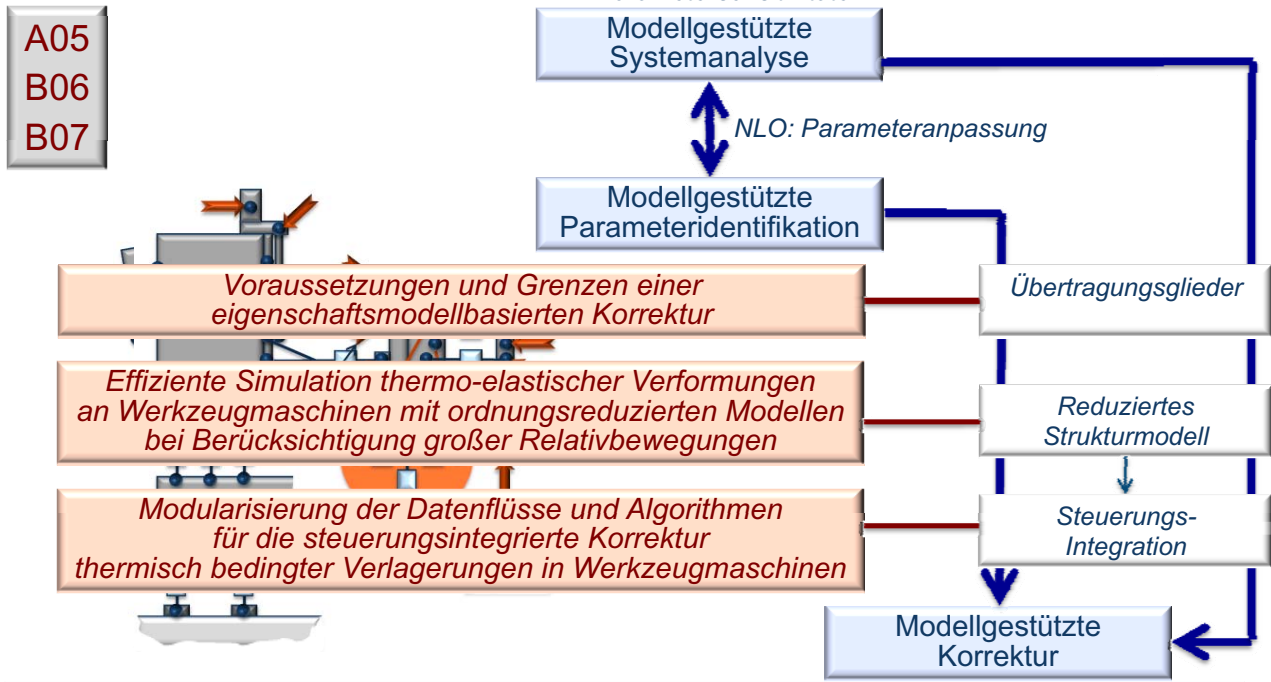
SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Modellbasierte Vorgehensweisen



SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

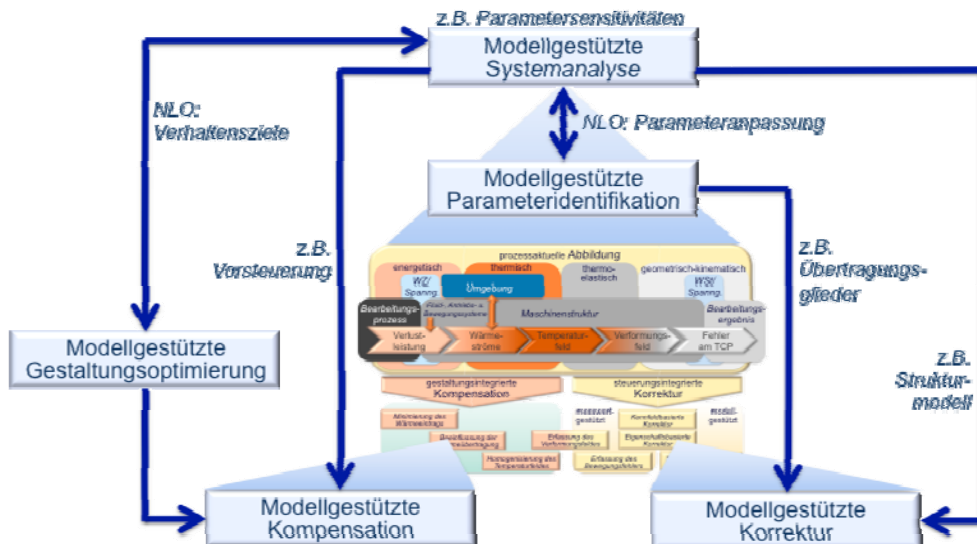
Modellbasierte Vorgehensweisen



SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Modellbasierte Vorgehensweisen

Zentrale Stellung der Modellierung und Bedeutung der Simulation zur Erreichung der Zielstellungen im SFB/Transregio 96



SFB/Transregio 96: Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

FACHKONZEPTIONELLE MODELLE ALS BASIS DER INTEGRATION UND BEWERTUNG

*W. Esswein, R. Braun, M. Burwitz; Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insb. Systementwicklung,
TU Dresden*

Ein Ziel des Teilprojektes C05 besteht in der Erarbeitung einer Methode zur wirtschaftlichen Bewertung von Lösungsverfahren zur Kompensation und Korrektur thermisch bedingter Verformungen, welche innerhalb des SFB/TR 96 entwickelt werden. Das Ziel der Methode ist es, zukünftig unter Beachtung gegebener Randbedingungen (z.B. Maschinentyp, Auftragsart, Losgrößen) Empfehlungen für effiziente Verfahren zu unterbreiten. Um dieses Ziel zu erreichen, soll eine Bewertungsmetrik gebildet werden, welche die Lösungsverfahren unter anderem hinsichtlich ihrer Wirksamkeit, der Prozessqualität sowie der Auswirkungen auf Maschinenlebenszykluskosten, Stückzahlen und Preisgrenzen vergleicht.

Der Vergleich der verschiedenartigen Lösungsverfahren erfordert zuerst eine Konzeptualisierung des Diskursbereiches, um Strukturen und Parameterbereiche einzelner Lösungsverfahren zu analysieren und Einflussgrößen für die zu entwickelnde Metrik zu ergründen. Auf Basis dieser Fachdomänenanalyse stellt sich die Frage der Darstellung und Beschreibung der erlangten Erkenntnisse. Im Rahmen des Teilprojektes C05 werden dafür konzeptionelle Modelle verwendet, welche ihren Ursprung in der Wirtschaftsinformatik haben.

Konzeptuelle Modelle werden dazu genutzt, Diskursbereiche (z. B. Fachdomänen) in Form von semi-formalen, diagrammatischen Modellen darzustellen. Modelle werden mit einer Modellierungssprache gebildet und folgen der darin definierten Syntax (formaler Aspekt). Die Semantik des Modells erschließt sich jedoch hauptsächlich durch die natürlich sprachlichen Bezeichnungen im Modell (Semi-Formalität, z.B. Objektbezeichnungen, Titel von Prozessschritten). Während Modelle hauptsächlich in der Entwicklung von Anwendungssystemen eingesetzt werden (z.B. zur Anforderungsspezifikation), wird im Teilprojekt C05 der Ansatz des modellgestützten Managements verfolgt, bei welchem fachkonzeptionelle Modelle als Entscheidungsgrundlage auf Managementebene fungieren und als eine Art dauerhafter Wissenspeicher dienen, aus dem weitere Modelle abgeleitet werden können.

Bezogen auf das Ziel des Teilprojektes C05 wurden daher Modelle für verschiedene Lösungsverfahren sowie deren Eigenschaften entwickelt und somit versucht, diese zu „homogenisieren“. Dafür wurde eine existierende Modellierungssprache domänenspezifisch angepasst und mit Konzepten wie z.B. „Messgröße“ oder „Zielgröße“ ergänzt. Parallel dazu wurde ein komponentenorientiertes Modell einer Werkzeugmaschine entworfen, um thermisch bedingte Wirkungen und Einflussgrößen sowie die einzelnen Lösungsverfahren konzeptionell darzustellen. Neben diesem statisch orientierten Modell wird ein zeitlich orientiertes Modell eines typischen Maschinenlebenszyklus erstellt, um Wirkungen und Kosten auf einzelne Phasen darstellen zu können. Das Gesamtmodell fungiert dabei als Basis für die spätere Herausbildung einer Metrik und ist ein sich stetig entwickelnder Wissenspool, der alle relevanten Objekte wie Komponenten, Methoden und Messverfahren beinhaltet. Der somit widerspiegelte technische Ist-Stand wird später um – teilweise in den einzelnen Teilprojekten noch zu ermittelnde - ökonomische Konsequenzen erweitert, um die finale Metrik systematisch herausbilden zu können.

Kontakt:

*Richard Braun
TU Dresden*

*Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insb. Systementwicklung
01062 Dresden*

Tel.: 0351 – 463 33907

E-Mail: richard.braun@tu-dresden.de

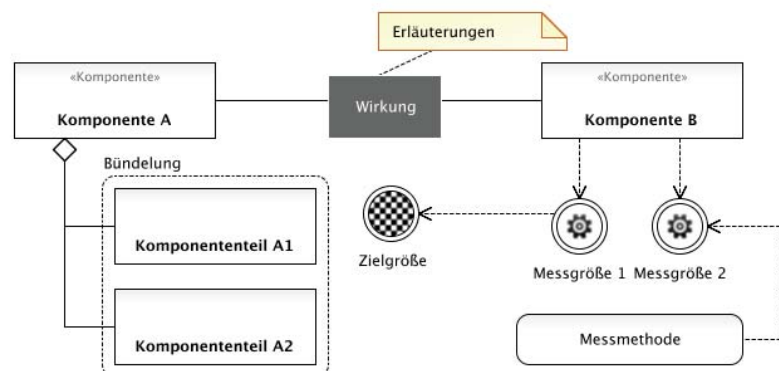
Fachkonzeptionelle Modellierung als Basis der Integration und Bewertung

Prof. Dr. Werner Esswein
SFB-Tagung in Chemnitz, 24.10.2012

Agenda

Gliederung

1. Ausgangslage, Ziel und Vorgehen
2. Grundlagen fachkonzeptioneller Modelle
3. Modellgestütztes Management
4. Beispiele
5. Ausbaustufen



Ausgangslage, Ziel und Vorgehen

Ausgangslage:

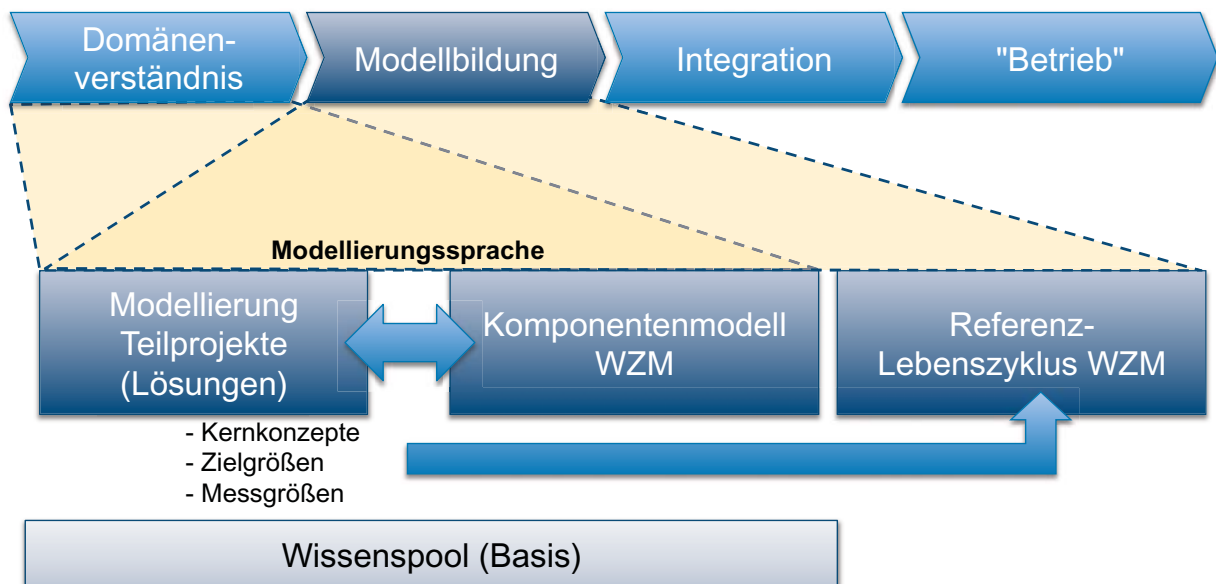
- verschiedene Lösungsansätze:
 - Kompensations-Methode
 - Korrektur-Methode
 - "Zubringer":
 - Tool (z.B. Simulationsverfahren)
 - Grundlagen (z.B. Parameterbestimmungen)
 - System (z.B. Versuchsträger)
- "Referenzwerkzeugmaschine"

Ziel:

- Vergleichbarkeit von z.T. sehr unterschiedlichen Lösungen
- Verknüpfung mit wirtschaftlichen Zielgrößen
- Entscheidungsgrundlagen
- Kommunikationsbasis im TRR

Ausgangslage, Ziel und Vorgehen

Vorgehen



Grundlagen fachkonzeptioneller Modelle

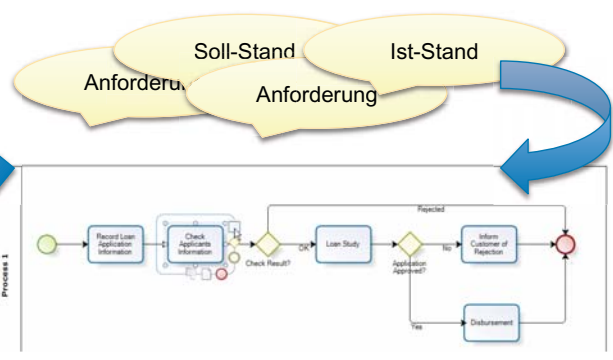
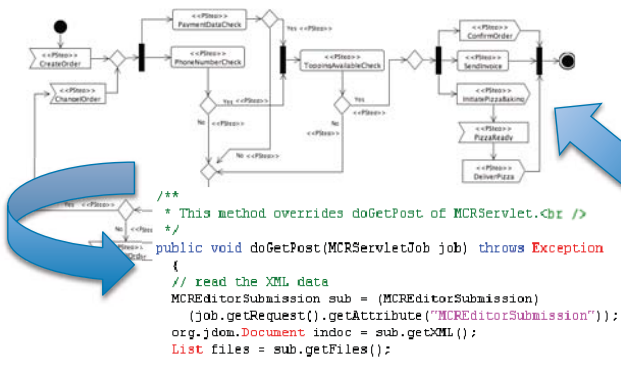
Ursprung und Verwendung

- **Prinzipiell:**
 - Modell *der Realität* als Voraussetzung zur Entwicklung von Anwendungssystemen
 - Anforderungen, Dokumentation, Kommunikation
- **Verwendung in der Informatik:**
 - formal, automatisierbar (ggf. Transformation zu Code)
 - Semantik: Maschinenverhalten
- **Verwendung in der Wirtschaftsinformatik:**
 - semi-formal, nicht automatisierbar
 - ggf. Vorstufe zu formalen Modellen
 - Semantik: Domänenverständnis

Grundlagen fachkonzeptioneller Modelle

Aus der Informatik und Wirtschaftsinformatik

- Informatik:
 - Datenstrukturmodelle
 - Petri-Netze
 - Workflow-Modelle...
- Wirtschaftsinformatik:
 - Prozess-, Organisations- und Komponentenmodelle
 - Situations- und Alternativbeschreibungen



Grundlagen fachkonzeptioneller Modelle

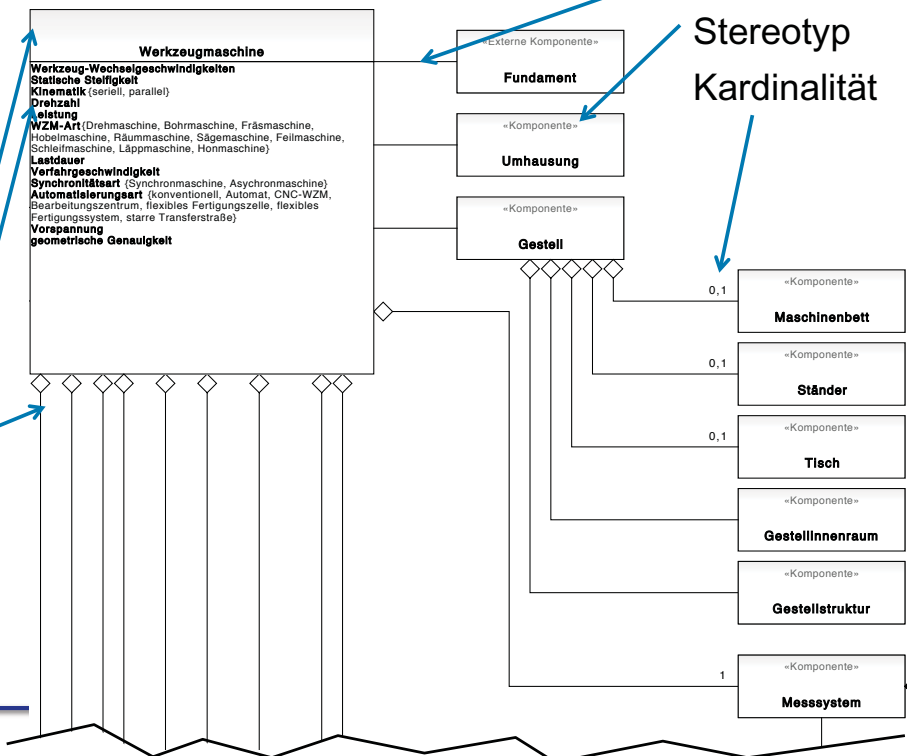
- Modellverständnis in der Wirtschaftsinformatik:
 - „Ein Modell ist das Ergebnis einer **Konstruktion** eines Modellierers, der für **Anwendungssystem-** und Organisationsgestalter **Informationen** über zu modellierende Elemente eines Systems zu einer Zeit als **relevant** mit Hilfe einer **Sprache** deklariert“ (SCHÜTTE, 1998)
 - Zweckbezug, Konstruktionsleistung
Subjektivität → Intersubjektivität → Konsenstheorie
 - Sprache = Modellierungssprache, z. B.:
 - UML (statische und prozessuale Sichten)
 - BPMN (prozessuale Sichten)
 - ARIS (alle Sichten)



Grundlagen fachkonzeptioneller Modelle

Beispiel für ein Strukturdiagramm (UML):
Komponentenmodell WZM

Klasse
Attribute
Aggregation



Assoziation
Stereotyp
Kardinalität

Modellgestütztes Management

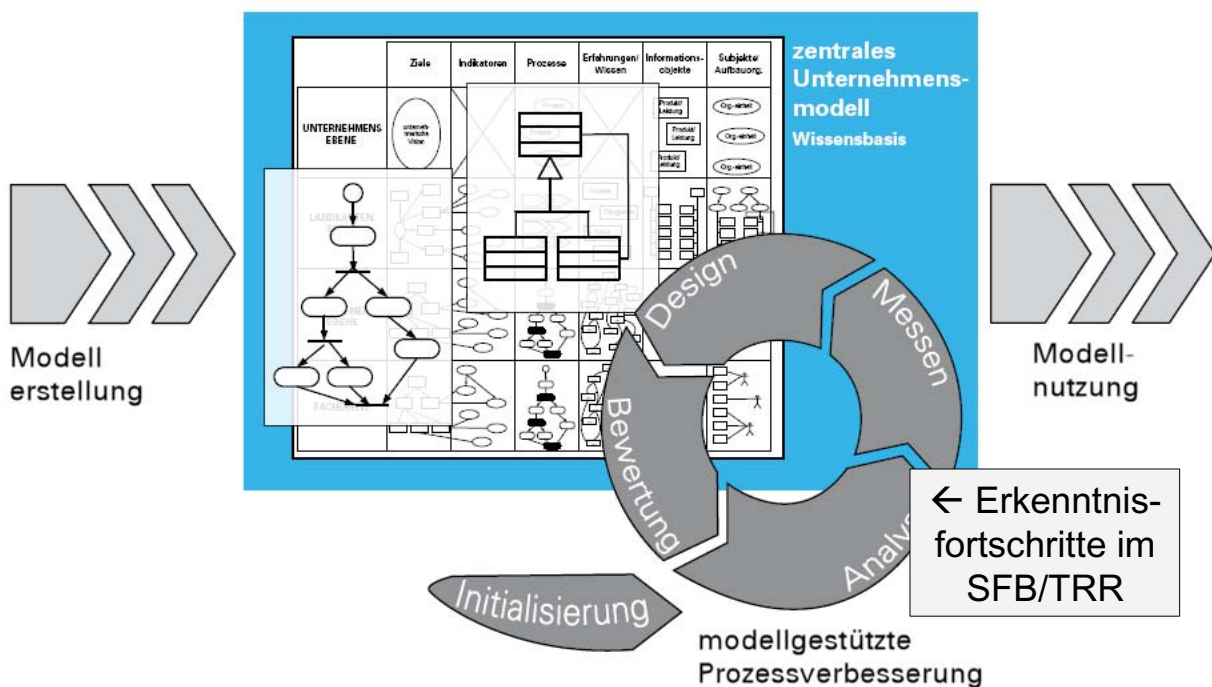
Ansatz:

- konsequente Durchführung von Aufgaben mit Modellen
Bsp.: Unternehmensmodell (Organisation, Produkte, Prozesse) → **Wissenspool**
- Modell-Wiederverwendung
- "Ist"-Zustandsbeschreibung
- Alternativbeschreibungen
- (teil-) automatisierte Bewertung
- Kommunikationsbasis mit großer Sprachpräzision

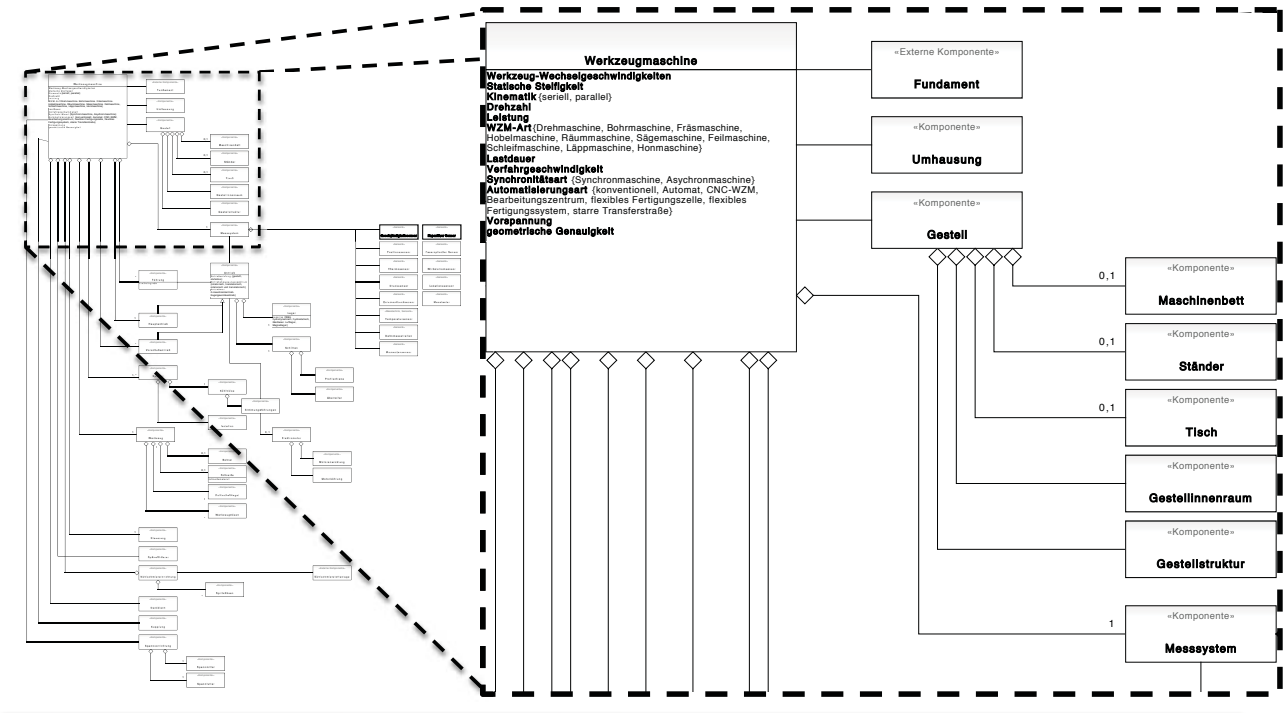
Mehrwert:

- Auswertungen
- Typ-Instanz-Beziehungen
- 1 Objekt – n Präsentationen (je Zweck und Kontext)

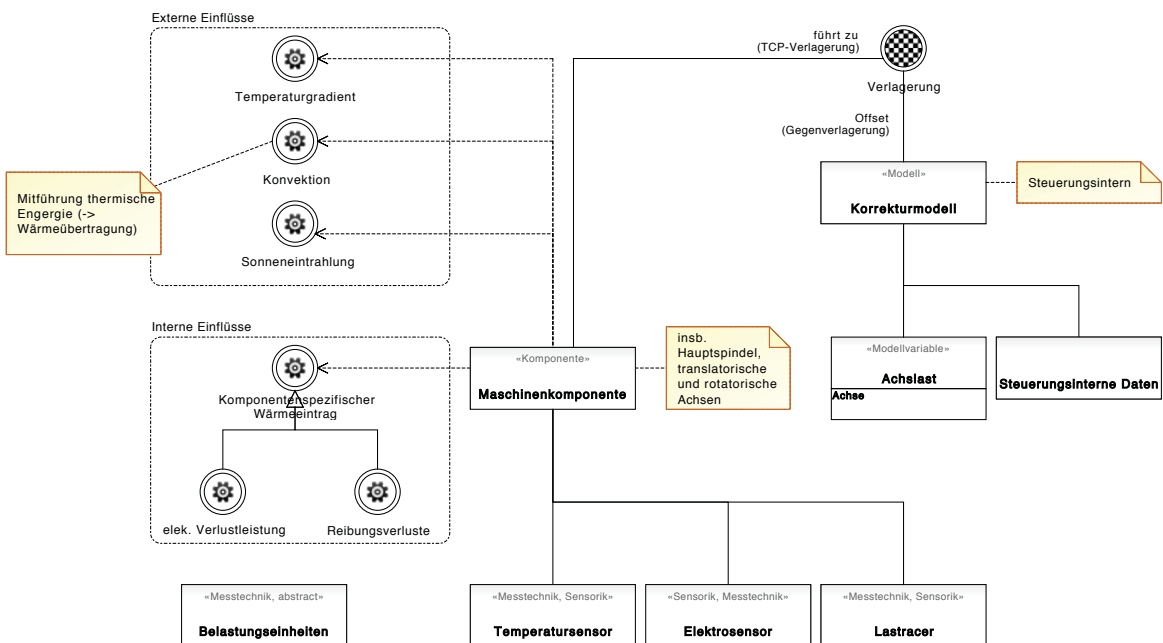
Modellgestütztes Management



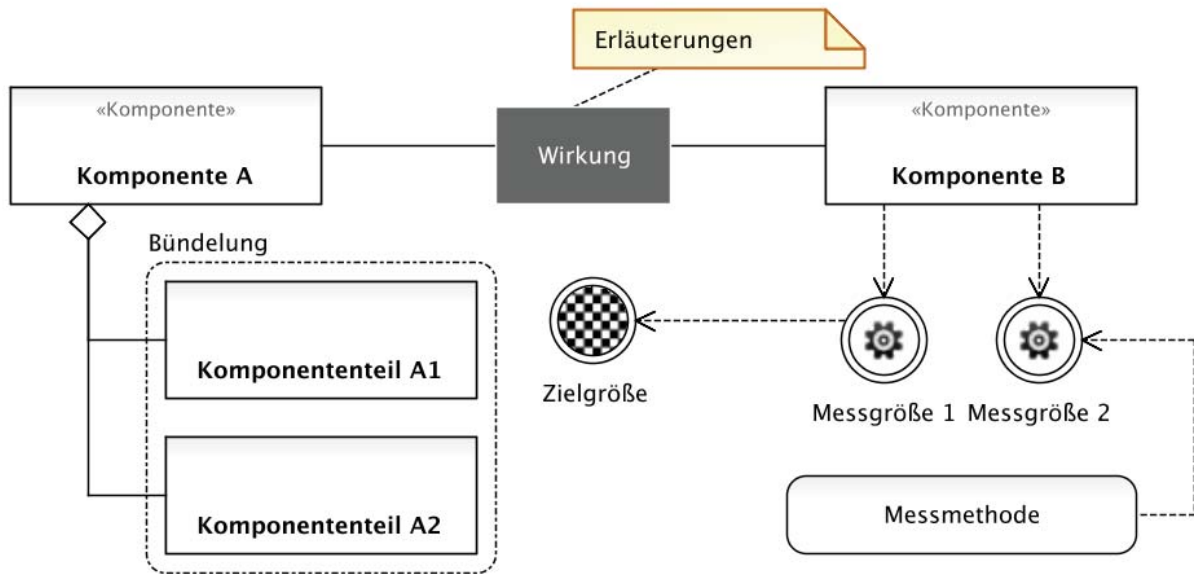
Beispiele: Komponentenmodell einer Maschine



Beispiele: Teilprojekt B06 – Eigenschaftsbasierte Korrektur



Sprachkonzepte: Domänenspezifische Erweiterung der UML



Generischer Modelleditor: Cubetto Toolset

(Teil-) automatisierte Auswertung XML/HTML-Reports, Java-Schnittstelle (API)

Ausbaustufen

Auf Basis des Gesamtmodells

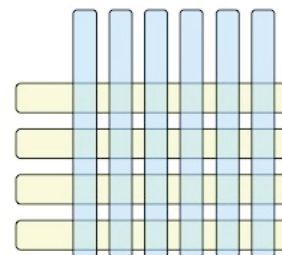
- Wirkungen auf Phasen im Maschinenlebenszyklus
 - Verknüpfung Maschinenmodell mit Lebenszyklusmodell
- Erarbeitung Vergleichsmetrik
 - Wirtschaftliche Zielgrößen aus Teilprojekten (→ inhaltliche Modellerweiterung)
 - Vergleich von technischen Maßnahmen und ihre Wirkung auf technische und wirtschaftliche Zielgrößen

Wir sind darauf angewiesen, dass Sie uns aufzeigen, wie die Ergebnisse Ihrer Arbeit auf den Lebenszyklus von Maschinen wirken!

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Kontaktmöglichkeit

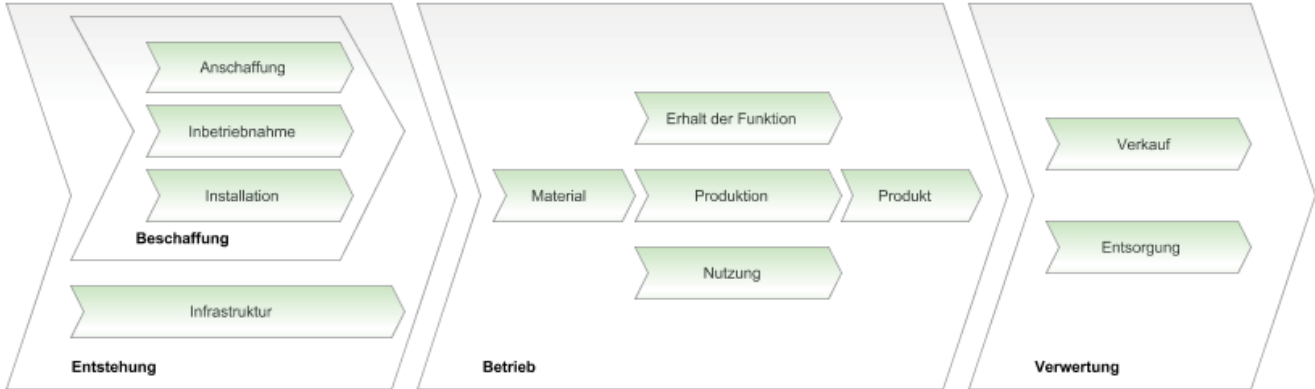
- TU Dresden
Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik,
insb. Systementwicklung
- Tel.: +49 351 463-37671
- Fax: +49 351 463-37203
- Email: wise@mailbox.tu-dresden.de



WISE

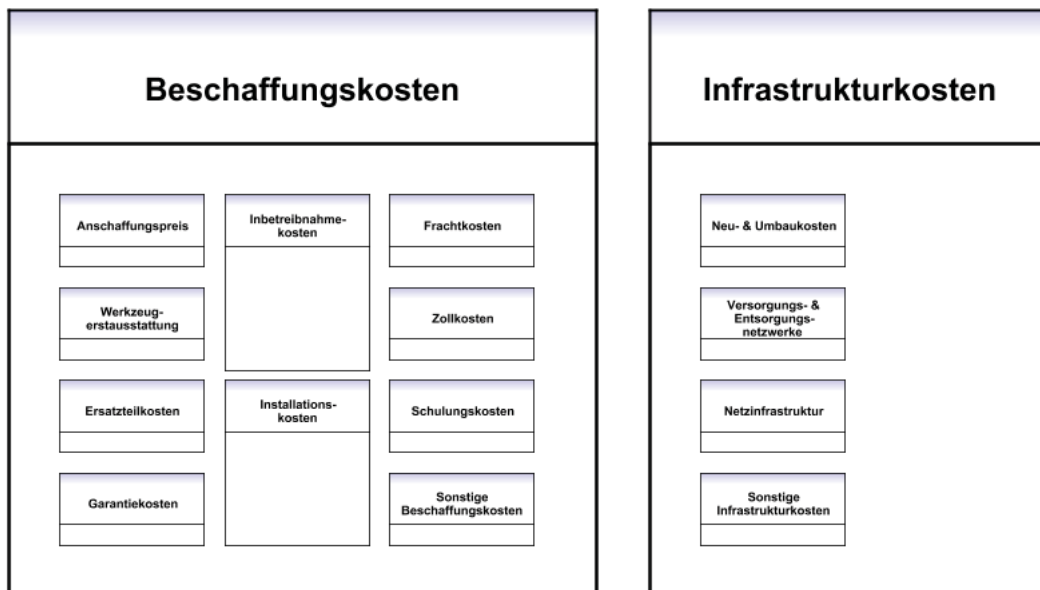
Backup

Phasen des Maschinenlebenszyklus-Modell



Backup

Maschinenlebenszykluskosten



GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN DER TEMPERATUR- VERTEILUNG BEIM KONTINUIERLICHEN SCHNITT MITTELS THERMOGRAFIE

M. Brockmann, F. Klocke, D. Veselovac; Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren, RWTH Aachen

Die Temperaturverteilung, die sich während der Zerspanung in Werkzeugschneide, Werkstück und Span einstellt, ist von signifikanter Bedeutung für die Charakterisierung des Prozesses, den Werkzeugverschleiß und die finale Qualität des zu fertigenden Bauteils. Die Vorhersage des Temperaturfeldes anhand geeigneter, parametrierter Modelle ist elementarer Bestandteil für die Vorhersage der thermo-elastischen Verformung der gesamten Werkzeugmaschine und der Wärmestromaufteilung in die einzelnen Komponenten.

Eine der größten Herausforderungen bei der Untersuchung von Temperaturen beim Zerspanprozess besteht in der Durchführung von Messungen. Thermoelemente und Pyrometer können hierbei nur für punktuelle Messungen genutzt werden, ermöglichen jedoch eine relativ genaue Kalibrierung der Sensorik bezüglich der Absoluttemperatur. Zur Integration in den Zerspanprozess werden jedoch aufwändige Versuchsaufbauten benötigt, denen in den meisten Fällen Störungen des Prozesses inhärent sind. Die kontaktlose Messung mittels Thermografie ermöglicht hingegen eine direkte Messung eines Temperaturfeldes und stellt somit die einzige wirtschaftliche Lösung zur experimentellen Untersuchung von Temperaturfeldern bei der Zerspannung dar.

Der vorliegende Vortrag ist ein Beitrag für die Anwendung der Infrarotthermografie speziell für Zerspanprozesse. Die Zielsetzung des Vortrages ist das Aufzeigen möglicher Fehlerquellen bei der Messung von Zerspanprozessen und die speziell hierfür notwendigen, technischen Gegenmaßnahmen. Hierbei soll insbesondere auf folgende Aspekte eingegangen werden:

- Anforderungen für Zerspanprozesse an die Infrarotkameratechnologie (Auflösung, Messabstände, Integrationszeiten, Bildraten, Triggerung)
- Emissionsgrade
- Hintergrundstrahlung
- Einfluss technischer Kühlschmierstoffe

Die praktische Anwendung der einzelnen Aspekte soll anhand ausgewählter Zerspanungsbeispiele exemplarisch gezeigt werden. Hierfür werden insbesondere Messungen, die im Rahmen der Arbeit im Teilprojekt A02 entstanden sind, betrachtet werden. Die durchgeführten Messungen an einem Grundlagenprüfstand zur Analogieuntersuchung des Fräsprozesses stellen aufgrund der niedrigen involvierten Energien, den geringen geometrischen Skalen und den sehr geringen Zeitkonstanten eine große Herausforderung an die Infrarotkameratechnologie dar.

Kontakt:

Matthias Brockmann

RWTH Aachen

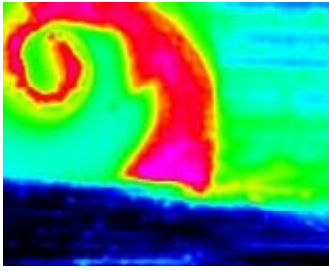
Werkzeugmaschinenlaboratorium WZL

Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren

Gruppe Produkt- und Prozessüberwachung

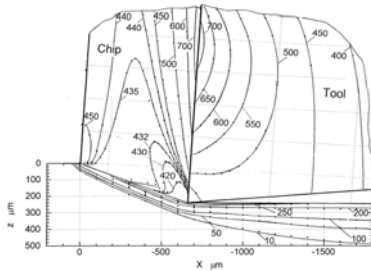
Steinbachstraße 19 52074 Aachen

Tel.: 0241 80 20255



Grundlagenuntersuchungen der Temperaturverteilung beim kontinuierlichen Schnitt mittels Thermografie

2. Kolloquium zum SFB/TR-96
24.10 - 25.10.2012, Chemnitz



Referent:
Dipl.-Ing. Matthias Brockmann,
WZL RWTH Aachen

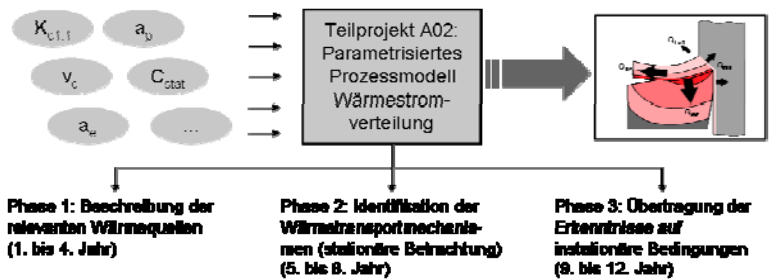
Forschungsziel des TP A02

Globales Ziel des Teilprojektes ist die **parametrierte Modellierung der Wärmestromaufteilung beim Fräsen**. Die hierfür erforderlichen Teilziele für die einzelnen Phasen ergeben sich daraus wie folgt:

Phase 1: Parametriertes Prozessmodell der Wärmequellterme für Reibung und Scherung

Phase 2: Stationäres Prozessmodell zur Wärmestromaufteilung

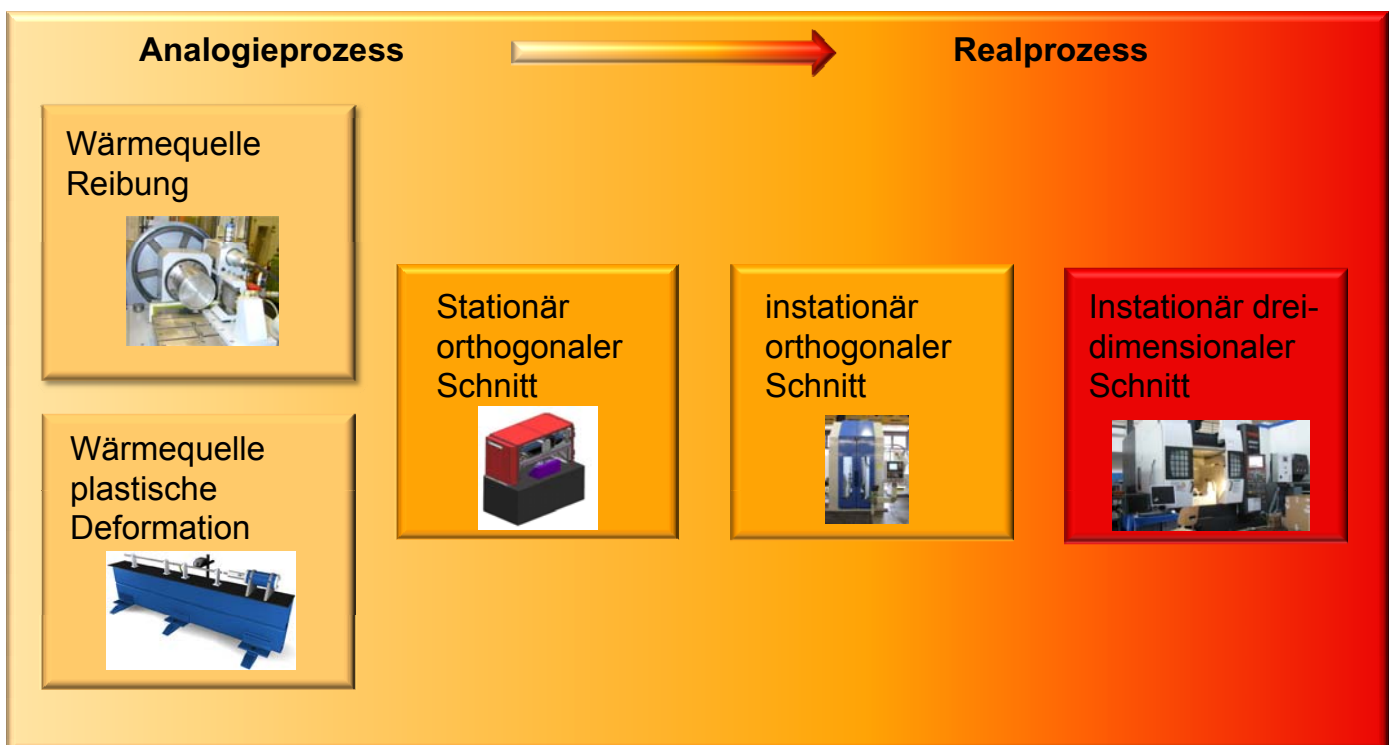
Phase 3: Übertragung auf instationäres Prozessmodell für Fräsprozesse



$$\underbrace{\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{Wärmeausbreitung (instationär)}} = \underbrace{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}}_{\text{Wärmeausbreitung (stationär)}} + \underbrace{\frac{\dot{\Phi}'''}{\lambda}}_{\text{Wärmequellterm}}$$

$$\dot{q}'' = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}$$

- 1 Experimentelle Methodik
- 2 Versuchsprüfstand und Messaufbau
- 3 Experimentelle Versuchsdurchführung
- 4 Analyse und Bewertung
- 5 Zusammenfassung und Ausblick



1 Experimentelle Methodik

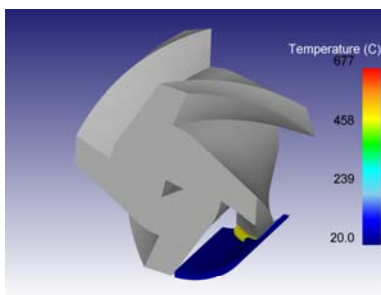
2 Versuchsprüfstand und Messaufbau

3 Experimentelle Versuchsdurchführung

4 Analyse und Bewertung

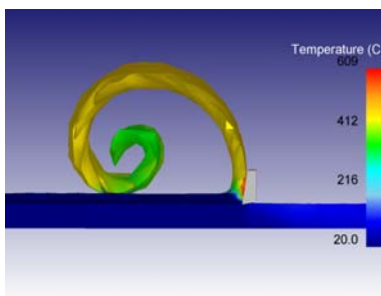
5 Bewertung

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

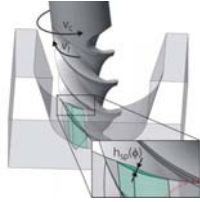


Translatorische Zerspaltung

- 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«



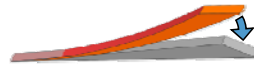
»Realer Fräsprozess«



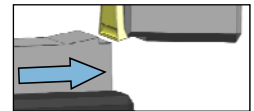
»Reale Spanungsgeometrie«



»Vereinfachte Spanungsgeometrie«

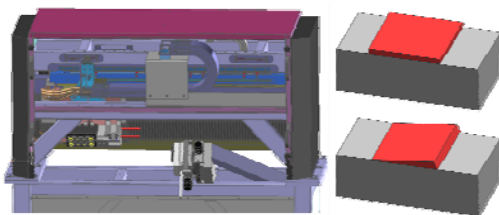


»Analogie Fräsprozess«



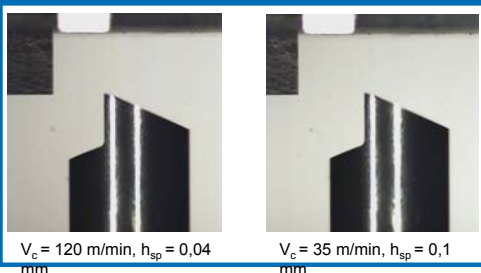
Transformations-Funktion

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

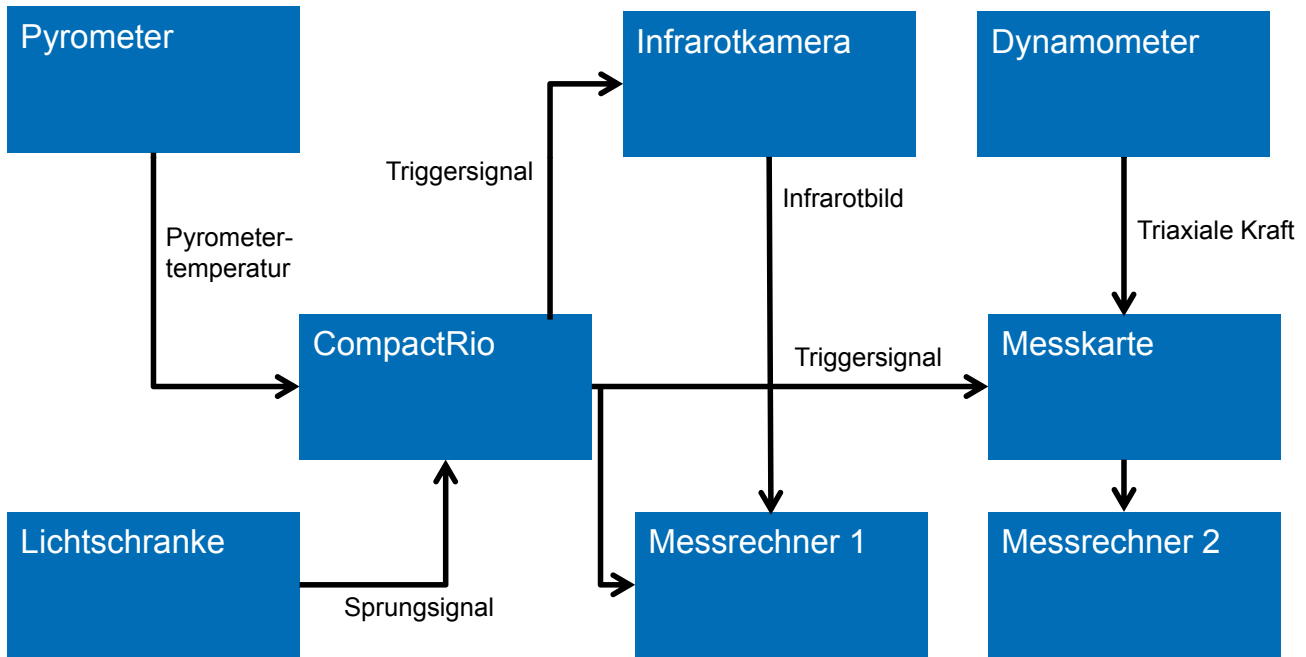
Orthogonalschnitt - Böhler S790



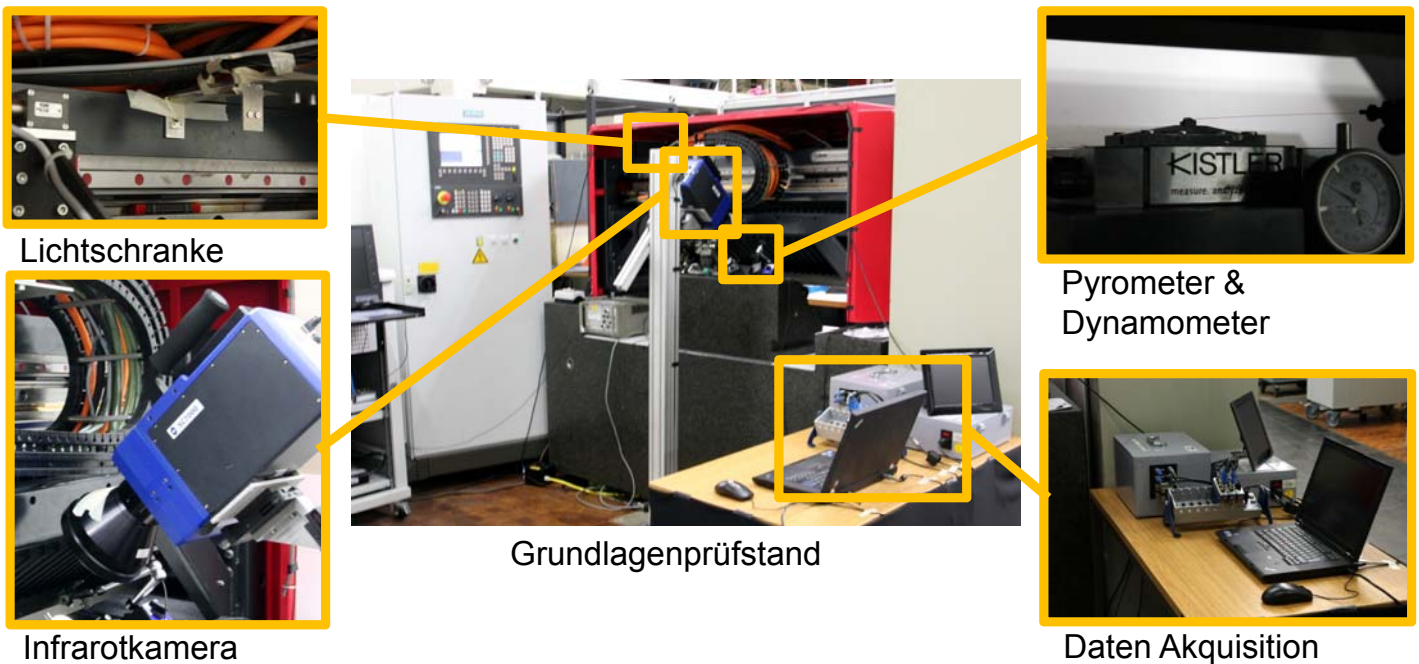
$V_c = 120$ m/min, $h_{sp} = 0,04$
mm

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

Messkette



Versuchsaufbau



1 Experimentelle Methodik

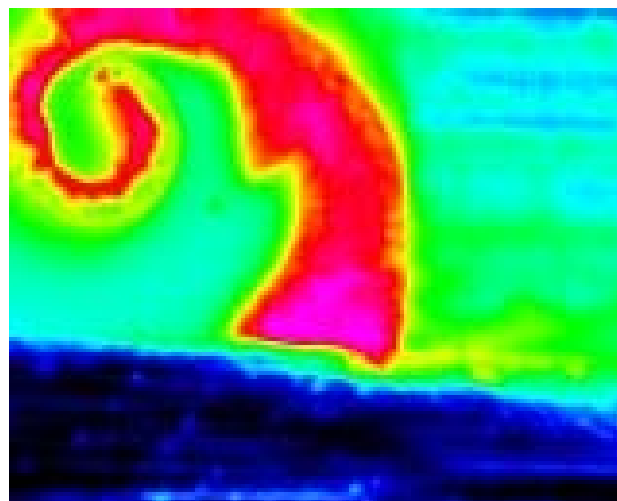
2 Versuchsprüfstand und Messaufbau

3 Experimentelle Versuchsdurchführung

4 Analyse und Bewertung

5 Bewertung

Kraft- und Temperaturmessung



Einsatz der Infrarotkamera

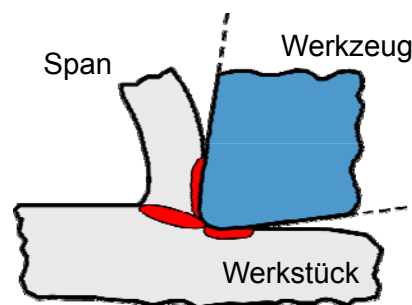
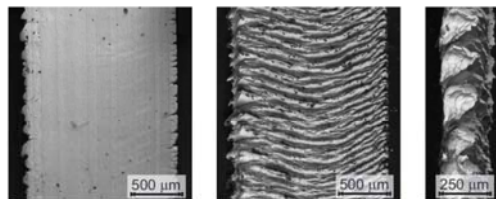
- Die Temperaturen die bei der Zerspanung auftreten sind seit etwa 1930 Gegenstand der Forschung und spielen eine signifikante Rolle bei der Charakterisierung des Zerspanprozesses.
- Erste Messungen wurden mit kalorimetrischen oder thermoelektrischen Messmethoden durchgeführt, diese Messungen sind in den meisten Fällen zu langsam für die wissenschaftliche (instationäre) Untersuchungen.
- Das erste Teilstrahlpyrometer wurde 1985 von Ueda entwickelt, in der Literatur sind selbst heutzutage wenige Untersuchungen mit thermophysikalischen Messungen veröffentlicht.
- Der Einsatz einer Infrarotkamera bietet den Vorteil der direkten Messung eines Temperaturfeldes im Gegensatz zur Messung eines gemittelten Temperatursignals an einer festen Messposition.
- Der Nachteil beim Einsatz einer Infrarotkamera sind die nicht bekannten Emissionsgrade und deren Veränderungen, dieses Problem kann ansatzweise mit einem Zweifarbenpyrometer gelöst werden.

„Thermo-electric measurement devices are not usable for scientific temperature measurements, only thermographic measurements devices are capable to detect exact temperatures“

Bickel 1963, Lenz 1964, , Silva&Wallbank 1999, Müller 2004

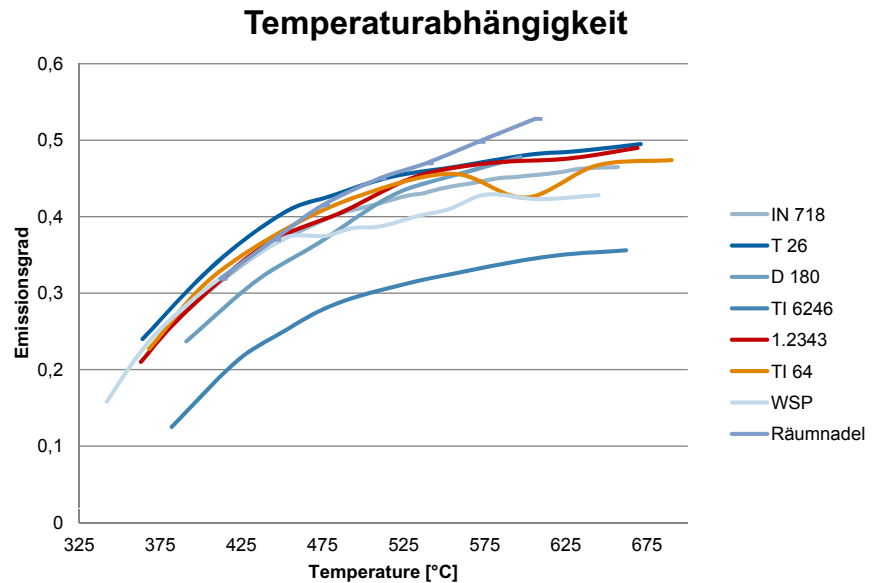
Emissionsgrade beim orthogonalen Schnitt

- Für die drei Komponenten des orthogonalen Schnittprozesses Span, Werkzeug und Werkstück müssen verschiedene Emissionsgradabhängigkeiten berücksichtigt werden.
- Der Span bestehend aus dem Werkstückmaterial weist im Allgemeinen eine raue Oberfläche auf.
- Das Werkzeug besteht in den meisten Fällen aus Hartmetall oder HSS.
- Das Werkstück bestehend aus metallischem Werkstoff weist im Allgemeinen niedrigere Temperaturen ausserhalb der Reib- und Scherzonen auf.



Temperaturabhängigkeit des Emissionsgrad

- Um die Abhängigkeit des Emissionsgrad für die einzelnen Komponenten zu berücksichtigen wurden Versuche zur Temperaturabhängigkeit der Emissionsgrade im relevanten Temperaturbereich durchgeführt.
- Für die Validierung der Temperatur wurde das Zweifarbenpyrometer eingesetzt.
- Die betrachteten Werkstoffe zeigen im Temperaturbereich einen sehr niedrigen Emissionsgrad
- Im betrachteten Temperaturbereich sind signifikante Änderungen des Emissionsgrad zu beobachten.



Hintergrundstrahlung und Reflektion

- Aufgrund der niedrigen Emissionsgrade bei Metallen ist der Einfluss der Hintergrundstrahlung aufgrund der Reflektion von signifikanter Bedeutung.
- Um den Einfluss auf die Untersuchungen so gering wie möglich zu halten bzw. zu quantifizieren kann entweder der Emissionsgrad des Messobjekts verbessert werden oder der Einfluss der Umgebung kontrolliert werden.
- Die Verbesserung des Emissionsgrades wird durch gezielte Veränderung der Oberfläche erzielt, hier wird zur Zeit ein Lack aufgetragen (Problem: Einfluss veränderliche Lackdicke)
- Zur Zeit wird überprüft ob eine Beschichtung der Messobjekte, welche hochgenau aufgetragen werden kann, entsprechende Emissionsgradverbesserungen gewährleisten kann
- Der Einfluss des Umgebungseinflusses wird derzeit durch Abschirmung des Hintergrundes kontrolliert
- Zur Zeit wird überprüft ob eine gezielt kontrollierte Hintergrundstrahlung mit Hilfe eines Flächenstrahlers einen Mehrwert bei Einfluss der Reflektion hat oder zumindest Auskunft über den Einfluss der Hintergrundstrahlung geben kann

1 Experimentelle Methodik

2 Versuchsprüfstand und Messaufbau

3 Experimentelle Versuchsdurchführung

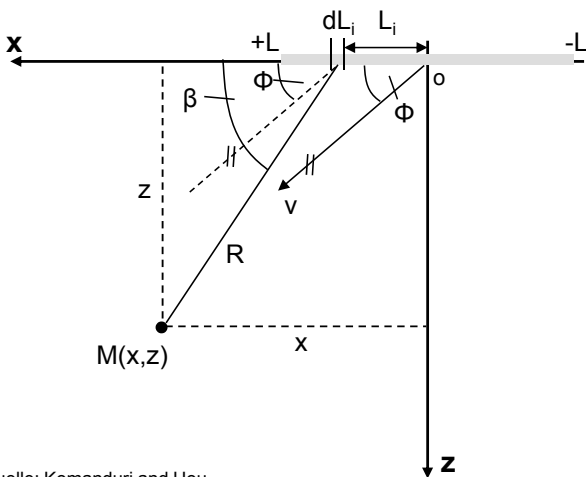
4 Analyse und Bewertung

5 Bewertung

Modellierung der Scherwärmequelle

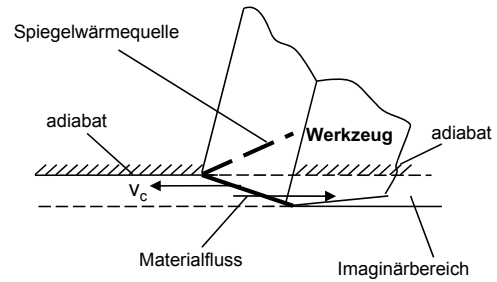
Bewegende angestellte Bandwärmequelle

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

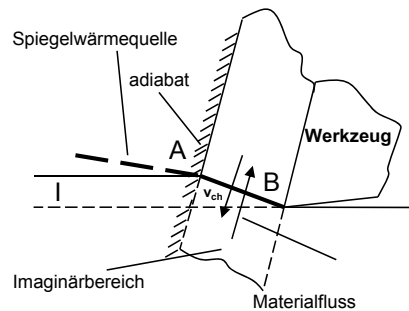


Quelle: Komanduri and Hou

Modellierung für Temperaturverteilung im Werkstück



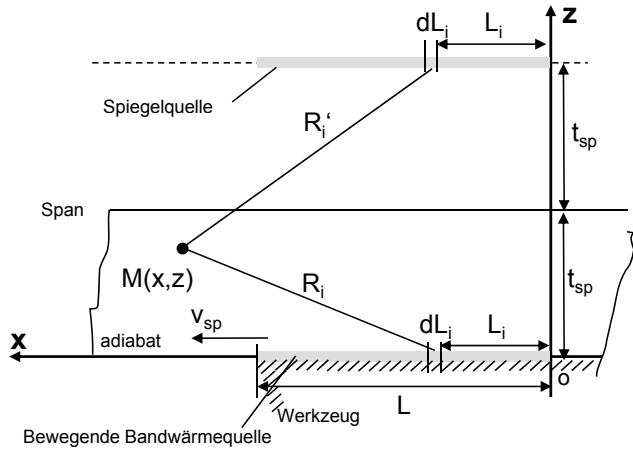
Modellierung für Temperaturverteilung im Span



Modellierung der Reibwärmequelle

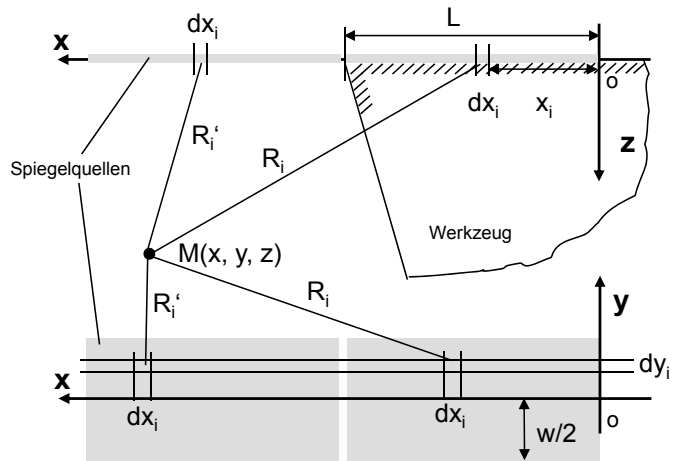
Modellierung für Temperaturverteilung im Span

$$\Theta_m = \frac{\dot{q}'}{\pi\lambda} \int_0^{+L} e^{-(x-L_i)v_{sp}/2a} \cdot \left[K_0(R_i v_{sp}/2a) + K_0(R_i' v_{sp}/2a) \right] dL_i$$



Modellierung für Temperaturverteilung im Werkzeug

$$\Theta_m = \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda} \int_{y_i=-w/2}^{+w/2} dy_i \int_{x_i=0}^L \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_i'} \right) dx_i$$



Quelle: Komanduri and Hou

Annäherung der Lösung

Grundproblem:

$$\Theta_m = \int_{u=0}^{u=p} e^{-u \cos(\Phi)} K_0(u) du$$

mit: $u := \frac{v(x-L_i)}{2a}$

Annahme:

$u \ll 1 \rightarrow K_0(u) \approx -\ln(u/2)$

Vereinfachtes Problem:

$$\Theta_m = -\int e^{-ku} \ln(u/2) du$$

$$\int e^{-ku} \ln(u/2) du = -\frac{1}{k} [e^{-ku} \ln(2/u) + \ln(u)] + u$$

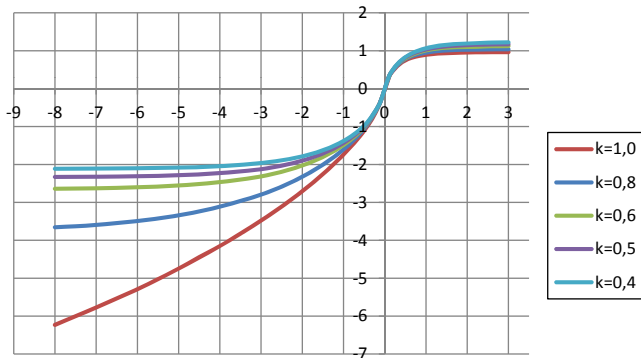
$$= -\frac{1}{k} \ln(2) e^{-ku} - \int e^{-ku} \ln(u) du$$

$$= -\frac{1}{k} \ln(2) e^{-ku} + \frac{1}{k} [e^{-ku} \ln(u) - \int \frac{e^{-ku}}{u} du]$$

$$= -\frac{1}{k} \ln(2) e^{-ku} + \frac{1}{k} \left\{ e^{-ku} \ln(u) - [\ln(u) + \frac{-ku}{1 \cdot 1!} + \frac{(-ku)^2}{2 \cdot 2!} + \frac{(-ku)^3}{3 \cdot 3!} + \dots] \right\}$$

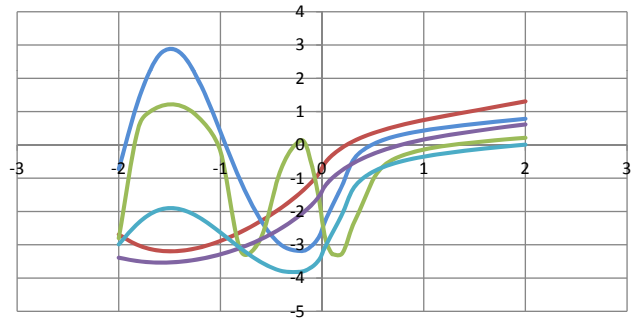
Bewertung der Vereinfachung

Lösung des Integrals



$$\Theta_m = \int_{u=0}^{u=p} e^{-u \cos(\Phi)} K_0(u) du$$

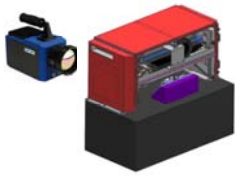
Annäherung der Lösungen



$$-\frac{1}{k} [e^{-ku} \ln(2/u) + \ln(u)] + u$$

- 1 Experimentelle Methodik
- 2 Versuchsprüfstand und Messaufbau
- 3 Experimentelle Versuchsdurchführung
- 4 Analyse und Bewertung
- 5 Bewertung

Zusammenfassung



- Experimente zur stationären Wärmeausbreitung beim orthogonalen Schnitt wurden an einem Analogieprüfstand durchgeführt.
- Zur Messung des Temperaturfeldes wurde eine Infrarotkamera in Verbindung mit einem Zweifarbenpyrometer eingesetzt.
- Die Messaufgabe stellt hohe Anforderungen an den Versuchsaufbau, insbesondere bezüglich zeitlicher Auflösung bei niedrigen Temperaturen und niedrigen Emissionsgraden.

Ausblick



- **Reduktion des Umgebungseinfluss:** Steuerung des Umgebungseinflusses durch Hintergrundstrahler und beschichteten Werkzeugen
- **Einsatz einer anderen Infrarotkamera:** Vergleich der Ergebnisse mit Kamera niedrigerer Auflösung
- **Untersuchung des Einflusses veränderlicher Quellstärke:** Durchführung mittels Profilierung der Bauteile

1 Experimentelle Methodik

2 Versuchsprüfstand und Messaufbau

3 Experimentelle Versuchsdurchführung

4 Analyse und Bewertung

5 Zusammenfassung und Ausblick

MODELLIERUNG DER VERLUSTQUELLEN IN ANTRIEBSMOTOREN

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

Die Verlustleistung elektrischer Antriebsmotoren zählt zu den Hauptwärmequellen einer Werkzeugmaschine. Daher ist es wichtig, die Bestimmung der Antriebsverluste als einen wesentlichen Bestandteil für die Berechnung des thermischen Verhaltens des elektrischen Antriebs sowie der gesamten Werkzeugmaschine besonders sorgfältig durchzuführen. Insofern sind die Verlustbestimmung und das Aufstellen der thermischen Modelle der Antriebe die maßgeblichen Aufgaben im Teilprojekt C04.

Grundsätzlich werden Verluste in elektrischen Motoren durch drei verschiedene Mechanismen hervorgerufen, den Stromfluss in den Wicklungen (Strom-Wärme-Verluste), die zeitliche Änderung des magnetischen Feldes in ferromagnetischen Eisenteilen (Hystereseverluste) und allen leitfähigen Motorkomponenten (Wirbelstromverluste) sowie der Reibung. Je nach Art und Aufbau des Antriebsmotors sind die einzelnen Anteile unterschiedlich groß und lassen sich mitunter nur unzureichend genau bestimmen. Im Allgemeinen lassen sich die einzelnen Verlustfaktoren nur durch eine Vermessung des jeweiligen Motors ermitteln. Da in allen elektrischen Antriebstypen prinzipiell die gleichen Mechanismen wirken, lassen sich jedoch bei allen Motoren die gleichen Messverfahren anwenden. Hierbei ist zu beachten, dass einige der zu messenden Größen nur indirekt aufgenommen werden können. Beispielsweise ist die Messung des Stroms im Rotor einer Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer auf Grund der kurzgeschlossenen Wicklung nicht möglich, eine direkte Messung der Wicklungsverluste des Rotors ist deshalb nicht durchführbar. Wie Vergleichsmessungen mit Schleifringläufermotoren gezeigt haben, bei denen der Rotorstrom gemessen werden kann, lassen sich die Rotorverluste dennoch hinreichend genau über die auf den Rotor übertragene Leistung und dessen Schlupf berechnen. Vergleichbare Berechnungen lassen sich auch für die Verluste anstellen, die innerhalb der Motorteile durch Änderungen des Magnetfeldes auftreten.

Mit Hilfe der messtechnisch ermittelten Verlustfaktoren ist eine Bestimmung des Gesamtverlustes des Antriebs für jeden beliebigen Arbeitspunkt der Werkzeugmaschine möglich.

Die so ermittelten Verlustmodelle können im nächsten Schritt zur Bestimmung des Wärmeeintrags der Antriebe in die Werkzeugmaschine verwendet werden, indem die berechneten Verluste als Eingangsgrößen für ein thermisches Modell des vollständigen Antriebs dienen und somit die Wärmeströme innerhalb des Antriebs und über die Welle, das Gehäuse und die Kühlung hin zum restlichen Teil der Werkzeugmaschine berechnet werden. Damit ist die Berechnung des thermischen Einflusses des Antriebs auf das Gesamtsystem möglich.

Kontakt:

Stefan Winkler

TU Chemnitz, Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe

09107 Chemnitz

Tel.: 0371 531-24210

E-Mail: ewainfo@etit.tu-chemnitz.de

24. Oktober 2012

Teilprojekt C04 - Thermo-energetische Motoroptimierung

Modellierung der Verlustquellen in Antriebsmotoren

Stefan Winkler

SFB TR96 2. Kolloquium

- 1 Übersicht der Verluste in Antriebsmotoren

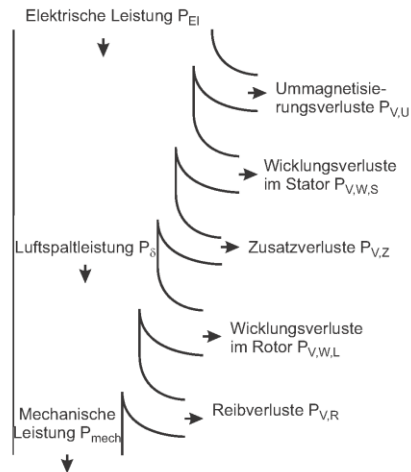
- 2 Bestimmung der einzelnen Verlustanteile
 - Strom-Wärme-Verluste
 - Ummagnetisierungs- und Reibverluste
 - Zusatzverluste

- 3 Verlustmodell als Eingangsgröße des thermischen Modells

Übersicht der Verluste in Antriebsmotoren

- Strom-Wärme-Verluste
- Ummagnetisierungsverluste
 - Hystereseverluste
 - Wirbelstromverluste
- Reibverluste
- Zusatzverluste

Übersicht über alle Verluste eines Elektromotors



Übersicht der Verluste in Antriebsmotoren

- Strom-Wärme-Verluste
- Ummagnetisierungsverluste
 - Hystereseverluste
 - Wirbelstromverluste
- Reibverluste
- Zusatzverluste

Strom-Wärme-Verluste treten in den Motorwicklungen als Folge des Stromflusses auf.

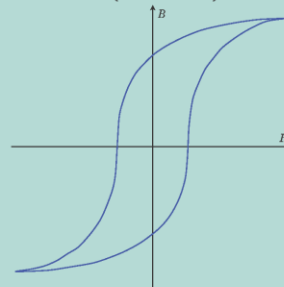
$$P = U \cdot I = R \cdot I_{\text{Eff}}^2$$

Übersicht der Verluste in Antriebsmotoren

- Strom-Wärme-Verluste
- Ummagnetisierungsverluste
 - Hystereseverluste
 - Wirbelstromverluste
- Reibverluste
- Zusatzverluste

Hystereseverluste durch das Ummagnetisieren ferromagnetischer Motorteile.

$$P_{V,H} = k_{V,H,1.5} \cdot k_B \cdot \left(\frac{f}{50 \text{ Hz}}\right) \cdot \left(\frac{B}{1.5 \text{ T}}\right)^2$$



Übersicht der Verluste in Antriebsmotoren

- Strom-Wärme-Verluste
- Ummagnetisierungsverluste
 - Hystereseverluste
 - Wirbelstromverluste
- Reibverluste
- Zusatzverluste

Wirbelströme werden durch Spannungen hervorgerufen, die durch die Änderung des Magnetfeldes induziert werden.

$$U_{\text{Ind}} \sim \frac{d\Phi}{dt}, I_E = \frac{U_{\text{Ind}}}{R}$$

$$P_{V,E} = k_{V,E,1.5} \cdot k_B \cdot \left(\frac{f}{50 \text{ Hz}}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{1.5 \text{ T}}\right)^2$$

Übersicht der Verluste in Antriebsmotoren

- Strom-Wärme-Verluste
- Ummagnetisierungsverluste
 - Hystereseverluste
 - Wirbelstromverluste
- Reibverluste
- Zusatzverluste

Reibverluste werden durch die Reibung mechanischer Komponenten hervorgerufen.

$$P_{V,R} = M_R \cdot \omega = f(n)$$

Übersicht der Verluste in Antriebsmotoren

- Strom-Wärme-Verluste
- Ummagnetisierungsverluste
 - Hystereseverluste
 - Wirbelstromverluste
- Reibverluste
- Zusatzverluste

Alle Verluste, die nicht zusammen mit den anderen Verlusten gemessen werden können.

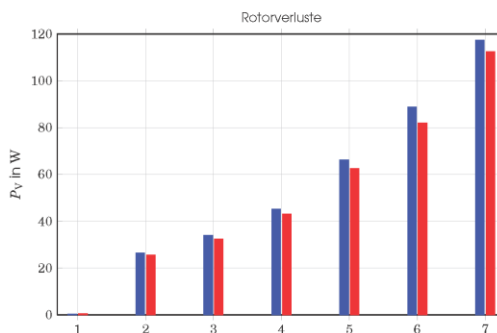
Meist als $P_{V,Z} = 0.5\% \cdot P_N \cdot \left(\frac{I}{I_N}\right)^2$ angegeben.

Bestimmung der einzelnen Verlustanteile
Strom-Wärme-Verluste

Die Verluste werden über den Wicklungswiderstand und den Leiterstrom bestimmt. Dies gilt für alle Motortypen, sowohl bei Messung und Rechnung. für Drehstrommotoren lautet die Gleichung folgendermaßen:

$$P_{V,W} = 1,5 \cdot R_{Klemme} \cdot I_{Leiter, Eff}^2$$

Bei Kurzschlussläufern ist der Strom nicht messbar. Hier werden die Verluste über die Luftspaltleistung und den Schlupf bestimmt $P_{V,W,R} = P_{\delta} \cdot s$.



Bestimmung der einzelnen Verlustanteile
Ummagnetisierungs- und Reibverluste

Als lastunabhängige Verluste werden diese Verlustarten bei leerlaufender Maschine gemessen.

Asynchronmotor

Bei Asynchronmotoren ist die Feldstärke abhängig von der Spannung, daher erfolgt die Berechnung über

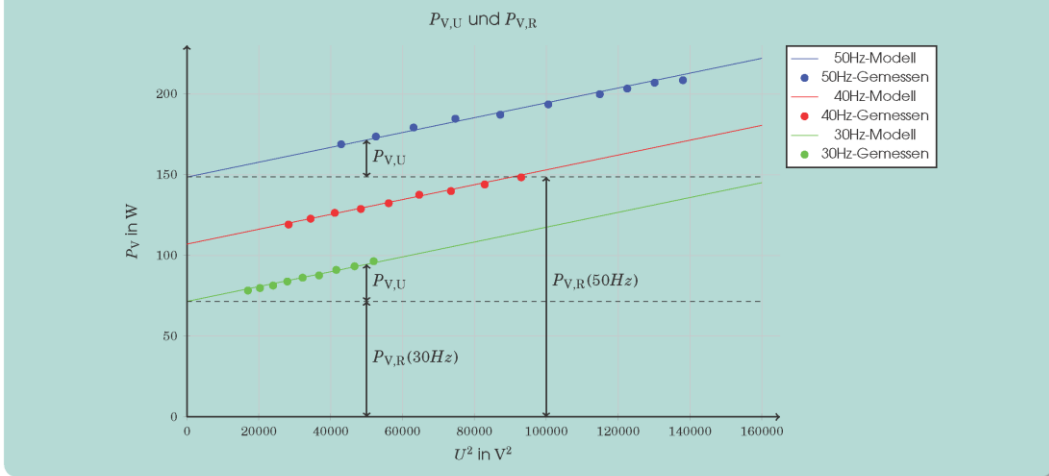
$$P_{V,K} = \underbrace{k_{V,U} \cdot U^2}_{P_{V,U}} + P_{V,R}(n).$$

Permanenterregter Synchronmotor

Bei Synchronmotoren ist die Feldstärke konstant, daher ist $P_{V,K} = P_{V,U}(n) + P_{V,R}(n)$ nur abhängig von der Drehzahl.

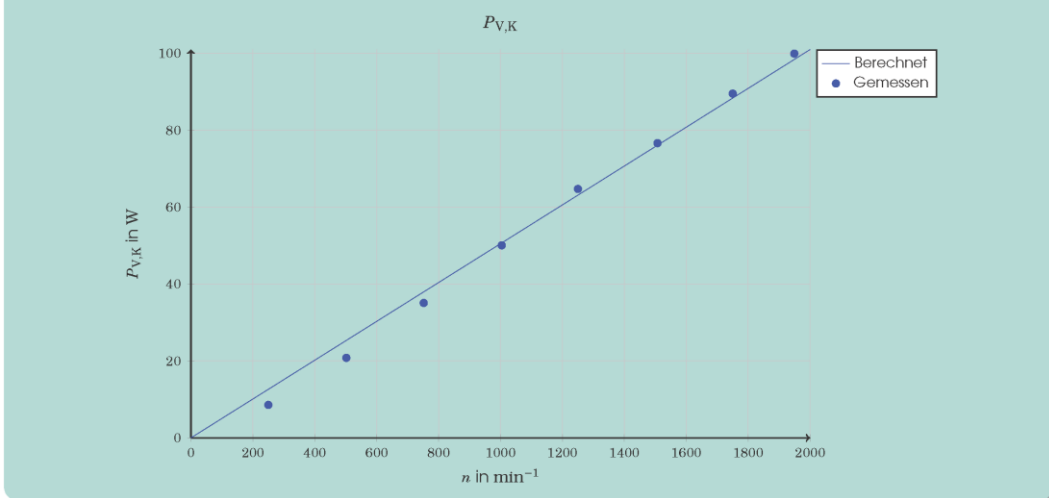
Bestimmung der einzelnen Verlustanteile
Ummagnetisierungs- und Reibverluste

Asynchronmotor



Bestimmung der einzelnen Verlustanteile
Ummagnetisierungs- und Reibverluste

Permanenterregter Synchronmotor



Bestimmung der einzelnen Verlustanteile
Zusatzverluste

Ursache der Zusatzverluste sind zum einen Skin-Effekte in den Wicklungen. Zum anderen Wirbelströme, die durch Oberschwingungen des Magnetfeldes hervorgerufen werden.

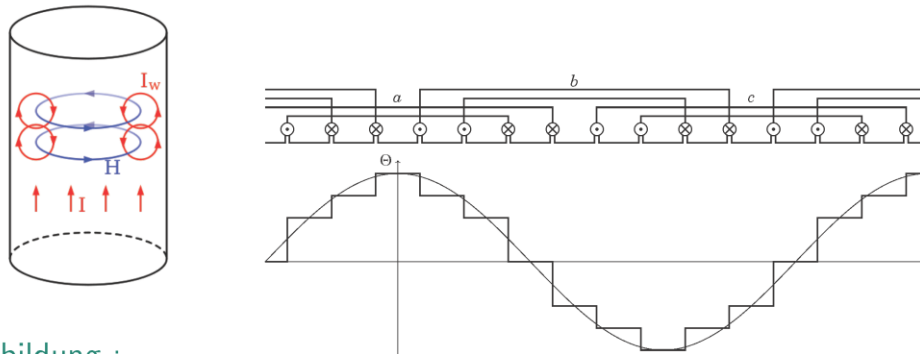


Abbildung :
[de.wikipedia.org]

Bestimmung der einzelnen Verlustanteile
Zusatzverluste

Zusatzverluste treten nur innerhalb der Motorkomponenten auf, daher ist eine direkte Messung unmöglich.

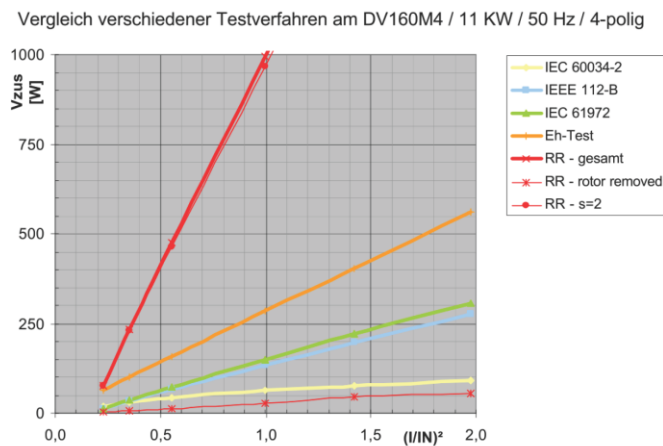
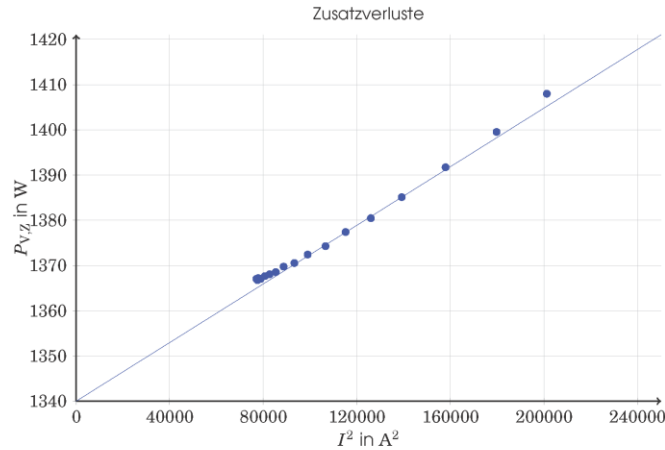


Abbildung : [SEW - Zusatzverluste in Asynchronmaschinen]

Bestimmung der einzelnen Verlustanteile
Zusatzverluste

Die Zusatzverluste lassen sich berechnen, indem die Messwerte nach folgender Gleichung approximiert werden:

$$P_{V,Z} = k_{V,Z} \cdot I_L^2 + P_{V,Z,K}$$



Verlustmodell als Eingangsgröße des thermischen Modells

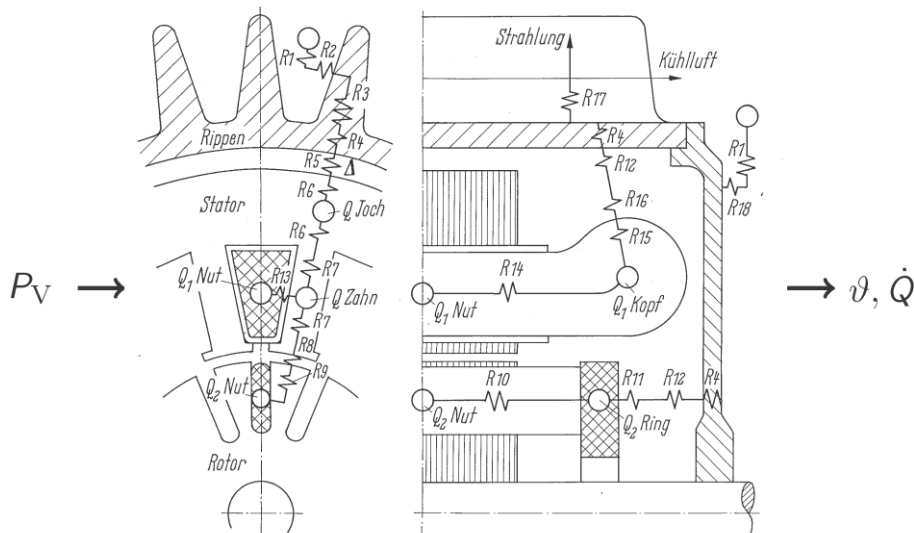
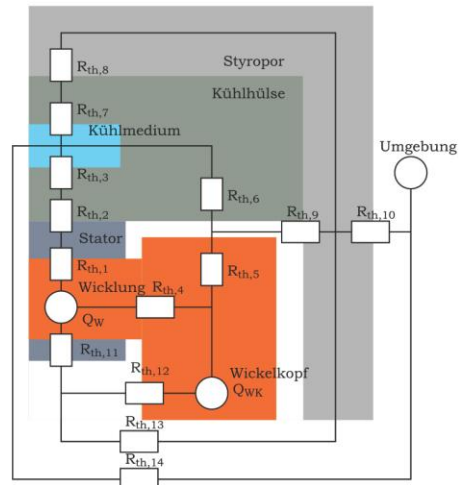
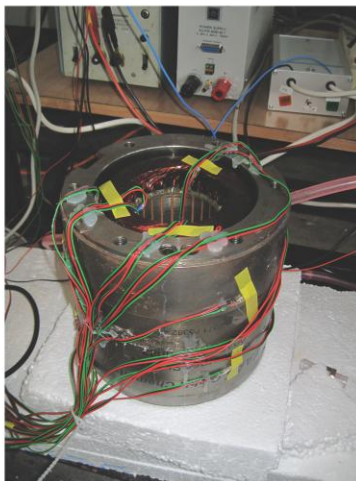


Abb. 21. Wärmeschaltbild in einem Rippenmotor
[Wiedemann, Kellenberger; Konstruktion el. Maschinen]

Verlustmodell als Eingangsgröße des thermischen Modells

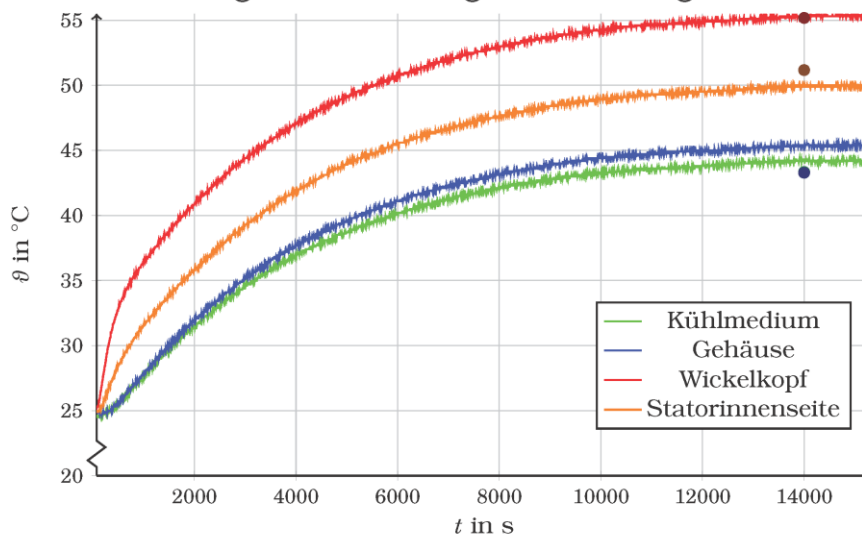
Aufbau des thermischen Modells auf Basis eines Spindelstators.

$$\Delta\vartheta = R_{th} \cdot \dot{Q}$$



Verlustmodell als Eingangsgröße des thermischen Modells

Vergleich Rechnung und Messung



SIMULATION DER ERWÄRMUNG VON SPINDELLAGERN AUF DER BASIS EINES LOKALEN REIBMODELLS

*St. Bäumlner, C. Brecher, D. Haber, J. Rossaint; Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen WZL der RWTH Aachen,
K. Großmann, B. Kauschinger, St. Schroeder; Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik,
TU Dresden*

Der wissenschaftliche Fokus des Teilprojekts „Komponenten- und Baugruppenuntersuchung“ konzentriert sich auf die Untersuchung des thermo-elastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinenkomponenten und -baugruppen und sieht die Entwicklung von Simulationsmodellen zur Berechnung der thermisch bedingten Strukturverformungen in Abhängigkeit von messbaren physikalischen Größen gestützt auf experimentelle Versuche vor.

Dabei werden zwei Ansätze verfolgt: Einerseits der Top-Down-Ansatz, bei dem eine Werkzeugmaschine als Ganzes untersucht und simuliert wird, um ein grobes Modell aufzustellen, die Hauptwärmequellen und -senken zu identifizieren und festzulegen, welche Komponenten detailliert modelliert werden müssen.

Andererseits wird der Bottom-Up-Ansatz verwendet. Dafür werden die einzelnen Komponenten der Werkzeugmaschine detailliert zunächst auf Prüfständen untersucht, anschließend simuliert und zu einem Gesamtmodell zusammengeführt. Es werden passive und aktive Komponenten betrachtet. Die aktiven Komponenten sind die Spindel mit ihren Lagern und die Führungssysteme, bestehend aus Kugelgewindtrieben, Führungsschienen und -schuhen; also alle Bauteile, die durch Reibung Wärme erzeugen. Thermisch passive Komponenten transportieren lediglich Wärme bzw. geben sie an die Umgebung ab. Beispiele hierfür sind das Maschinenbett, der Maschinentisch und der Maschinenständer.

Bisher lag ein Hauptaugenmerk auf der Betrachtung der Spindellager. Um die Spindel in das Gesamtmodell der Werkzeugmaschine einbringen zu können, müssen der Wärmeeintrag und die Verlagerung durch die Spindellager bekannt sein. In der Literatur existieren verschiedene Ansätze, wie Reibmomente und die damit verbundenen Verluste im Kugellager berechnet werden können. Grundsätzlich können drei unterschiedliche Formen von Modellen und Mischformen daraus verwendet werden:

1. Korrelative, auf Messdaten basierende Modelle
2. Physikalische Modelle, in denen das Gesamtreibmoment aus verschiedenen Anteilen wie Bohrreibung, Planschreibung und Käfigreibung zusammengesetzt wird
3. Komplexe Teilmodelle, in denen meist auf der Basis von einem geometrischen Modell und finiten Elementen Teilaspekte numerisch bestimmt werden

Diese Ansätze sind jeweils nur für bestimmte Einsatz-/Randbedingungen geeignet. So müssen beispielsweise als Basis für die korrelativen Modelle viele verschiedene Experimente durchgeführt werden, um die Einflüsse des Schmiermittels, der Geometrie und der Belastung zu berücksichtigen. Innerhalb der physikalischen Modelle gibt es große Unsicherheiten, beispielsweise bei der Ermittlung des Reibanteils, der durch die Viskosität des Schmiermittels entsteht.

Um Unsicherheiten möglichst gering zu halten, ist am Werkzeugmaschinenlabor ein neues Reibmodell für Spindellager entwickelt worden, welches auf der Überlegung basiert, dass sich die Wälz- und Druckwinkel sowie die Winkelgeschwindigkeiten und Kontaktkräfte im Lager so einstellen, dass ein quasistationärer Gleichgewichtszustand herrscht. Somit ergibt sich die Summe aller angreifenden Momente und Kräfte zu Null, wobei neben den Normalkräften sämtliche Reibkräfte, Einflüsse der Massenträgheit, die Kräfte zwischen Kugel und Käfigtasche und die daraus entstehenden Momente berücksichtigt werden. In einem iterativen Prozess werden die Wälzwinkel und Winkelgeschwindigkeiten bestimmt, welche mit experimentellen Ergebnissen abgeglichen werden.

Am Werkzeugmaschinenlabor wurde ein Prüfstand entwickelt, auf welchem Spindellager detailliert unter verschiedenen definierten Lastzuständen untersucht werden können. Dabei werden die Vorspannkraft und die Drehzahl variiert. Durch die Messung des Drehmoments, der Axialverlagerung am Innenring, Temperaturen an Außen- und Innenring und der Drehzahl von Innenring und Käfig können unter anderem Rückschlüsse auf das Reibmoment und den Wälzwinkel gezogen werden.

Ein Abgleich zwischen dem Modell und den Experimenten brachte zufriedenstellende Übereinstimmung. Anschließend wurde in Abaqus ein Modell eines Spindellagers erstellt. Hiermit wird durch Beaufschlagung der ermittelten Reibkräfte die Temperaturverteilung im Lager bestimmt.

Um die Spindellager als Modelle in die Spindel und später in die Werkzeugmaschine integrieren zu können, wird zusätzlich zur Temperaturverteilung die Wärmeleistung und die Verlagerung der Lager benötigt. Die Berechnung dieser Größen ist als nächster Schritt geplant.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Dorothea Haber

WZL der RWTH Aachen

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

Steinbachstraße 19, 52074 Aachen

Tel.: 0241 8020609

E-Mail: D.Haber@wzl.rwth-aachen.de

Simulation der Erwärmung von Spindellagern auf der Basis eines lokalen Reibmodells

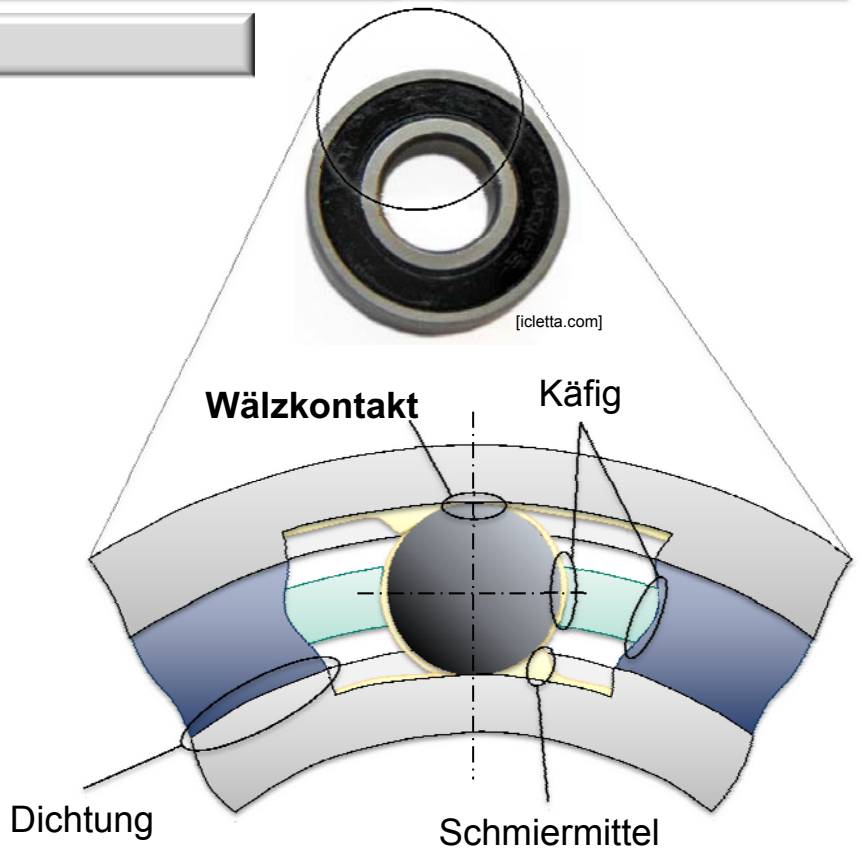
S. Bäumlner, C. Brecher, D. Haber, J. Rossaint; WZL
der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

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

- 1 Stand der Technik - Reibmodelle**
- 2 Vorstellung eines neuen Reibmodells für Spindellager**
- 3 Simulation der Temperaturentwicklung im Spindellager**
- 4 Zusammenfassung**

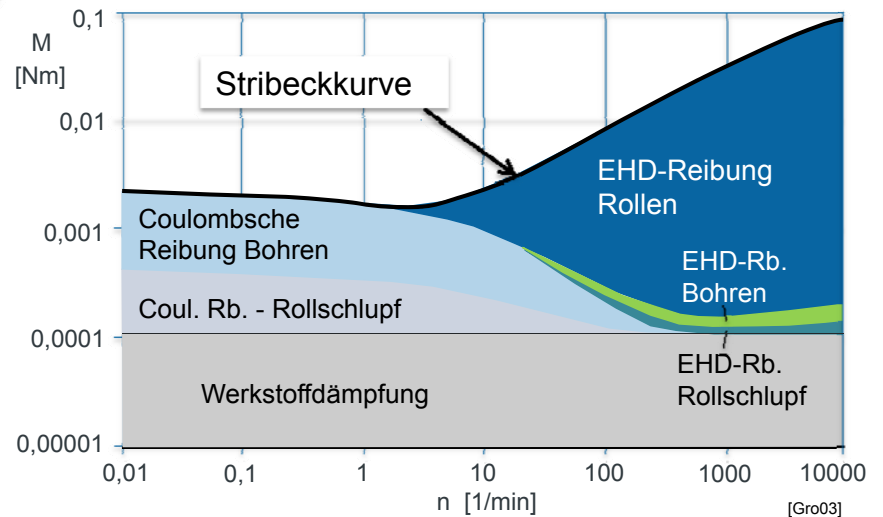
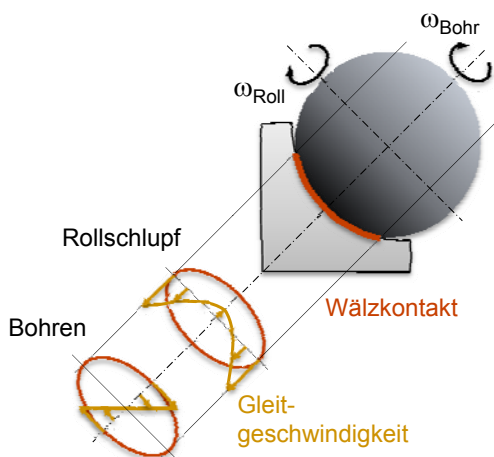
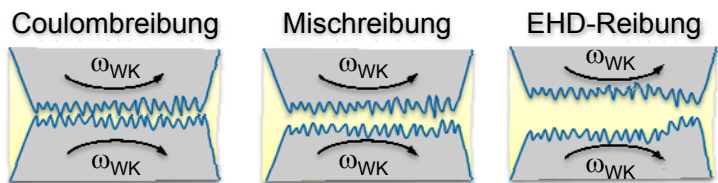
Reibstellen im Wälzlager

- Die einzelnen Reibanteile variieren je nach Aufbau, Größe und Betriebszustand des Lagers deutlich
- drehzahlabhängige Reibung
- Die Reibung berührender Dichtungen macht ca. die Hälfte der Gesamtreibung aus
- Käfigreibung hat je nach Kontakt geringen Einfluss
- hohes Schmiermittelvolumen führt zu hohen inneren Reibungswerten



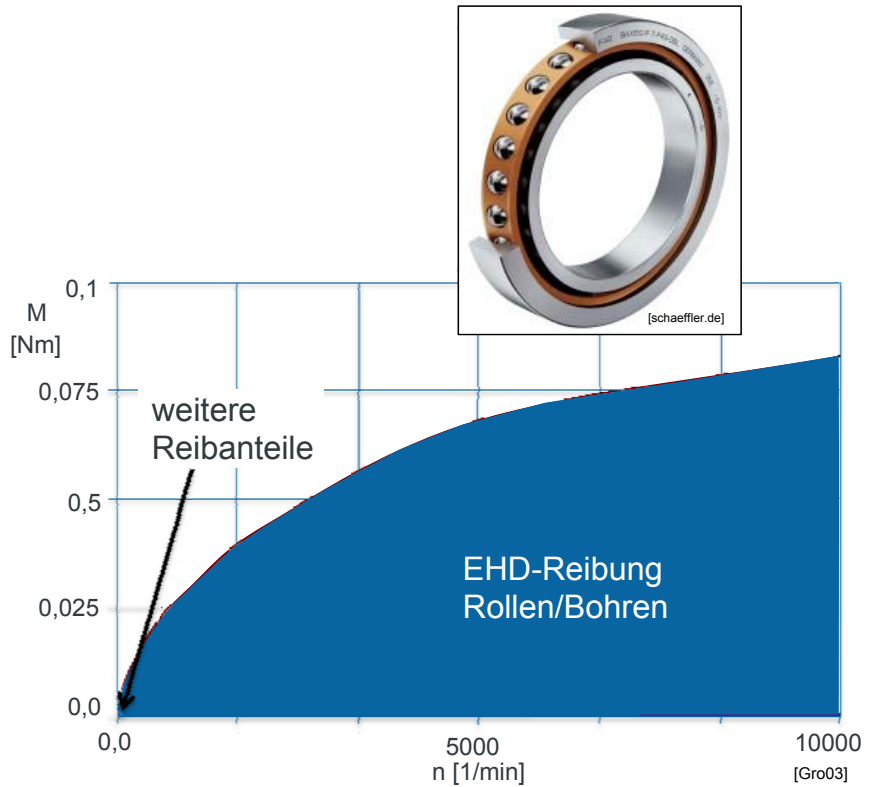
Reibungsmechanismen im Wälzkontakt

- Gleiten durch Bohren sowie Rollenschlupf
- Coulombsche Reibung
- Viskose Reibung oder Elastohydrodynamik (EHD)
- Werkstoffdämpfung



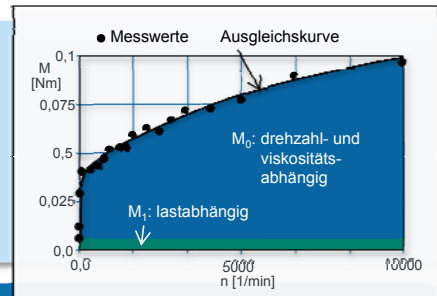
Reibungsmodelle: Reibungsanteile bei Spindellagern

- bei schnelldrehenden Schrägkugellagern sehr hoher Anteil EHD-Reibung
- insbesondere wegen geringer Vorspannkräfte und hohen Drehzahlen ist der Anteil der Coulombschen Reibung sehr niedrig
- für Verlustleistungsmodelle zusätzliche Abhängigkeit von Drehzahl ($P = M \cdot 2\pi n$)
- Coulombsche Reibung wirkt bei niedriger Drehzahl → vernachlässigbar



Kategorien von Lagerreibmodellen

1. Auf Messungen basierte korrelative Ansätze



Bohrmoment

$$M_{Bohr,C} = 0,6789 \cdot \mu_C \cdot X^{-0,4048} \cdot F^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{W_{RK}}{E}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \sin \alpha \cdot \left(\frac{r_C}{p_0}\right)$$

Viskosität

$$\eta_{p,t} = \eta_0 \cdot e^{-\alpha' \cdot p - \frac{(\alpha' \cdot p - 6)^2}{\alpha' \cdot p - 2}}$$

Schmierspalt

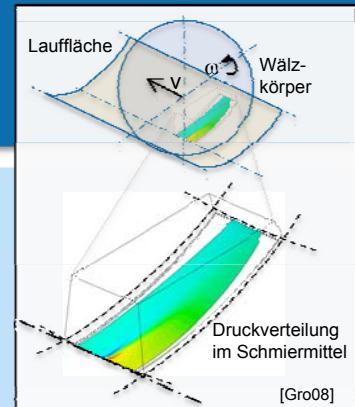
$$H_{0,ISOth} = 2,69 \cdot U^{0,67} \cdot G^{0,53} \cdot W^{-0,067}$$

Gesamtreibmoment

$$M_R = M_D + M_{Bohr,C} + M_{Roll,C} + M_{Bohr,h} + M_{Roll,h}$$

Weitere Anteile

2. Physikalisch basierte geschlossene Ansätze



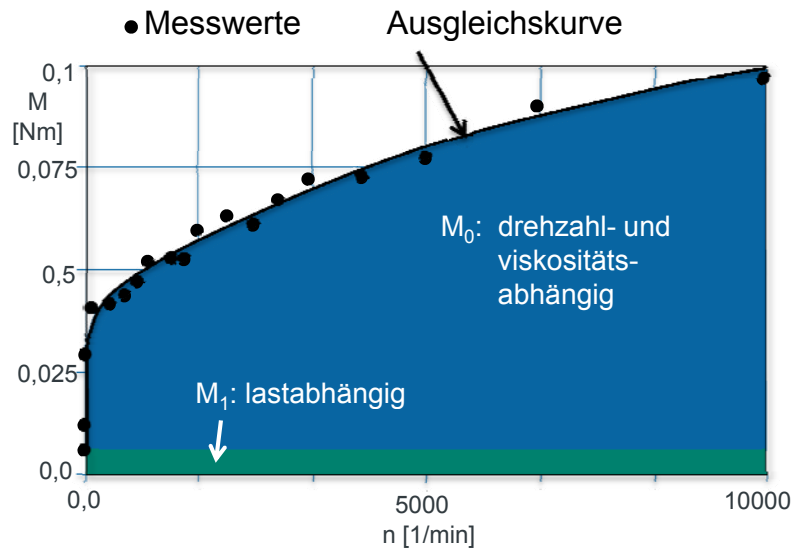
3. Komplexe Teilmodelle

1. Korrelative Modelle mit Berücksichtigung der wichtigsten Einflüsse

- Ansatz entwickelt von Palmgren (1957)
- Koeffizienten für Lagerart, Teilkreisdurchmesser, Schmierungsart basierend auf Messdaten
- erlaubt drehzahl- und viskositätsabhängige Beschreibung

Nachteile:

- Hersteller liefern Koeffizienten für gängigste Lagertypen, jedoch kaum für Spindellager
- Koeffizienten haben nur für diskrete Betriebspunkte Gültigkeit



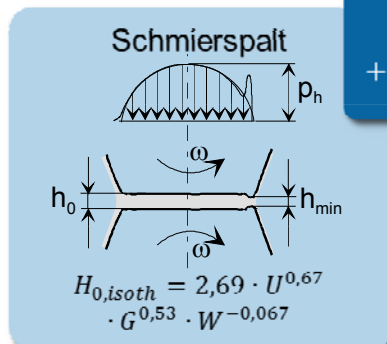
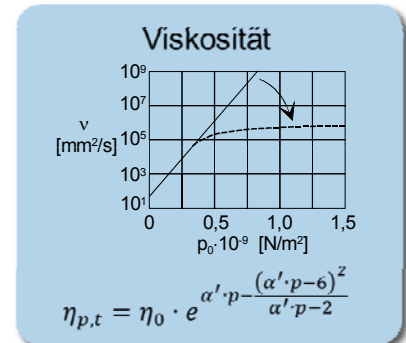
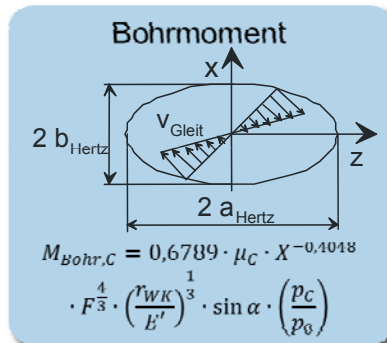
2. Geschlossene Ansätze mit Berücksichtigung weiterer Parameter

- physikalische Grundlage
- Beschreibung durch Vielzahl von Einzeleinflüssen u. Parametern

→ erweiterte Gültigkeit für Spindellager im Gegensatz zum Palmgrenansatz

Nachteile:

- unterschiedliche Qualität bei der Beschreibung der Einzeleinflüsse
- teils große Unsicherheiten bei den Eingangsgrößen (bsp. Reibwert)



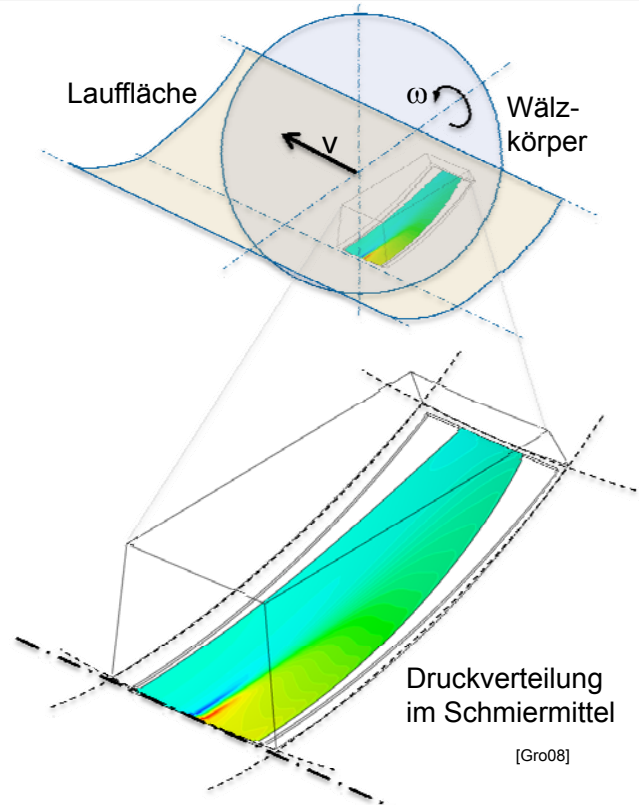
Gesamtreibmoment

$$M_R = M_D + M_{Bohr,C} + M_{Roll,C} + M_{Bohr,h} + M_{Roll,h}$$

Weitere Anteile

3. Komplexe Teilmodelle

- Komplexe Teilmodelle mit unterschiedlichen Charakteristiken
 - Geometrisch fein/grob aufgelöste Beschreibung
 - Iterativer/direkter Lösungsweg
 - ...
- Im Allgemeinen hoher Modellierungs- und Rechenaufwand
- erlaubt tiefere Untersuchung von Detailproblemen
- geeignet für Ableitung von Ersatzmodellen zur Beschreibung von Einzeleinflüssen
- wegen Rechenlast ungeeignet für Integration in Maschinenmodelle
- Teils große Unsicherheit bei den Eingangsgrößen



1 Stand der Technik - Reibmodelle

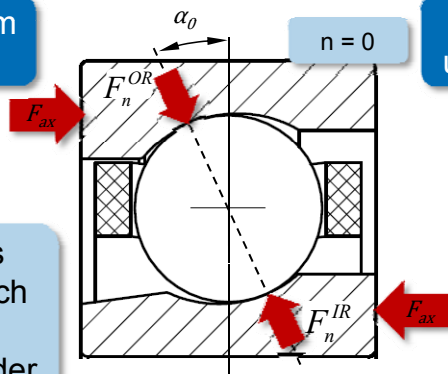
2 Vorstellung eines neuen Reibmodells für Spindellager

3 Simulation der Temperaturentwicklung im Spindellager

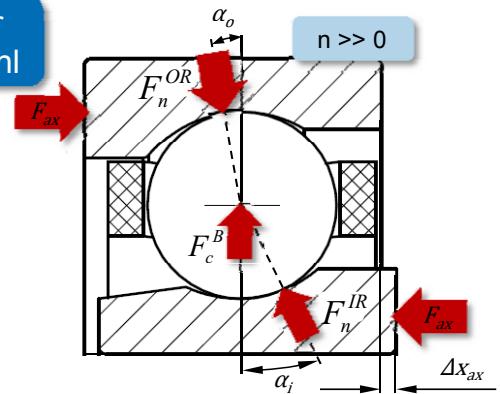
4 Zusammenfassung

Kinematik des Spindellagers

Spindellager im Ruhezustand

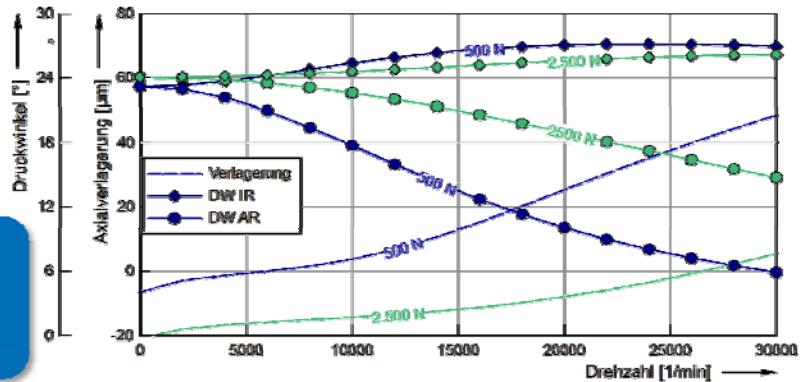


Spindellager unter Drehzahl



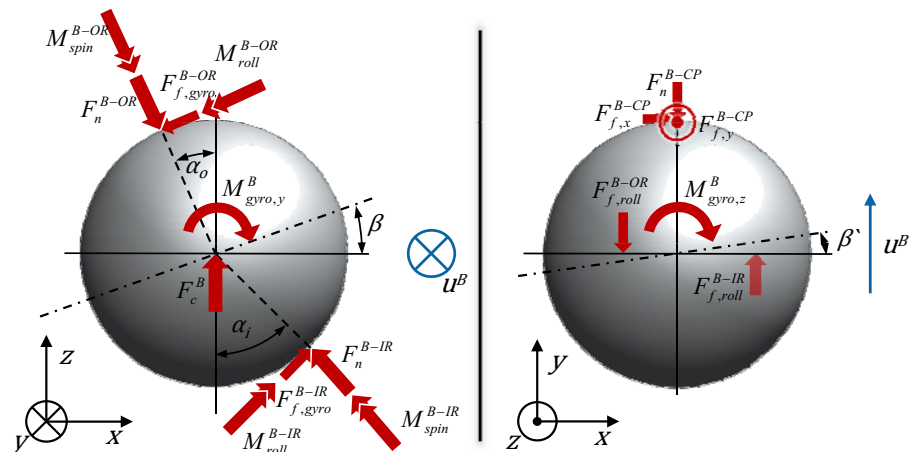
Verschiebung des Druckwinkels durch Kugelfliehkraft, Kreismomente der Kugeln, fliehkraftbedingte Innenringaufweitung und temperaturbedingte Verspannung

Druckwinkel am Innen- und Außenring sowie die Axialverlagerung in Abhängig von Drehzahl und Vorkrank



Grundlagen des Modells

- Der Kugelmittelpunkt wird als ruhend betrachtet, Lagerinnen- und -außenring bewegen sich relativ dazu
- Die Summe der Kräfte und Momente an der Kugel müssen Null ergeben
- Reibkräfte zwischen zwei Oberflächen entstehen ausschließlich durch Relativbewegung
→ Die Relativgeschwindigkeiten zwischen Kugel, Käfig, Außen- und Innenring sowie die Wälzwinkel werden iterativ ermittelt, bis sich ein Gleichgewicht einstellt

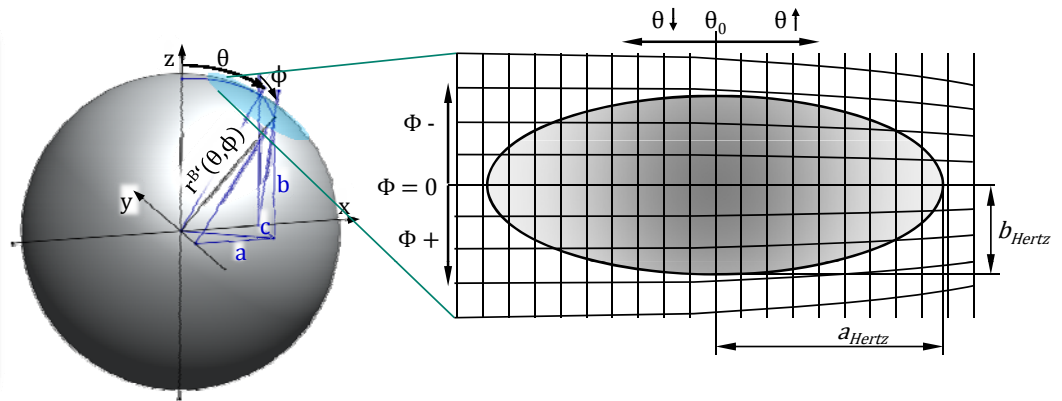


n : normal
 f : Reibung
 x, y, z : Koordinatenrichtung
 B : Kugel
 OR : Außenring
 IR : Innenring
 CP : Käfigtasche

$gyro$: gyroskopisch
 $roll$: parallel zur Rollrichtung
 $spin$: quer zur Rollrichtung
 u^B : Kugelgeschwindigkeit
 β : Rollwälzwinkel
 β' : Gierwälzwinkel
 α : Druckwinkel

Hertz'sche Pressung und Verformung an der Kontaktfläche

Zur Bestimmung der Oberflächengeschwindigkeiten auf der Kugel muss der Abstand jedes Oberflächenpunktes zum Mittelpunkt bekannt sein



$$\sigma(\theta, \phi) = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q}{\pi \cdot a_{Hertz} \cdot b_{Hertz}} \cdot \left(1 - \left(\frac{\theta \cdot r^B}{a_{Hertz}} \right)^2 - \left(\frac{\phi \cdot r^B}{b_{Hertz}} \right)^2 \right)^{0.5}$$

$$w(\theta, \phi) = \frac{1}{\pi \cdot E} \cdot \iint_A \frac{\sigma(\bar{\theta}, \bar{\phi})}{r^B \cdot \sqrt{(\theta - \bar{\theta})^2 + (\phi - \bar{\phi})^2}} d\bar{x} d\bar{z}$$

$$r^{B'} = r^B - w^B \rightarrow \text{Bestimmung von } a, b \text{ und } c \text{ über Winkelfunktionen}$$

- σ : Hertz'sche Pressung
- Q : Normalkraft
- a, b, c : Abstand Oberfläche - Kugelmittelpunkt
- θ : Kontaktwinkel
- ϕ : Rollwinkel
- r^B : Radius der Kugel
- w : Verformung
- E : E-Modul

Hertz'sche Pressung und Verformung an der Kontaktfläche

Bestimmung der Geschwindigkeiten von Kugel, Innen- und Außenring

Bestimmung der Relativgeschwindigkeiten durch Subtraktion

Koordinatentransformation zur Eliminierung der radialen Anteile

Bestimmung der lokalen Reibkräfte und -momente als $f(\mu, \sigma, s, u, x, y, z)$

$$\begin{pmatrix} u_x^B \\ u_y^B \\ u_z^B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_y^B \cdot b - \omega_z^B \cdot c \\ -\omega_x^B \cdot b + \omega_z^B \cdot a \\ \omega_x^B \cdot c - \omega_y^B \cdot a \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \begin{pmatrix} \omega_x^B \\ \omega_y^B \\ \omega_z^B \end{pmatrix} = \omega^B \cdot \begin{pmatrix} \cos(\beta) \cdot \cos(\beta') \\ \cos(\beta) \cdot \sin(\beta') \\ \sin(\beta) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u_x^{OR} \\ u_y^{OR} \\ u_z^{OR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_x^C \cdot \left(\frac{d_m}{2} + b \right) \\ -\omega_x^C \cdot c \end{pmatrix} \quad \left| \quad \begin{pmatrix} u_x^{IR} \\ u_y^{IR} \\ u_z^{IR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -(\omega_x^{IR} - \omega_x^C) \cdot \left(\frac{d_m}{2} + b \right) \\ (\omega_x^{IR} - \omega_x^C) \cdot c \end{pmatrix}$$

$$\vec{u}_{\theta\phi}^{rel} = D(\theta, \phi) \cdot \vec{u}_{xyz}^{rel}$$

$$\vec{u}_{\theta\phi}^{rel} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_{tan-spin}^{rel} \\ u_{tan-roll}^{rel} \\ u_{rad}^{rel} \end{pmatrix}$$

$$\vec{u}_{xyz}^{rel} = D^T(\theta, \phi) \cdot \vec{u}_{\theta\phi}^{rel}$$

$$\begin{pmatrix} F_{f,x,sum}^B \\ F_{f,y,sum}^B \\ F_{f,z,sum}^B \end{pmatrix} = \int_A \begin{pmatrix} F_{f,x} \\ F_{f,y} \\ F_{f,z} \end{pmatrix} = \int_A \left(\frac{F_f}{\sqrt{(u_x^{rel'})^2 + (u_y^{rel'})^2 + (u_z^{rel'})^2}} \cdot \begin{pmatrix} u_x^{rel'} \\ u_y^{rel'} \\ u_z^{rel'} \end{pmatrix} \right)$$

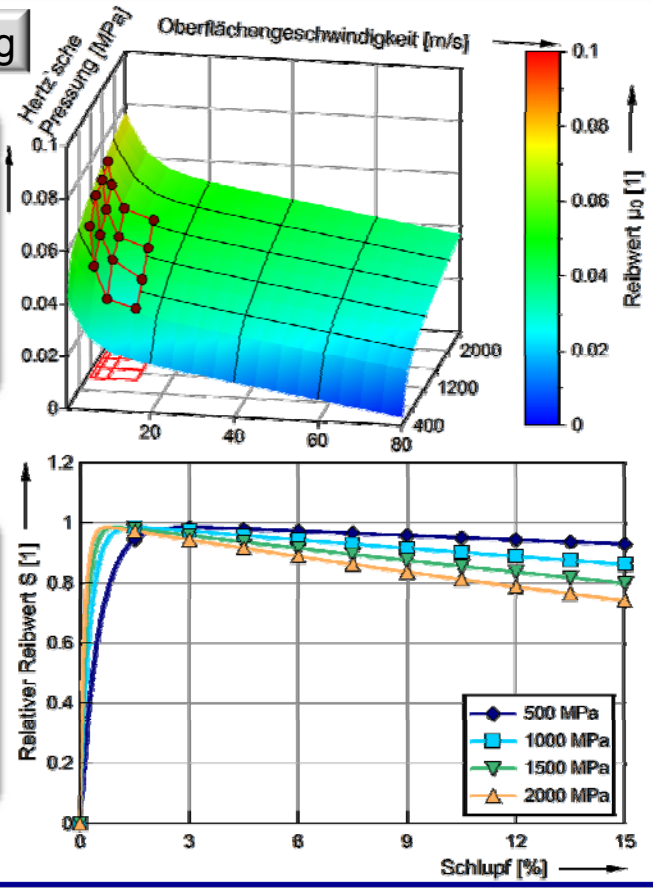
Grundlagen der Reibungsberechnung

$F_f = \mu \cdot \sigma \cdot dA$ mit $\mu = \mu_{max} \cdot S$

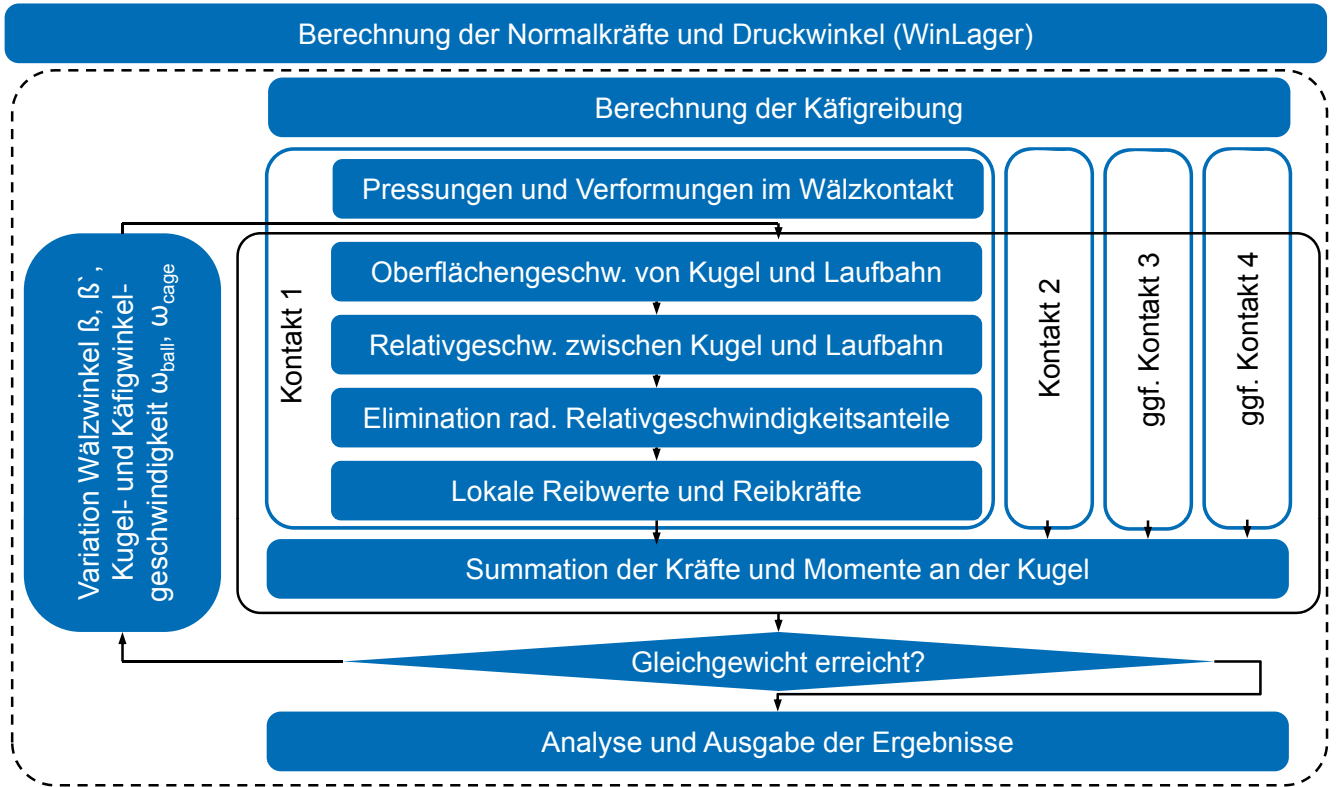
- Reibungsansatz auf Basis von Messdaten
- Lokaler Reibwert in Abhängigkeit von
 - Oberflächengeschwindigkeit
 - Pressung
 - Schlupf
- Mathematische Formulierung
 - Maximaler Reibwert (p, v)
 - Überlagerung Schlupffunktion
- Individueller Reibwert für jeden Punkt auf der Kontaktellipse
- Unabhängig von unsicheren Ölmodellen und Schmierfilmberechnung

Max. Reibwertfunktion μ_{max}

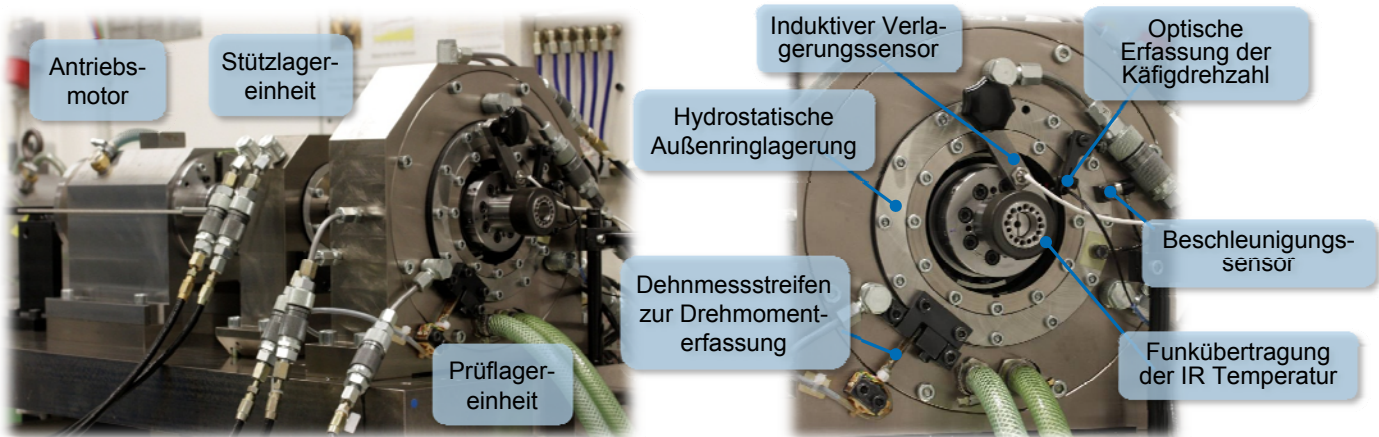
Schlupffunktion S



Ablaufdiagramm Reibungsberechnung



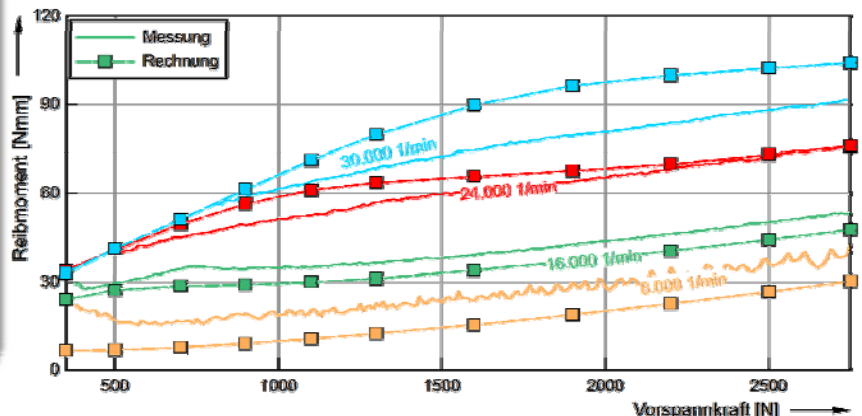
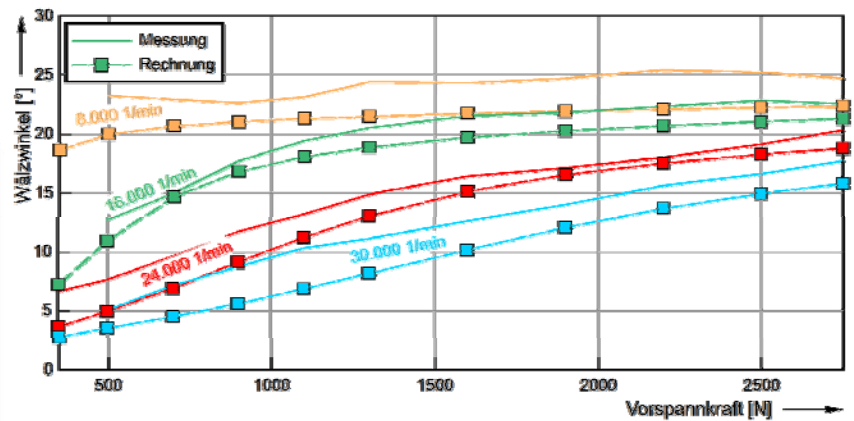
Prüfstand mit umfangreichen Messmöglichkeiten



- Prüflagergröße:
 - Durchmesser: 70 / 110 mm
 - Breite: 20 mm
- max. Drehzahl: 35.000 1/min
- max. Motorleistung: 15,6 kW
- axiale Lagerlast: 350 – 2.750 N
- Hydrostatische, reibungsfreie Lagerung von Prüf- und Stützlager
- Messgrößen
 - Drehmomentmessung am Prüflager über Biegebalken und hydrostatische Außenringlagerung
 - Messung der Axialverlagerung am Innenring
 - Temperaturmessung am Innen- und Außenring
 - Funkübertragung der Messsignale von der Welle
 - Messung der Innenringdrehzahl
 - Messung der Käfigdrehzahl
 - Schwingungs- und Geräuschmessung

Abgleich mit Messungen

- Bei steigender Vorspannkraft steigt der Außenringdruckwinkel, sodass ein größeres gyrokopisches Moment entsteht und sich größere Wälzwinkel und höhere Reibwerte einstellen
- Mit steigender Drehzahl gewinnen Fliehkrafteinflüsse an Bedeutung, sodass der Außenringdruckwinkel und damit die Wälzwinkel abnehmen
- Das Reibmoment nimmt bei steigender Drehzahl zu
- Insgesamt wird eine gute Übereinstimmung zwischen Messwerten und Berechnungsergebnissen erreicht



1 Stand der Technik - Reibmodelle

2 Vorstellung eines neuen Reibmodells für Spindellager

3 Simulation der Temperaturentwicklung im Spindellager

4 Zusammenfassung

Simulationsmodell der Lagerringe

Erstellung eines Modells in
Solidworks und Abaqus

- Last
 - Stufenförmige Einbringung der Wärmeleistung
- Randbedingungen
 - Vorgabe der Umgebungslufttemperatur
 - Öltemperatur aus Prüfstandsmessungen
- Wärmeübertragung
 - Konduktion
 - Konvektion
 - Strahlung (vernachlässigbar)

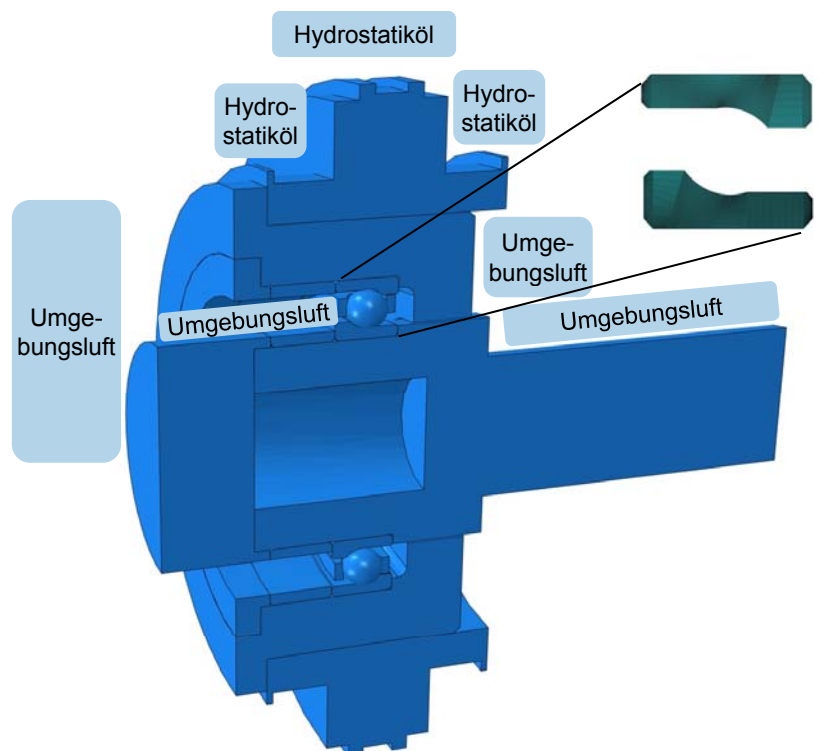
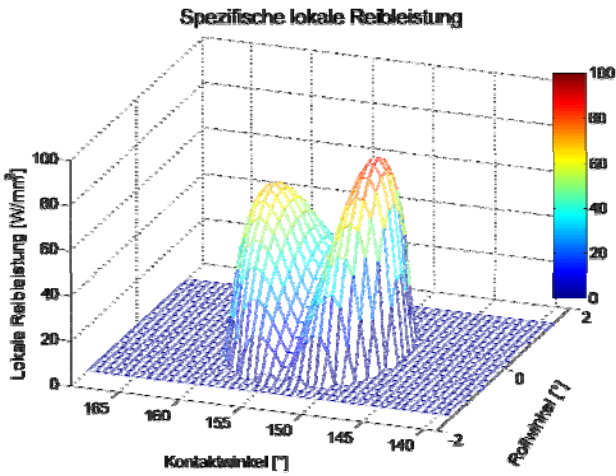
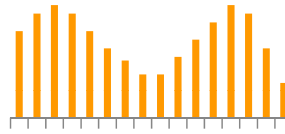


Abbildung der Wärmeeinbringung in der Laufbahn



Verteilung der Wärmeleistung auf die Laufbahn entsprechend der Reibleistungsverteilung im Wälzkontakt



Abgleich mit gemessener Reibleistung

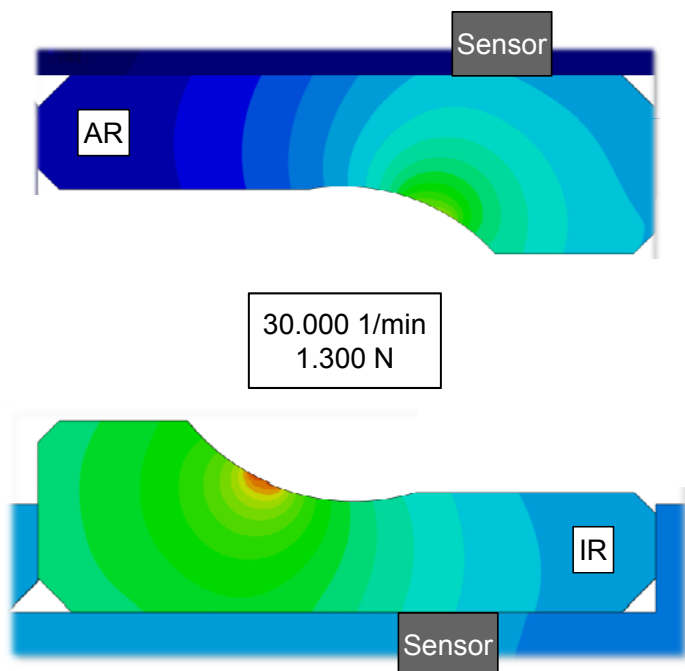
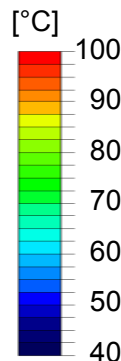


Abstraktion der Leistungsverteilung aus dem Berechnungsmodell über die Laufbahnbreite

Leistungsaufbringung durch diskrete Anzahl ringförmiger Oberflächenbereiche unterschiedlicher Leistungsdichte

Ergebnis der Thermiksimulation

Die Wärmeübergangskoeffizienten (Lagersitz – Umbauteil) wurden abgeglichen, sodass die Simulationsergebnisse mit den gemessenen Temperaturen am Lagersitz übereinstimmen



- 1 Stand der Technik - Reibmodelle
- 2 Vorstellung eines neuen Reibmodells für Spindellager
- 3 Simulation der Temperaturentwicklung im Spindellager
- 4 Zusammenfassung

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Das entwickelte Reibmodell für Spindellager bestimmt die Kinematik und Reibverteilung innerhalb des Lagers zuverlässig
- Durch die Integration der Reibleistung in eine FEM-Simulation konnte die Temperaturverteilung im Spindellager mit einigen Unsicherheiten berechnet werden

Nächste Schritte

- Die Ausgangsdaten für den Reibkoeffizienten können weiter verbessert werden
- Verbesserung des FEM-Modells
 - Abstimmung der Kontaktbedingungen mit dem WSA (TP B02)
 - Bestimmung der Axialverlagerung ist noch nicht möglich
- Vorbereitung des Modells zur Integration in eine Spindelsimulation
- Untersuchungen, ob das Reibmodell auf andere Wälzkontakte übertragen werden kann

WÄRMEÜBERTRAGUNG IN ALUMINIUM-LEICHTBAUSTRUKTUREN

K. Großmann, B. Kauschinger, S. Schroeder, C. Städel, M. Koch; Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, TU Dresden

Innerhalb des SFB/Transregio 96 soll ein thermisches Modell einer Experimentalmaschine erstellt werden. Dabei handelt es sich um einen Versuchsträger, dessen bewegte Baugruppen in einer neuartigen Aluminium-Leichtbaustruktur gefertigt werden. Diese Struktur besteht aus Aluminiumplatten, welche mit Aussparungen versehen und kammartig ineinandergesteckt werden. Der Verbund wird anschließend mit einer Grund- und Deckplatte versehen und über Zugstäbe kraftschlüssig verspannt. Um die Fertigungskosten der Struktur niedrig zu halten, wurde die Kontur der Aluminiumplatten mittels Abrasiv-Wasserstrahl geschnitten.

Die Fügeflächen der kraftschlüssigen Fugen besitzen auf Grund der gewählten Fertigungs- und Verbindungsverfahren relativ hohe Rauheiten sowie ungleichmäßige Druck- und Kontaktverhältnisse. Für derartige Fugeneigenschaften lässt sich kein Modell zur Beschreibung des thermischen Leitwerts finden. Deshalb erfolgte mit Hilfe von Konstruktionsunterlagen und Messungen zunächst eine umfassende Analyse der Fugen. Dabei wurden die geometrische Gestalt, die Oberflächenbeschaffenheit und die Kontakteigenschaften untersucht. Dies diente einer groben rechnerischen Abschätzung des Einflusses der Fugeneigenschaften auf das thermische Verhalten des Versuchsträgers. Es konnte festgestellt werden, dass die durch die raue und schräge Schnittfläche entstehende kleine Kontaktfläche der Fuge einen sehr niedrigen Wärmeleitwert besitzt. Die Fugen verringern deshalb das thermische Leistvermögen des Gestells signifikant. Die einzelnen Fugen zeigen außerdem eine deutlich ausgeprägte Streuung der Fugeneigenschaften. Dies wirkt sich entsprechend als Streuung des thermischen Leistvermögens aus.

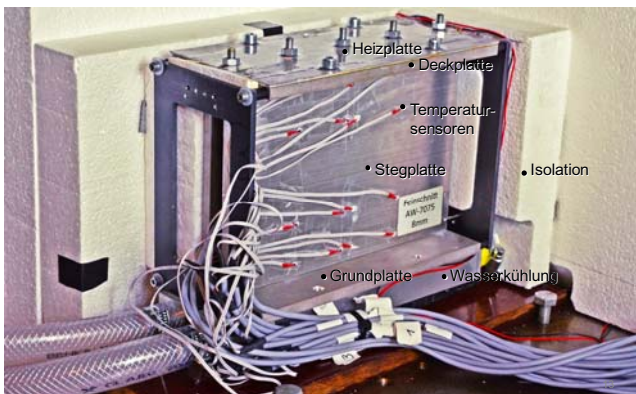


Bild: Versuchsstand zur Messung von thermischen Fugenleitwerten

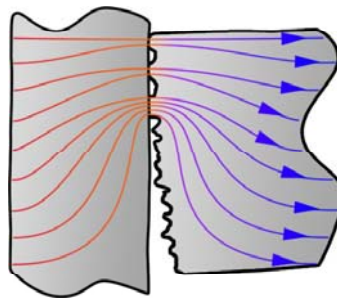
Um den Einfluss unterschiedlicher Einflussparameter auf den Fugenleitwert quantitativ besser beschreiben zu können, sind experimentelle Untersuchungen durchgeführt worden. Dafür wurde zunächst ein Versuchsstand entwickelt (Bild). Mit diesem Versuchsstand ist es möglich, die Fugen eines typischen Teilausschnitts der Struktur bei Variation der wichtigsten Einflussparameter wie Flächenpressung, Rauheit und Schräge der Kontaktflächen, zu vermessen. Für den relevanten Bereich dieser Einflussgrößen sind damit die Fugenleitwerte bestimmt worden. Mit Hilfe einer Regressionsanalyse ist dann auf Basis der Messdaten ein thermisches Fugenmodell entwickelt worden. Dieses dient zur Parametrierung der Fugen in den thermischen Modellen der Gestellbauteile des Versuchsträgers.

Kontakt:

Steffen Schroeder (geb. Rehn)
Technische Universität Dresden
Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
01062 Dresden
Tel.: 0351 46336102
E-Mail: schroeder@iwm.mw.tu-dresden.de

Wärmeübertragung in Aluminium- Leichtbaustrukturen

Knut Großmann, Bernd Kauschinger,
Steffen Schroeder, Christian Städel, Martin Koch

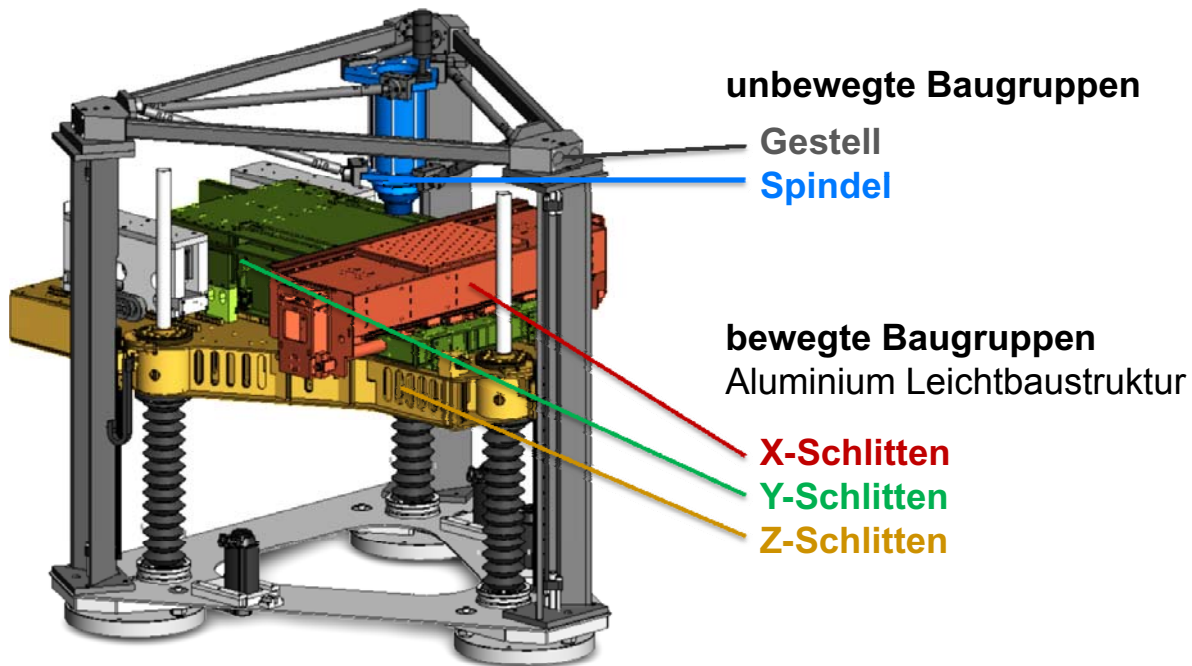


Inhalt

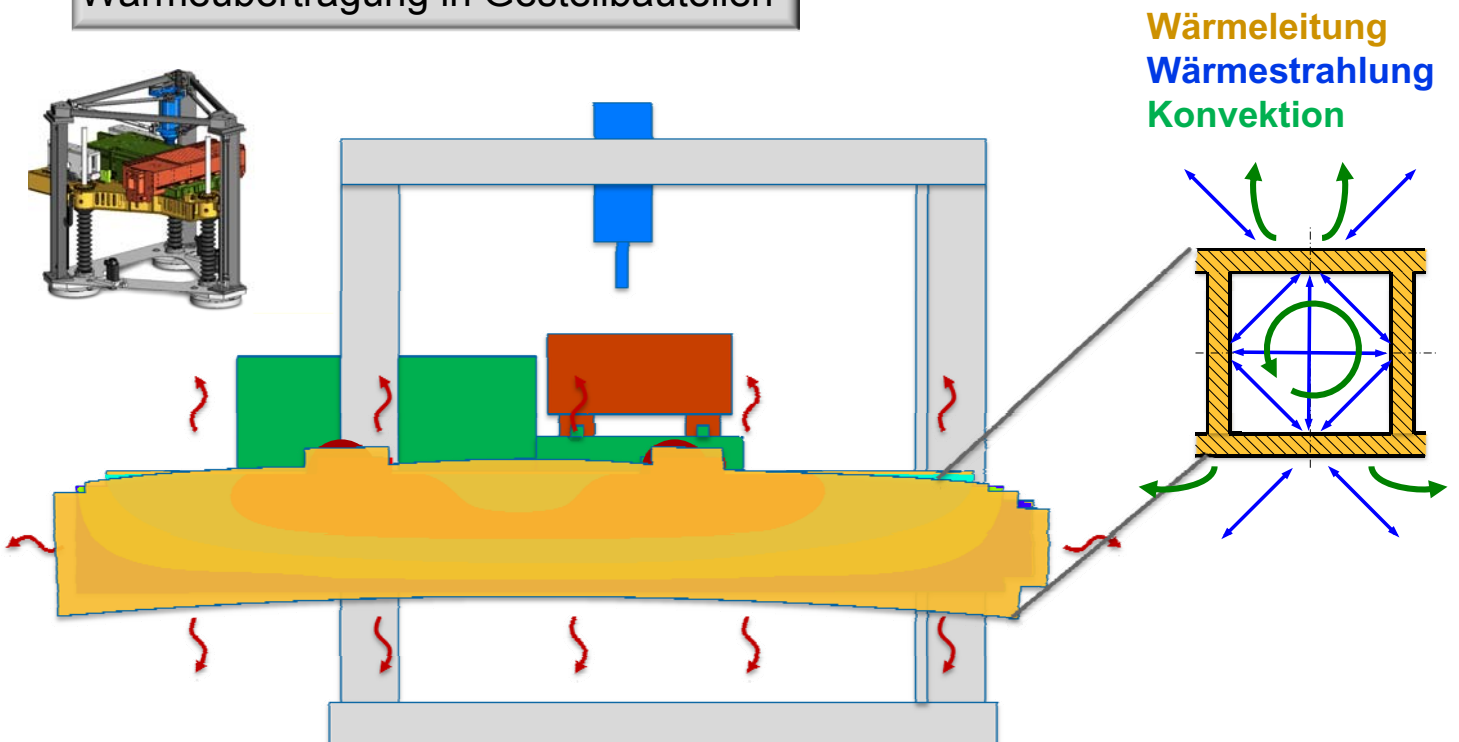
- Einordnung in SFB/TR 96
- Wärmeübertragung in Gestellbauteilen
- Aluminium-Leichtbaustruktur
- Auswirkung der Gestellkonstruktion auf das thermische Verhalten
- Experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung von thermischen Fugeneigenschaften
- Ableitung von Fugenmodellen für die Parametrierung thermischer Modelle

Einordnung in SFB/TR 96

Erstellung thermisches Modell Versuchsträger

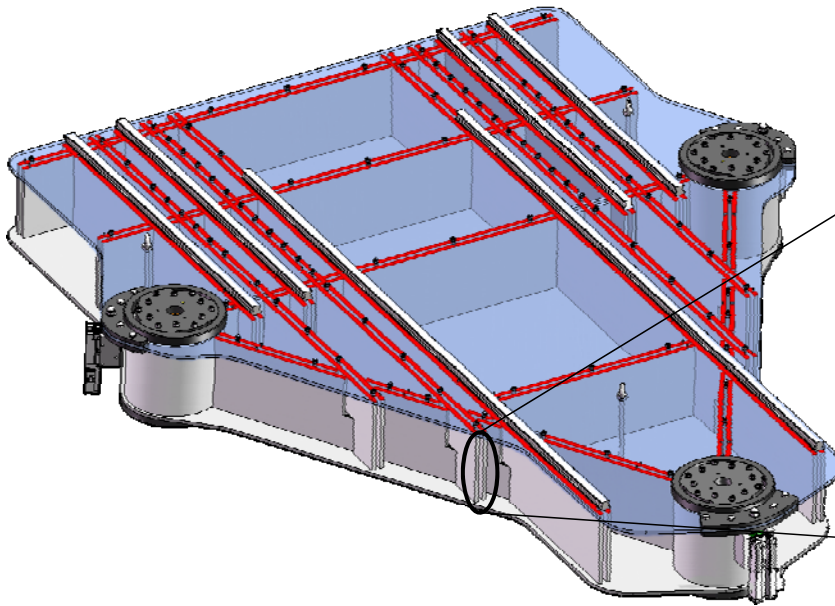


Wärmeübertragung in Gestellbauteilen

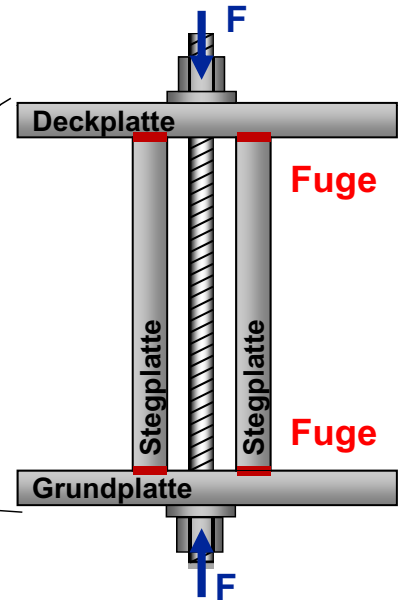


Gestell als Aluminium-Leichtbaustruktur

Z-Schlitten

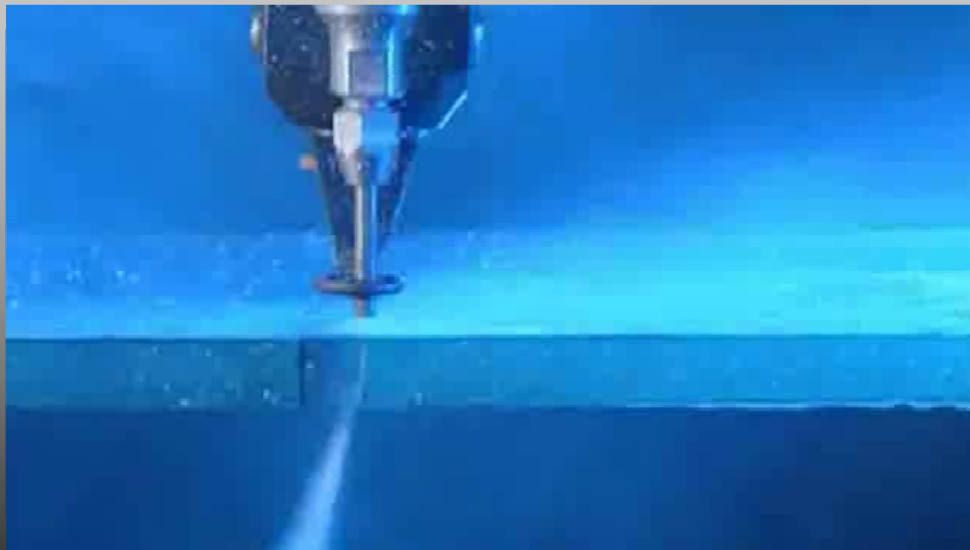


Typischer Teilausschnitt der Gestellstruktur



Fugen der Gestellstruktur

Abrasiv-Wasserstrahlschneiden



[Flow International youtube.com/user/FlowWaterjetEurope]

Fugenqualität am Versuchsträger

Einteilung nach TRUMPF



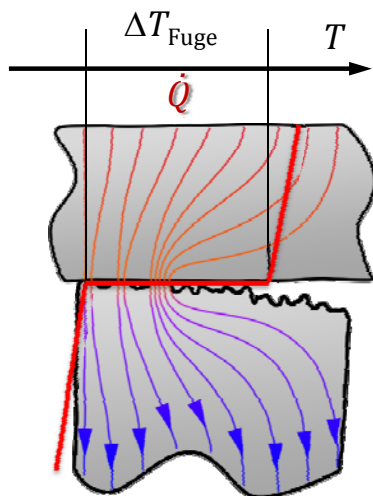
*gemessene Werte, eine Maschine, Aluminiumlegierung, 8 mm Dicke

Gemessene Schnittqualität am Versuchsträger (Stichproben)

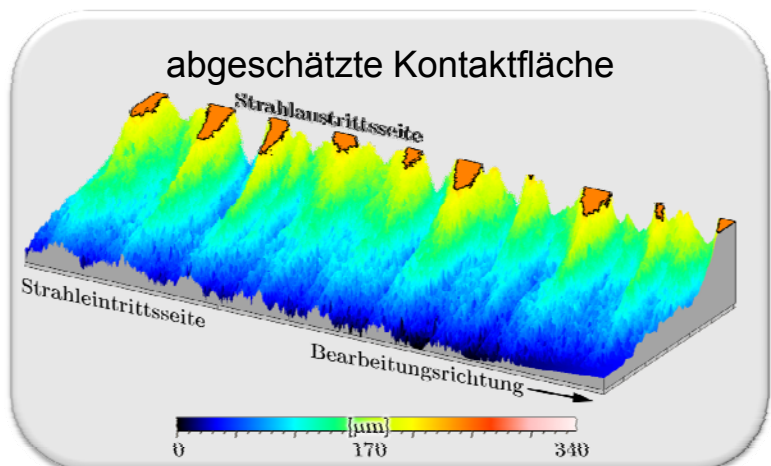
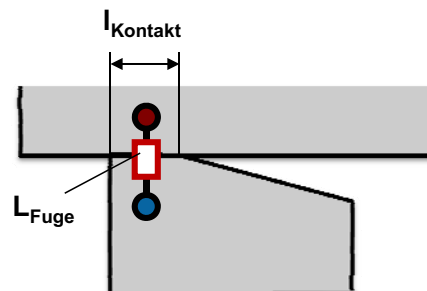
Rauheit
 $R_z = 50$ bis 350 μ m

Rechtwinkligkeitsabweichungen
 $\alpha \approx 0,4^\circ$ bis $1,4^\circ$

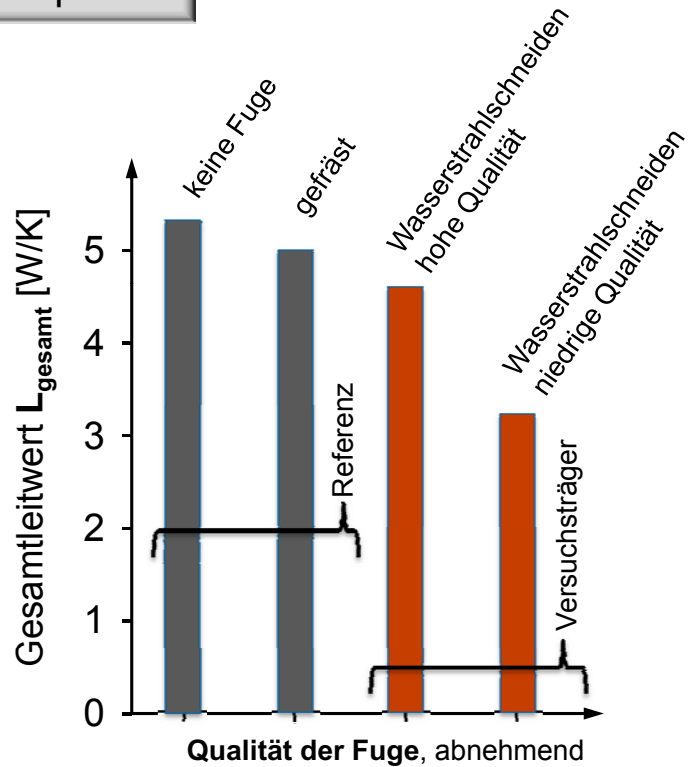
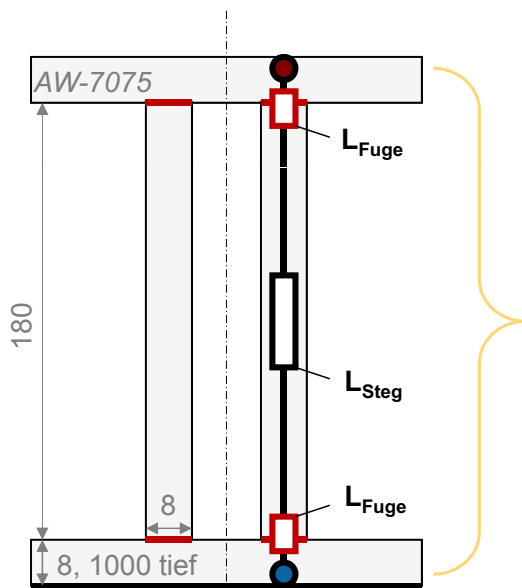
Abschätzung Fugenleitwert



Ersatzmodell



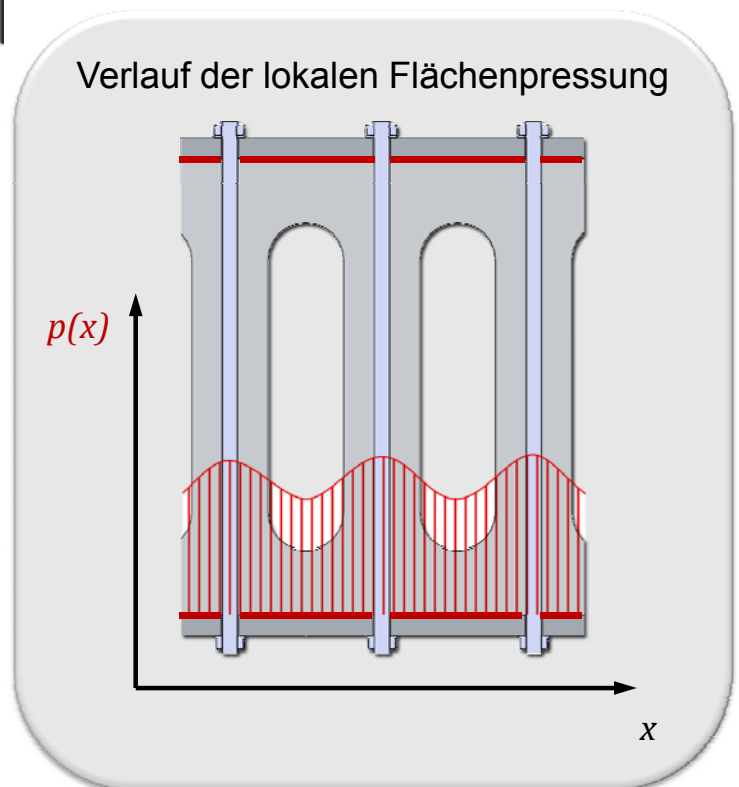
Überschlägiger Einfluss der Fugenqualität



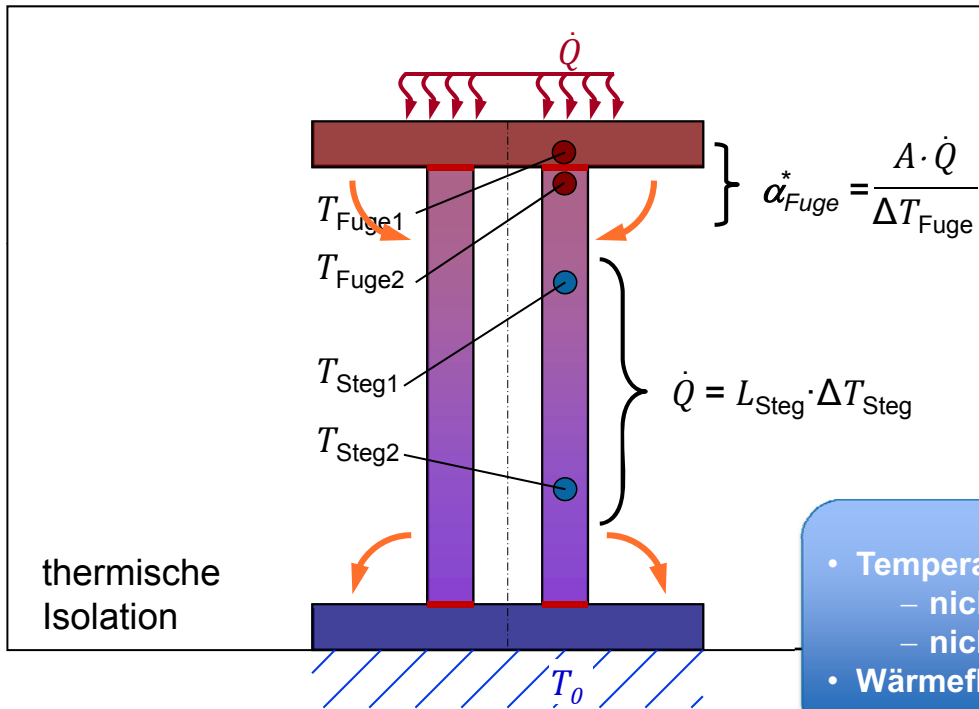
Einflussgrößen auf Fugenleitwert

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

experimentelle Untersuchungen

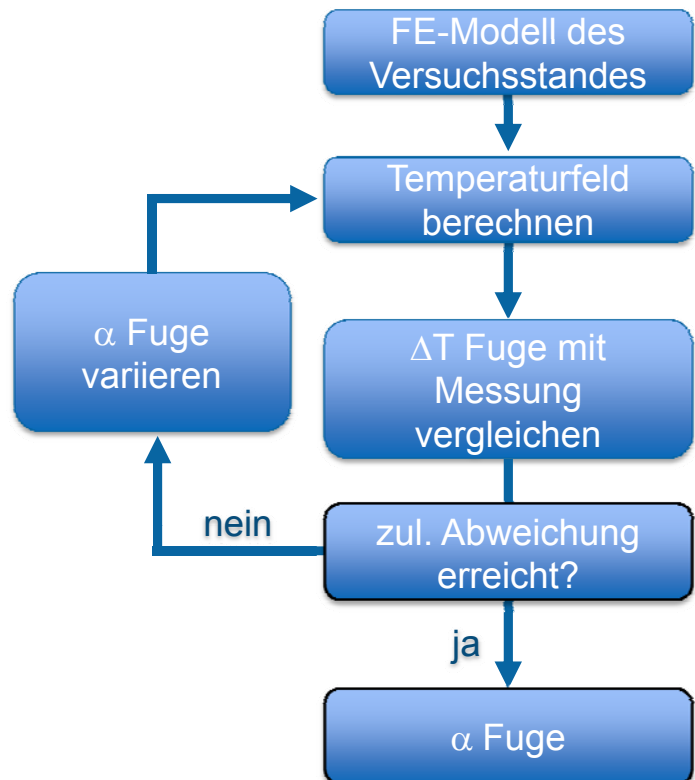
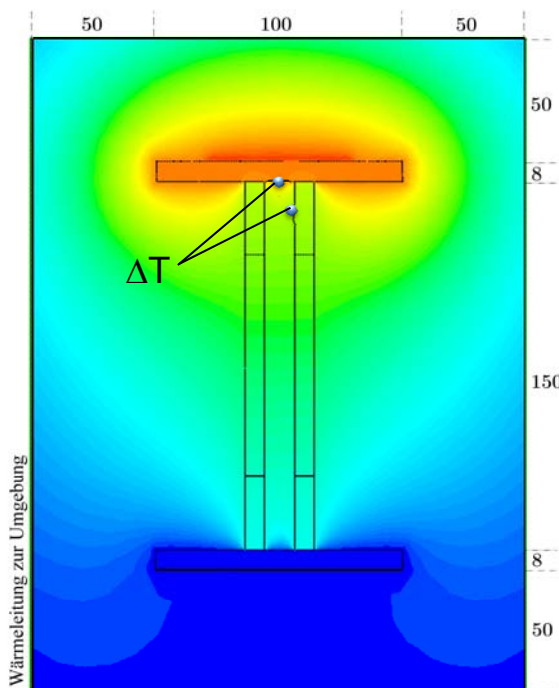


Messprinzip und Vorgehen

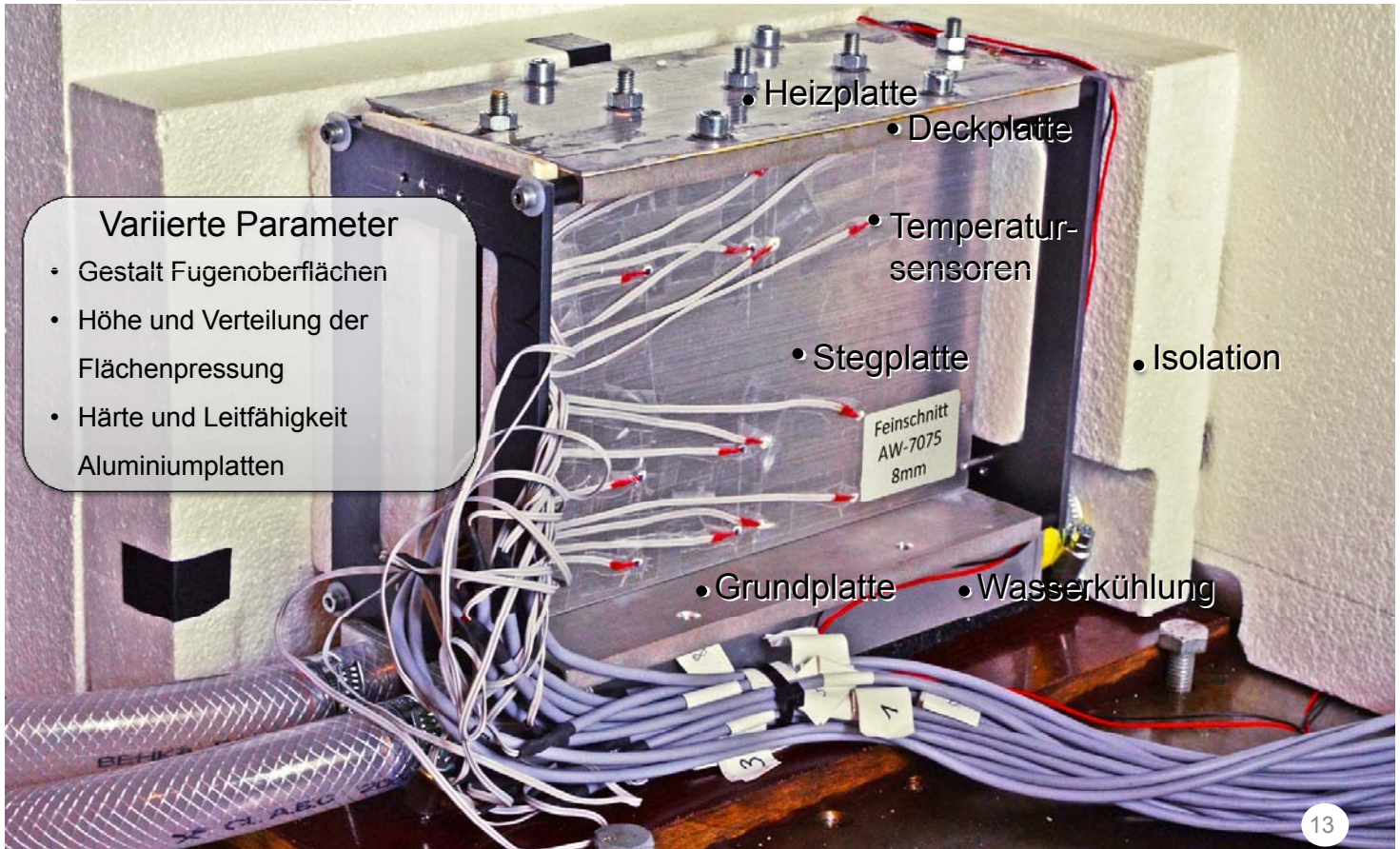


- Temperaturen Fügeflächen – nicht homogen
- nicht direkt messbar
- Wärmefluss über Isolation

Erweitertes Messmodell

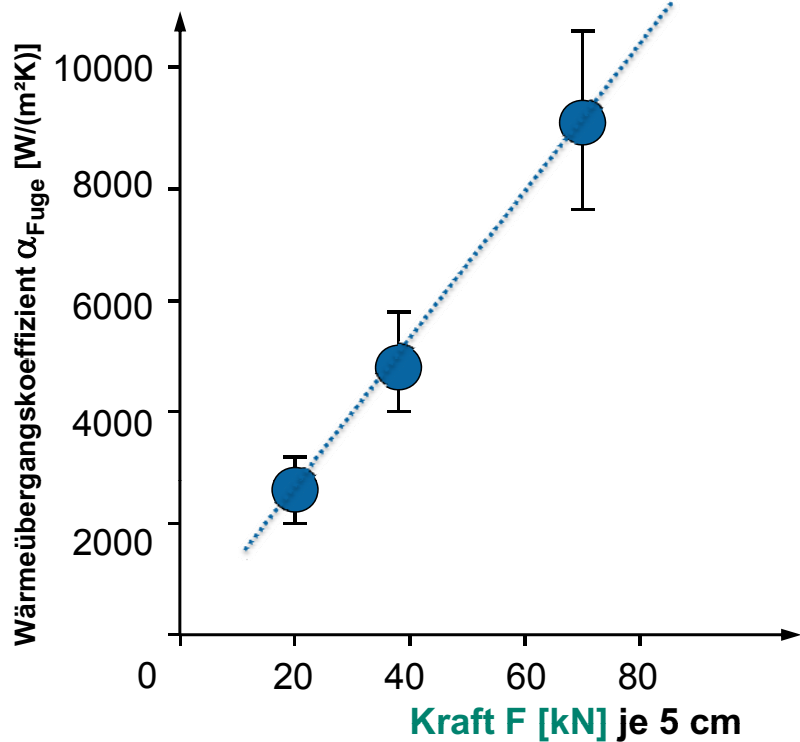
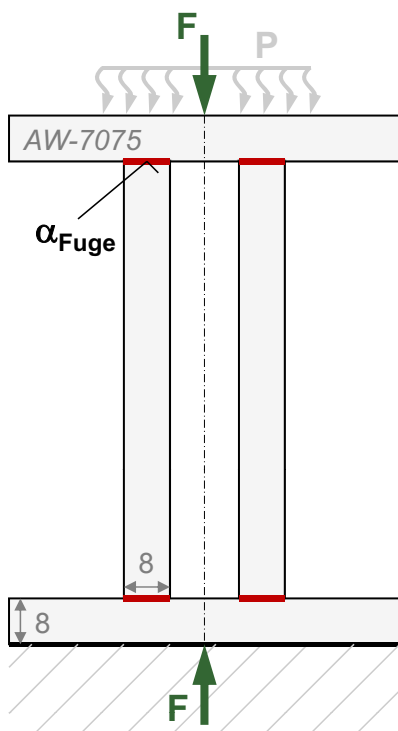


Versuchsstand

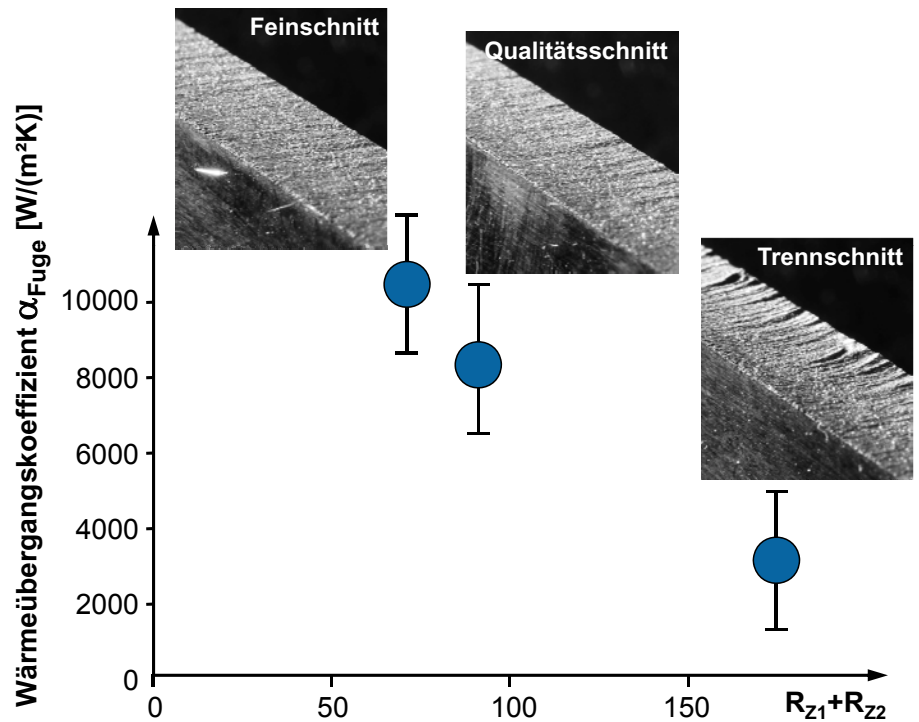
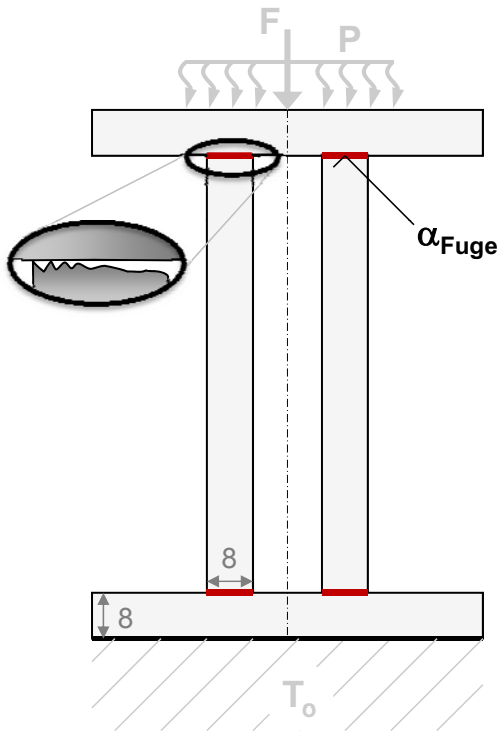


13

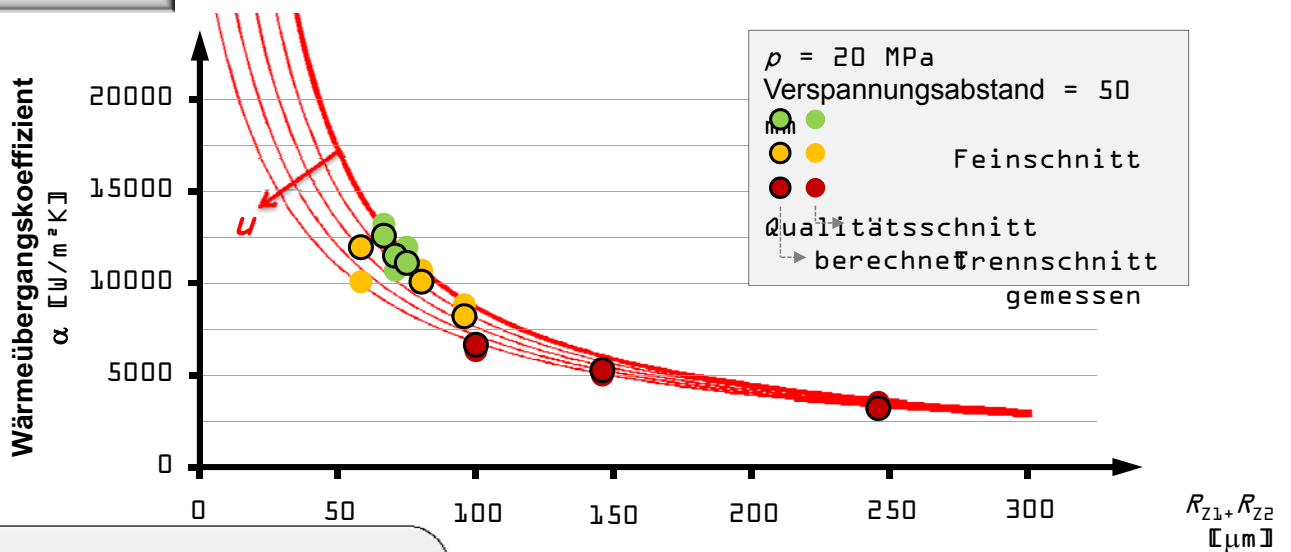
Einfluss der Verspannkraft



Einfluss der Wasserstrahl-Schnittqualität



Fugenmodell



Wesentliche Einflussgrößen

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

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

Parametrierungshilfe Oberflächennormal

einfach
handhabbare
Parametrierung



Zusammenfassung

- mit Abrasiv-Wasserstrahl geschnittene Fugenflächen haben einen signifikanten Einfluss auf das thermische Verhalten der vorgestellten Aluminium-Leichtbaustruktur
- die berührende Kontaktfläche bestimmt maßgeblich die thermische Leitfähigkeit der Fuge
- wesentliche Einflussparameter der Leitfähigkeit sind die Flächenpressung, die Rauheit der Kontaktpartner und die Rechtwinkligkeitsabweichung der Schnittflächen
- Parametrierung der Fugen eines thermischen Modells der Leichtbaustruktur kann nun über zugeschnittenes Fugenmodell auf Grundlage dieser Einflussparameter erfolgen
- effiziente Parametrierung ohne zeitaufwändige Messungen über Parametrierungshilfe mit Oberflächennormal

WÄRMEÜBERTRAGUNG AN FUGENKONTAKTEN AM BEISPIEL SPANENDER WERKZEUGE

*S. Vieler, R. Kneer; Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung, RWTH Aachen
M. Bräunig; Professur für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, TU Chemnitz
U. Semmler; Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz*

Im Zerspanungsprozess wird der überwiegende Teil der eingebrachten Energie in Wärme umgesetzt, die sowohl das Werkzeug als auch das in der Maschine eingespannte Werkstück erwärmt. Ein Teil der Wärme wird über das Werkzeug und die Werkzeugeinspannung in die Spindel abgeleitet, ein weiterer durch evtl. vorhandene Kühlmittel aufgenommen und durch heiße Späne abtransportiert bzw. im Arbeitsraum verteilt. Die ins Werkstück eingeleitete und nicht wieder abgespannte Wärme wird durch Wärmeleitung in die Werkstückvorrichtung und das Maschinenbett übertragen. Die Erwärmung von Werkzeug und Werkstück und der an sie angrenzenden Bauteile führt zu thermo-elastischen Verformungen. Die Kompensation bzw. Korrektur dadurch bedingter Maß- und Formabweichungen erfordert genaue Kenntnisse der Wärmeverteilung.

Neben der Wärmeleitung in den Bauteilen und dem Wärmeübergang zur Umgebung bzw. den Kühlmedien wird die Wärmeausbreitung in einem hohen Maße durch die Fugen zwischen einzelnen Komponenten von Werkzeug und Vorrichtung sowie den Spannflächen an Spindel und Maschinentisch bestimmt.

Das Ziel des Teilprojektes B02 ist eine Quantifizierung des Wärmeübergangs an spezifischen Fügestellen einer typischen Werkzeugmaschine und die Entwicklung valider Wärmeübergangsmodelle. Hierzu werden Wärmeübergangskoeffizienten experimentell ermittelt. Zwei quaderförmige Proben werden mit bekannter Rauigkeit und unterschiedlichen homogenen Anfangstemperaturen unter vorgegebener Kraft aufeinander gedrückt. Eine Infrarot-Kamera erfasst die Temperaturänderungen beider Proben, wodurch anschließend eine Berechnung des Kontaktwiderstands möglich wird. Daraus werden Beschreibungsansätze für den Wärmeübergang in Abhängigkeit der relevanten Parameter entwickelt. Diese Ansätze sind eine notwendige Voraussetzung für die Berücksichtigung dieser Kontaktwiderstände in FE-Simulationen des thermo-energetischen Verhaltens.

Das Teilprojekt A01 befasst sich mit dem thermo-energetischen Verhalten von Werkzeug und Werkstück in ihren Einspannungen und den Auswirkungen auf die Arbeitsgenauigkeit des Zerspanungsprozesses, wobei eine Kombination von Experiment und numerischer Simulation der thermo-energetischen Prozesse und der resultierenden Deformationen an Werkzeug und Werkstück verfolgt wird. Dazu dient eine speziell entwickelte Versuchseinrichtung, in der Werkzeuge und Vorrichtungen sowohl hinsichtlich der Wärmeausbreitung als auch der Deformationen untersucht werden können.

Parallel zu den Experimenten dienen Strömungsmodelle der Werkzeugumgebung auf Basis der CFD (Computational Fluid Dynamics) zur Analyse der Umströmung stehender und rotierender Werkzeuge sowie der Vorrichtungsteile. Weiterhin werden Modelle des Wärmeüberganges zwischen einzelnen Komponenten, der Umgebung und den strömenden Medien zur inneren und äußeren Kühlung entwickelt. Die Simulation der Wärmeausbreitung in den Bauteilen und der daraus resultierenden Verformungen erfolgt mit der FEM (Finiten-Elemente-Methode) unter besonderer Betrachtung der Schnittstellen und Trennfugen, z. B. der Einspannung des Werkzeuges in verschiedene Spannfutter. Für die Kopplung der aus der Strömungssimulation zu ermittelnden thermischen Randbedingungen zur thermoelastischen Bauteilberechnung sind Programm-schnittstellen zu entwickeln.

Im Vortrag werden beide Versuchsstände mit ersten Messergebnissen vorgestellt. Dargelegt werden weiterhin die Modellhierarchie sowie die Schnittstellen und es werden erste Simulationen in Verbindung mit experimentellen Ergebnissen gezeigt.

Kontakt:

*Sarah Vieler (geb. El-Khawankey)
Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung WSA, RWTH Aachen
Eilfschornsteinstr. 18, 52056 Aachen,
Tel: 0241 - 80 95459 Fax: 0241 - 80 92143
E-Mail: vieler@wsa.rwth-aachen.de*

TP A01: Werkzeug- und Spanmittelverformung

Neugebauer, IWP / Schmidt, IWU

TP B02: Wärmefluss zwischen den Maschinenkomponenten

Kneer, WSA / RWTH

Wärmeübertragung an Fugenkontakten am Beispiel spanender Bearbeitung

Vieler, S. (B02, WSA / RWTH)
Kneer, R. (B02, WSA / RWTH)

Bräunig, M. (A01, IWP)
Semmler, U. (A01, IWU)

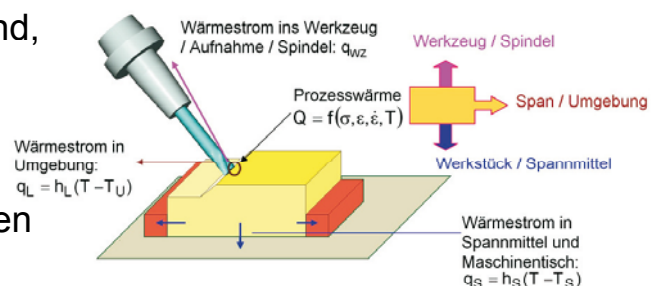
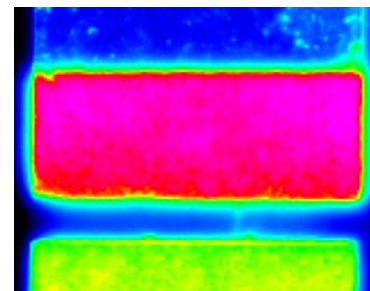
SFB /TR 96 Tagung in Chemnitz, 25.November 2012

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

1

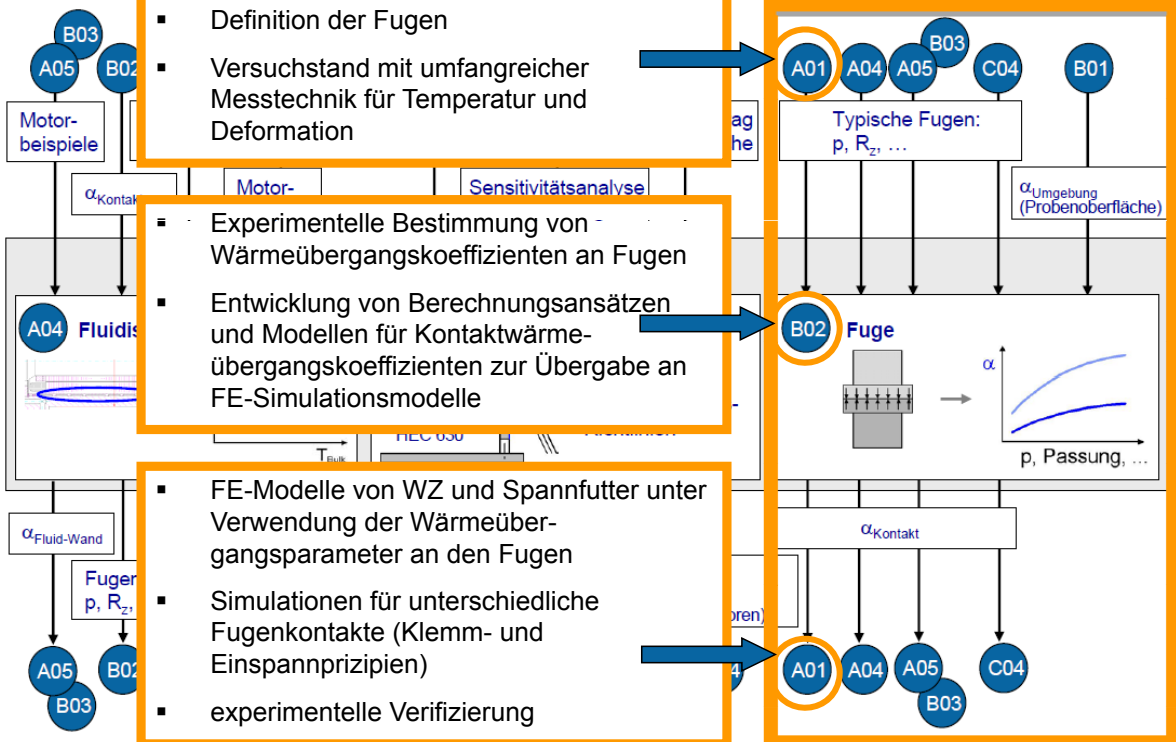
Gliederung

- Zielstellung / Verbindung beider Projekte
- Arbeiten im TP B02
 - Überblick
 - Versuchstand
 - Aktuelle Messergebnisse
 - Ausblick
- Arbeiten im TP A01
 - Überblick
 - Versuchstand: Konzept, aktueller Stand, Messungen
 - FEM-Modellierung Werkzeuge und Spannfutter
 - Vergleich Messungen und Simulationen
 - Ausblick



Verknüpfung

Beispiel: Konkret TP A01 und B02



- Definition typischer WZ-Bauteil-Spannmittel-Konfigurationen
- Definition der Fugen
- Versuchstand mit umfangreicher Messtechnik für Temperatur und Deformation
- Experimentelle Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten an Fugen
- Entwicklung von Berechnungsansätzen und Modellen für Kontaktwärmeübergangskoeffizienten zur Übergabe an FE-Simulationsmodelle
- FE-Modelle von WZ und Spannfutter unter Verwendung der Wärmeübergangparameter an den Fugen
- Simulationen für unterschiedliche Fugenkontakte (Klemm- und Einspannprinzipien)
- experimentelle Verifizierung

Zusammenarbeit beider Teilprojekte

Experimentelle Untersuchungen charakteristischer Fugenkontakte

Klassifizierung der Fügestellen Werkzeug/ Aufnahme/ Spindel (später auch für Werkstücke und Vorrichtungen)

Ziel B02: Untersuchungen und Modelle zur Wärmeübertragung an Fugenkontakten

Ziel A01: Modellgestützte Beschreibung der Wärmeströme in spanenden Werkzeugen, Werkzeugaufnahmen, Werkstücken und Vorrichtungen

Beschreibungsansatz für Wärmeübergangskoeffizienten an den Fugen wird übergeben

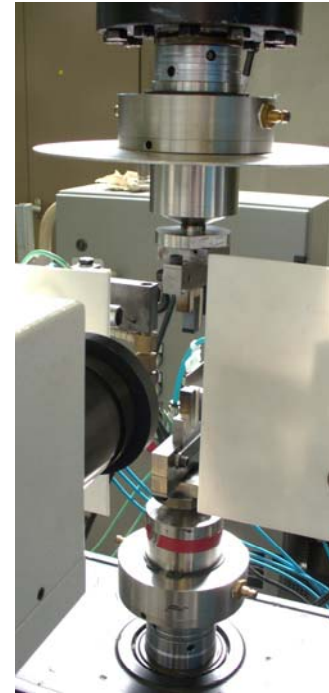
Wärmeübergangskoeffizienten werden in dem Simulationsmodell berücksichtigt

B02: Ziel und Vorgehensweise

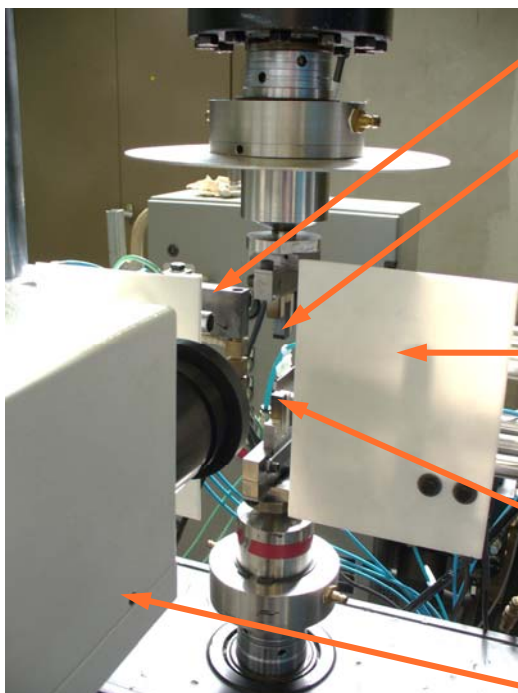
Beschreibung des Wärmeübergangs an Fugenkontakten

- Experimentelle Bestimmung des Wärmeübergangs an spezifischen Fügestellen einer typischen Werkzeugmaschine
 - Versuchsaufbau und Auswertung
 - Gezielte Variation aller relevanter Parameter

- Entwicklung valider Wärmeübergangsmodelle, da die daraus entwickelten Beschreibungsansätze eine notwendige Angabe für Simulationsmodelle zur thermo-energetischen Verformung sind



Versuchsstand



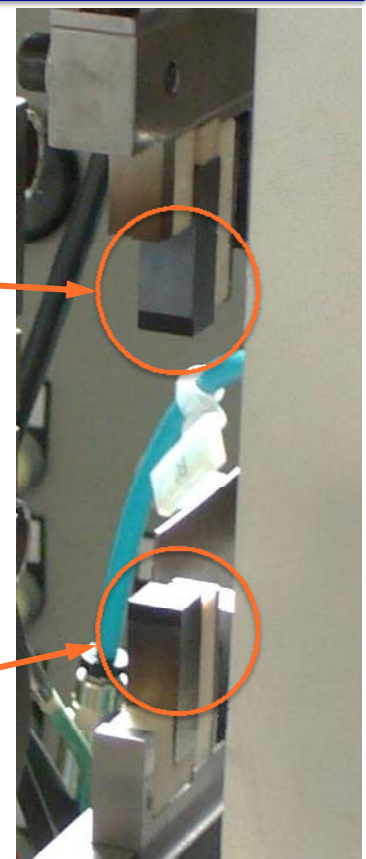
Heizblock

obere Probe

Strahlungsschild

untere Probe

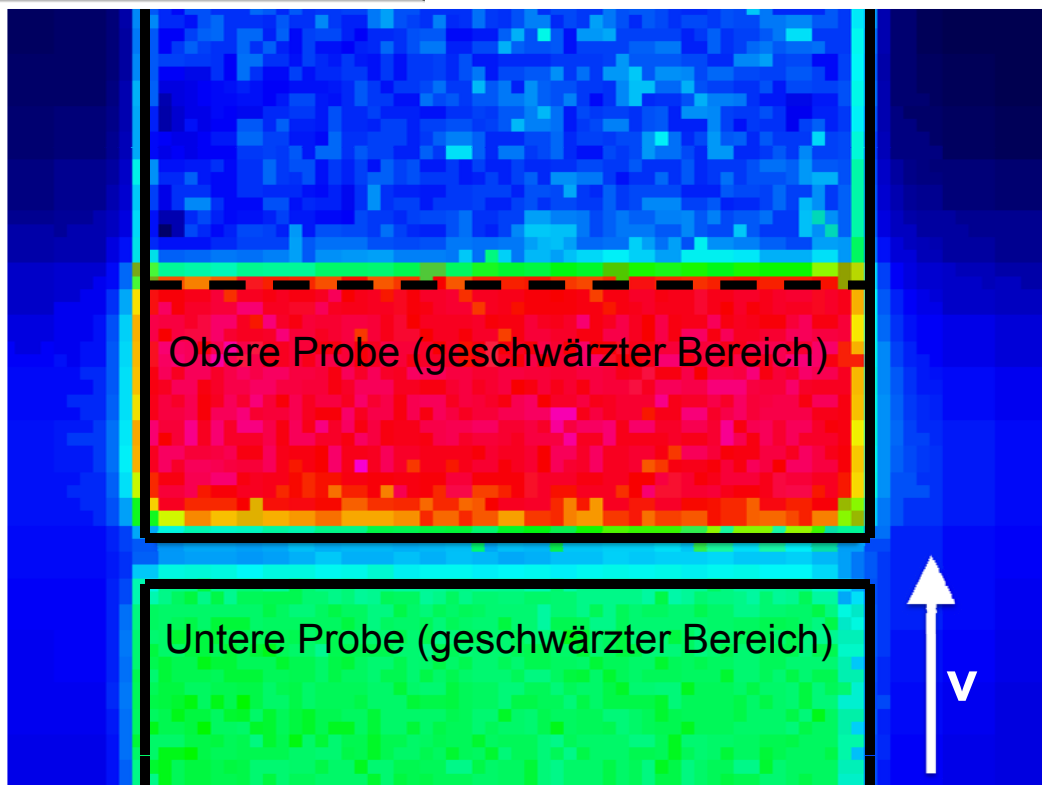
Infrarot-Kamera



Versuchsstand

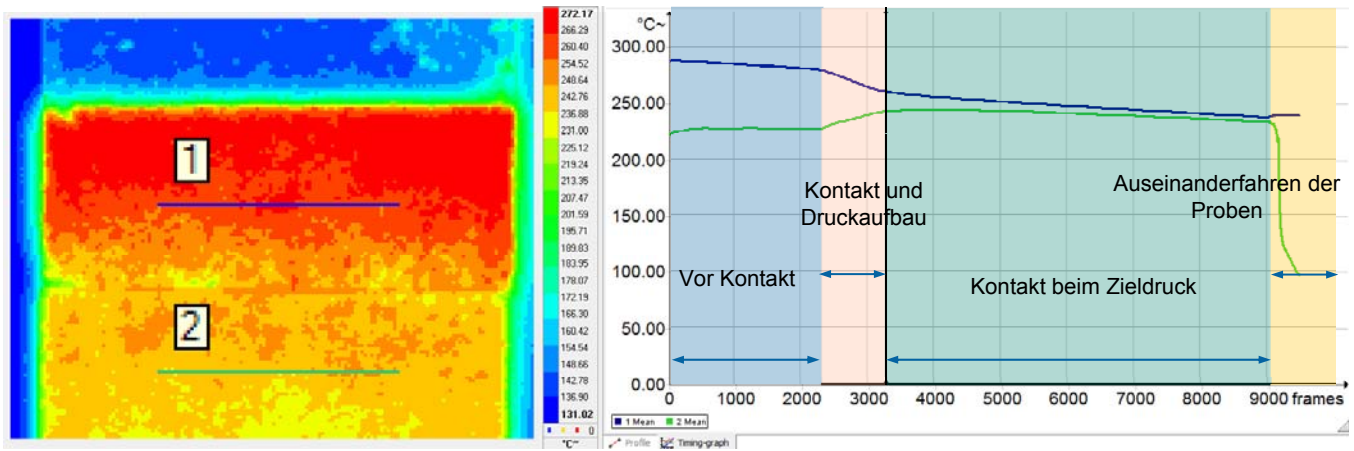


Infrarot-Messungen



Auswertung der IR-Messungen

Mittlerer zeitlicher Temperaturverlauf in beiden Probenkörpern

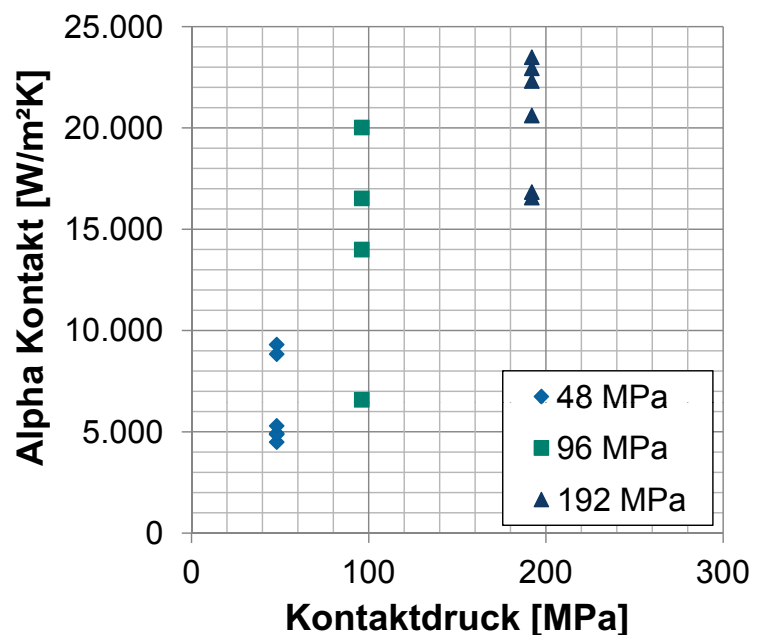


Die gemessenen mittleren Temperaturverläufe lassen sich in die vier erwarteten Phasen einteilen

Auswertung der IR-Messungen

Versuchsparameter

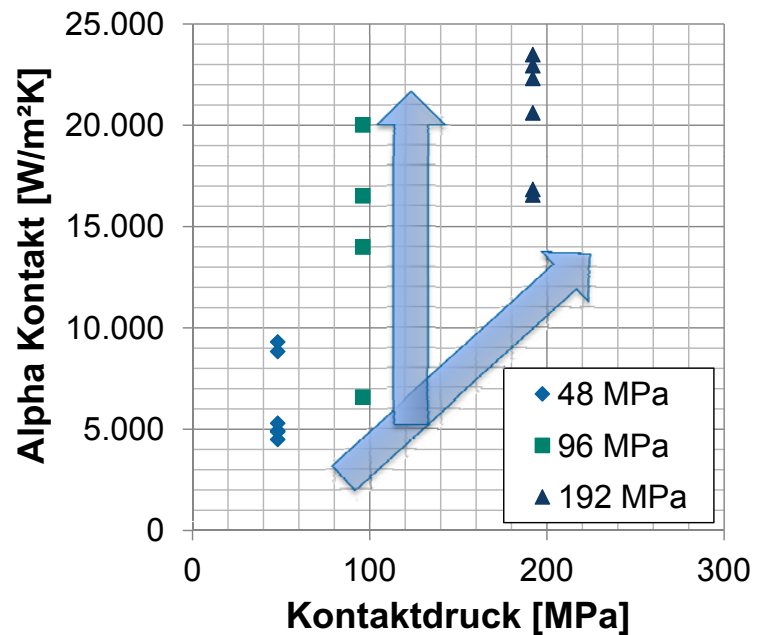
- Probenmaterial und Materialpaarung
- Jeweilige Oberflächenrauheit der Proben
- Anfangstemperaturen / Temperaturdifferenz
- **Kontaktdruck**
- **Versuchswiederholung**
- Zwischenmedium



Auswertung der IR-Messungen

Ergebnisse der Vorversuche

- Wärmeübergangskoeffizient nimmt mit steigendem Kontaktdruck zunimmt.
- Die Messungen zeigen tendenziell eine Zunahme des Wärmeübergangskoeffizienten mit steigender Zahl an Wiederholungen.
- Erkenntnisse müssen in den folgenden Messungen genauer untersucht und statistisch abgesichert werden.



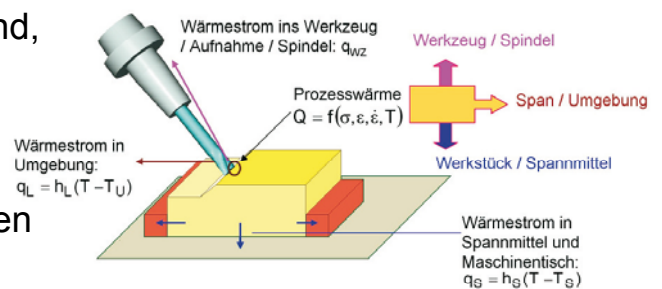
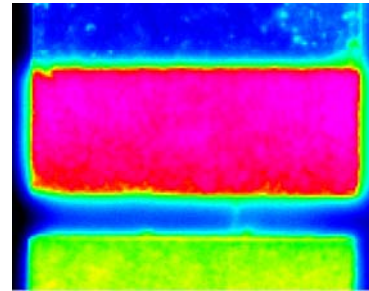
Ausblick

Nächste Arbeitsschritte

- Weiterentwicklung des Programms zur Auswertung: z.B. hinsichtlich Pixelabstand, Objektiv, Temperaturunterschied u.a. im Rahmen der Kooperation mit Prof. Herzog (B05)
- Versuche mit Variation der angegebenen wie z.B. Werkstoff, Materialpaarung und Rauheit
- Auswertung der Versuchsergebnisse und Identifikation der Haupteinflussgrößen

Gliederung

- Zielstellung / Verbindung beider Projekte
- Arbeiten im TP B02
 - Überblick
 - Versuchstand
 - Aktuelle Messergebnisse
 - Ausblick
- Arbeiten im TP A01
 - Überblick
 - Versuchstand: Konzept, aktueller Stand, Messungen
 - FEM-Modellierung Werkzeuge und Spannhalter
 - Vergleich Messungen und Simulationen
 - Ausblick



TP A01: Zielstellung

Werkzeug und Spannvorrichtung

- thermo-mechanisches Verhalten unter Wirkung der Prozesswärme und thermischer Umgebungsbedingungen
- Versatz zwischen Schneide und Werkstückoberfläche
- thermisches Langzeitverhalten
- veränderte Spankräfte

Gegenwärtige Hauptdefizite

- bisher keine Berücksichtigung der Werkzeug- und Vorrichtungstemperatur
- Einfluss der Schnittstellen weitgehend unbekannt
- mit zunehmender Erwärmung
 - vergrößerte **Sollwertabweichung**
 - Beeinträchtigung **Prozesssicherheit**

Resultierende Zielstellungen

- Analyse und modellhafte Beschreibung der thermisch bedingten Werkzeug- und Spannmitteilverformung in Abhängigkeit von Prozess und Umgebung (experimentelle Untersuchung und numerische Simulation)
- Ableitung von **Korrektur- und Kompensationsmöglichkeiten**
- Möglichkeiten zur **Nutzung bzw. Rückführung thermischer Prozessenergie**

Versuchsstand

Umhausung

Schaltschrank

Kühlmittel-
schmierstoffanlage



Versuchsstand

Umhausung

Schaltschrank

Kühlmittel-
schmierstoffanlage



Merkmale und Möglichkeiten für Untersuchungen:

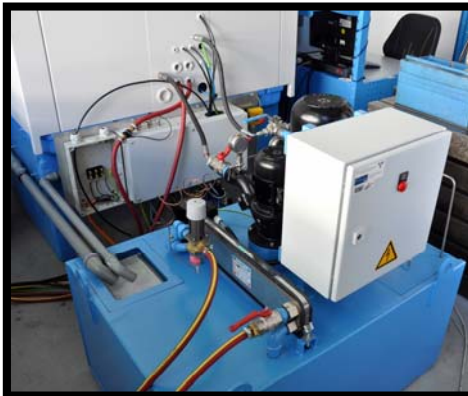
- Spindelpositionierung waagrecht und senkrecht
- klimatisierter Raum
- stehendes und rotierendes Werkzeug
- Werkzeuginnenkühlung
- Außenkühlung

Versuchsstand

Umhausung

Schaltschrank

Kühlmittel-schmierstoffanlage



Messtechnik:

- moderne Messverstärker mit variablen Messkanälen
- Temperatursensorik, z.B. Pt100
- Verlagerungsmessung
- Strömungsmessung
- Thermografiekamera

Versuchsstand

Umhausung

Schaltschrank

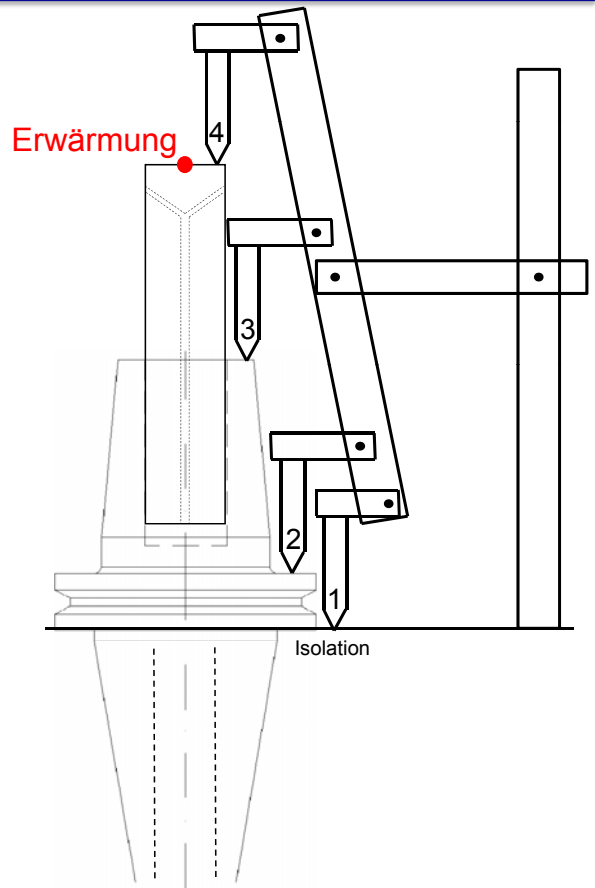
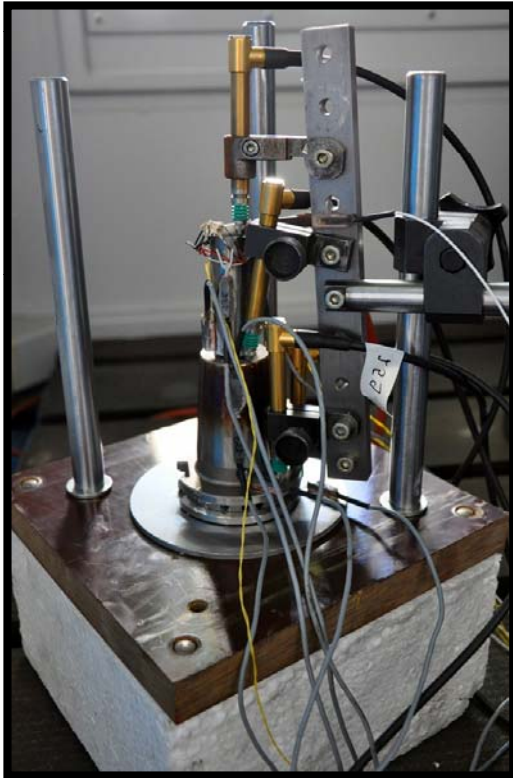
Kühlmittel-schmierstoffanlage



Ziele:

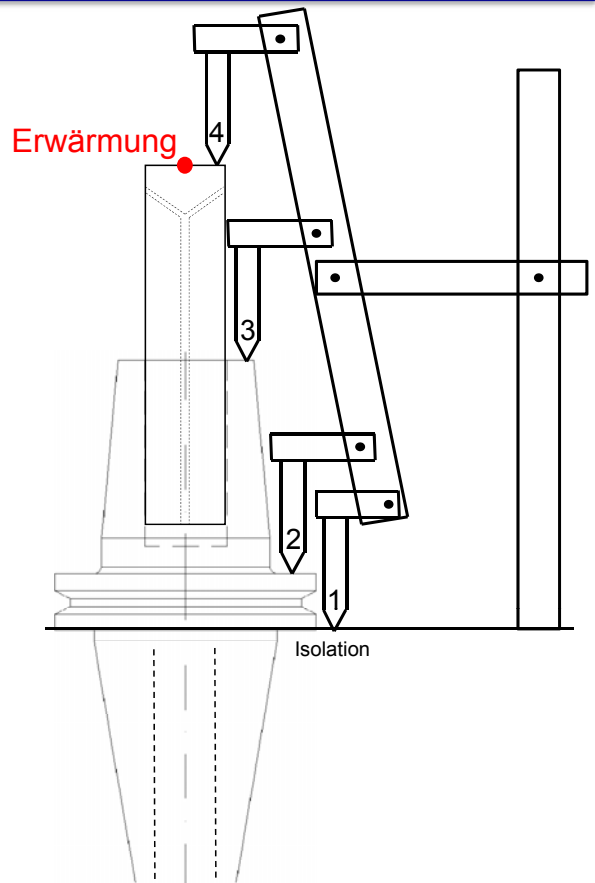
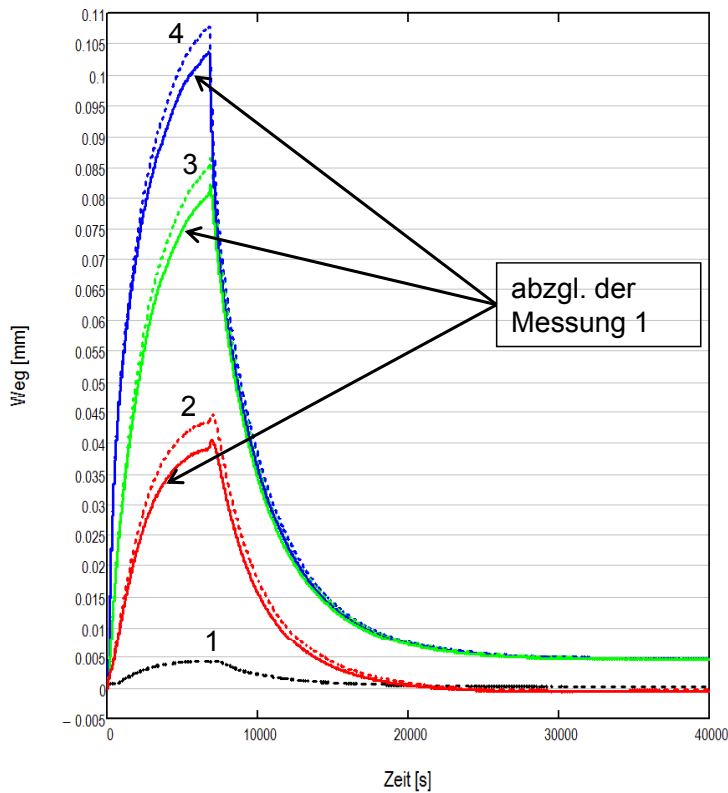
- Identifizierung des Wärmestromes in WZ, Spannhalter und Spindel
- Bestimmung der Verlagerung der WZ-Schneide in Abhängigkeit von Schnittstellen und Umgebung
- Bestimmung der Wärmeübergänge zwischen WZ und der Umgebung
- **Später Gleiches auch für Werkstück und Aufspannung**

Versuchsstand



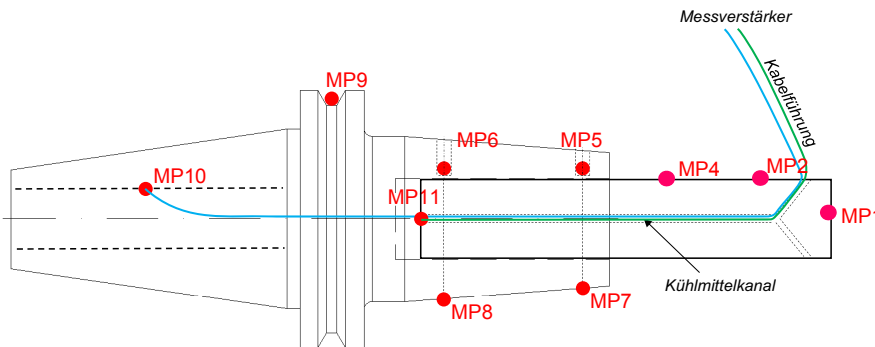
Versuchsstand

Wegsensoren



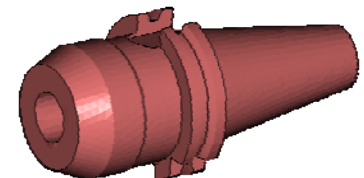
Prinzip der Messungen

- Messungen im stillstehenden Betrieb mit der Möglichkeit später im Rotationsbetrieb zu messen
- Langzeitversuche: 6h Erwärmung / 10h Abkühlung
- Keramikheizstab mit Wärmeleitpaste gut geeignet

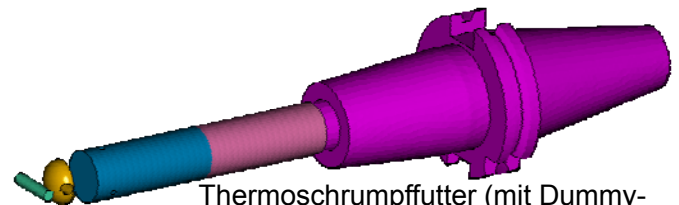


FE-Modelle

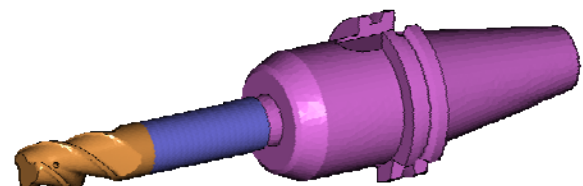
- **FE-Modelle** für beide „Werkzeuge“ (HM-Fräser und Dummy-WZ als Zylinder $\varnothing 20$) und für drei SK40-Spannfutter
- Schnittstellen:
 - **Fuge Einspannung WZ in Spannfutter SK40** (mit variablen Wärmeübergangszahlen definiert)
 - **Modellschnittstellen: Einspannung SK40 in Spindel und Wärmequelle** aus Zerspanungsprozess (externe Heizung realisiert)



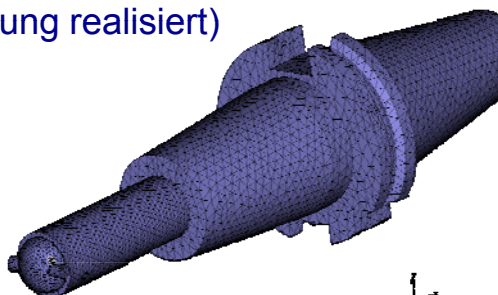
Hydrodehnfutter



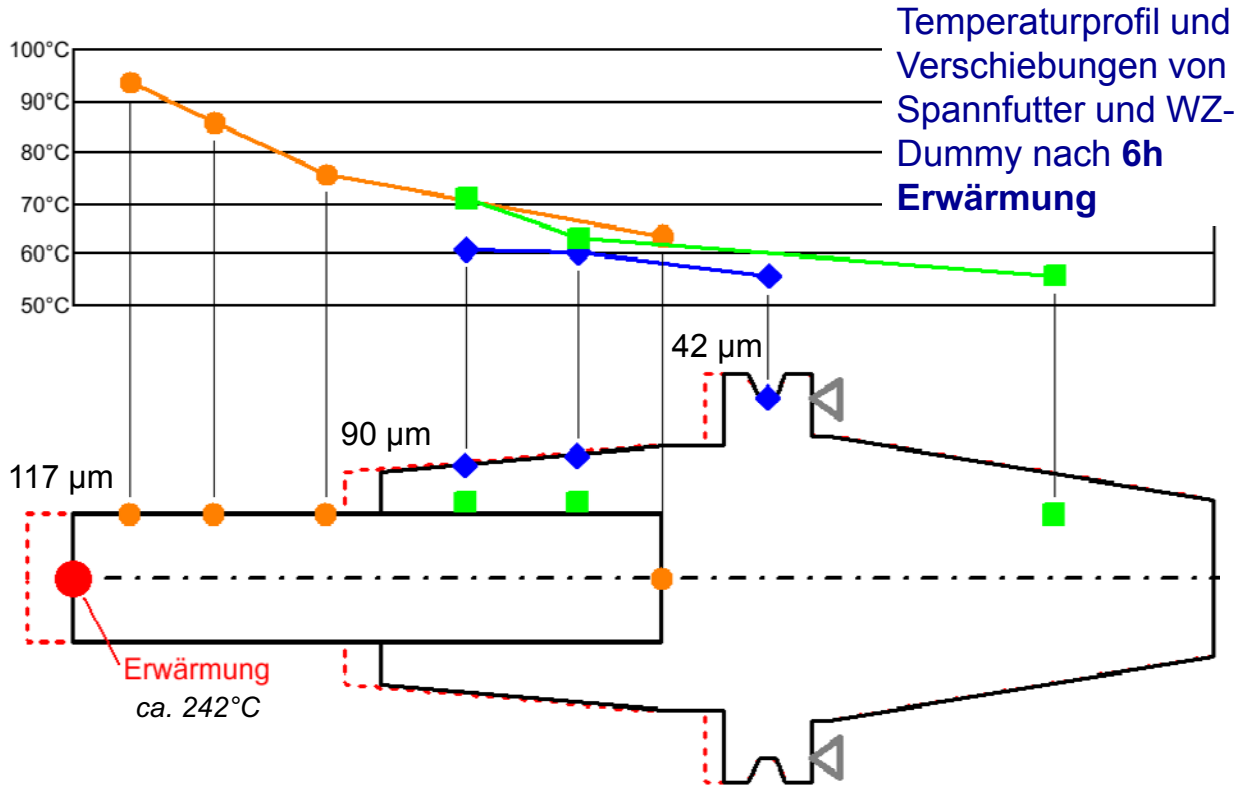
Thermoschrumpffutter (mit Dummy-WZ und Heizstab / WL-Paste)



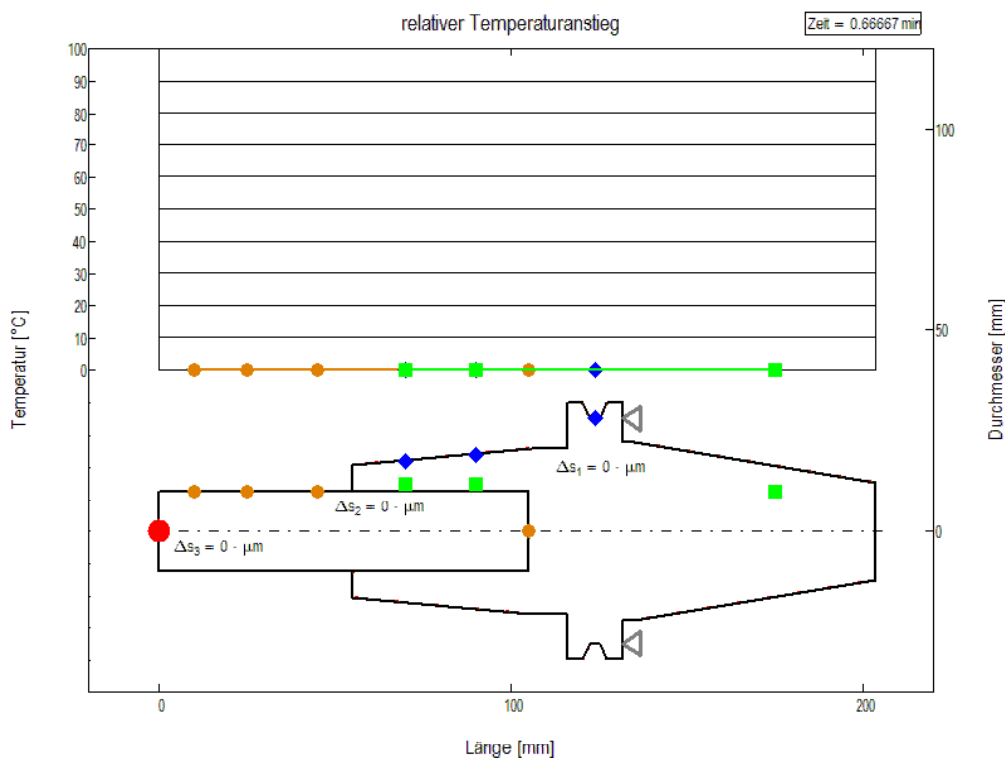
mechanisches Spannfutter (Weldon) mit Voll-HM-Fräser



Temperatur- und Verschiebungsmessung

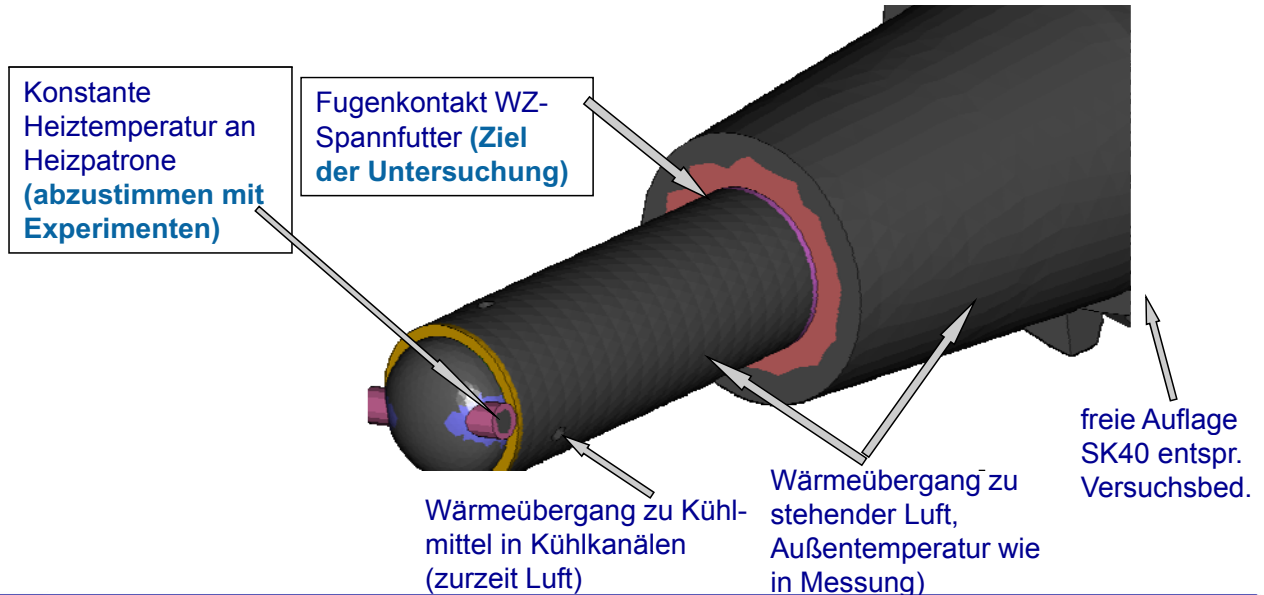


Temperatur- und Verschiebungsmessung



FE-Simulationen

- Komplettes FE-Modell Thermoschrumpffutter mit Dummy-WZ, Fugenstellen und thermomechanischer Randbedingungen
- Anpassung der Wärmequelle (Heizpatrone) im Abgleich mit nächstgelegenen Messpunkt der Temperatur
- Variation der Wärmeübergangparameter zur Umgebung und an Fugenstellen

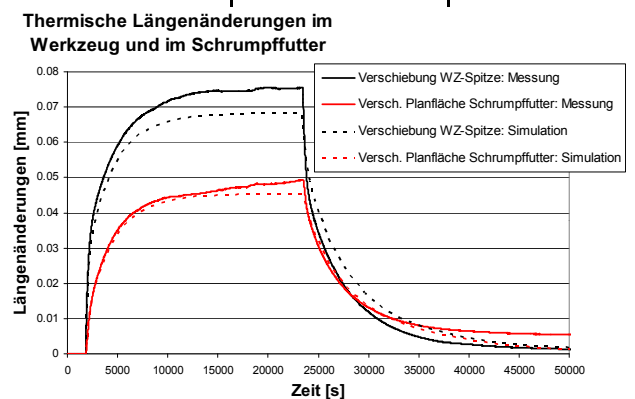
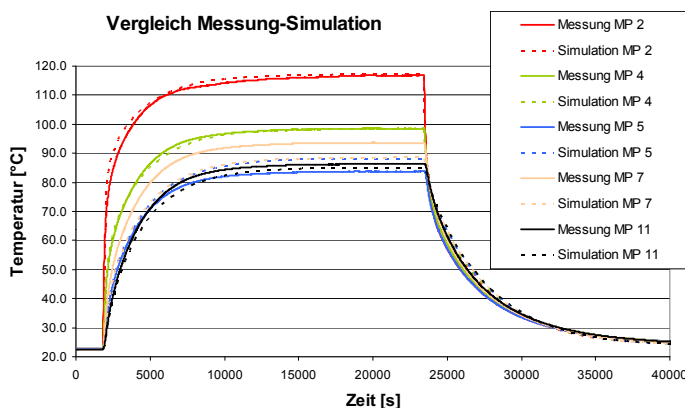
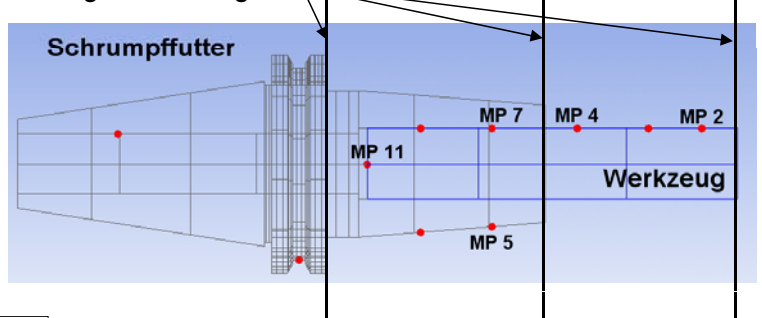


FEM-Simulationen

Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messung

- Temperaturverhalten in den Messpunkten („Sample points“ im FE-Modell)
- Verschiebung der WZ-Spitze relativ zum Spannfutter-Flansch bei Temperaturerhöhung auf 175 °C an WZ-Spitze beträgt ca. 70 µm

Bezugsebenen für Messungen der Längenänderungen

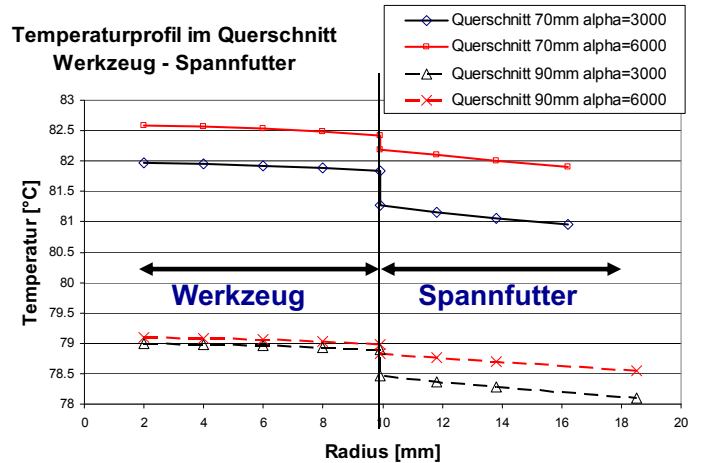
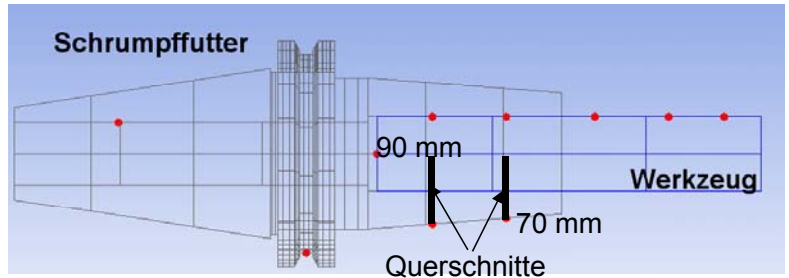


Gute Übereinstimmung Messung – Simulation trotz vereinfachter Modellannahmen (prozentuale Abweichung max. 6 %)

FEM-Simulationen

Einfluss der Wärmeübergangparameter an der Fugenstelle Werkzeug – Spannfutter auf das Temperaturprofil

- Wärmeübergangszahl bestimmt sowohl den Temperaturgradienten als auch den Absolutwert der Temperatur an der Fuge
- Bisherige Simulationen mit konstanten Werten $\alpha = 3000 \text{ W/m}^2/\text{K}$ bzw. $6000 \text{ W/m}^2/\text{K}$
- In nachfolgender Projektperiode erfolgt Abgleich der Werte mit Ergebnisse des TP B02



Strömungssimulationen

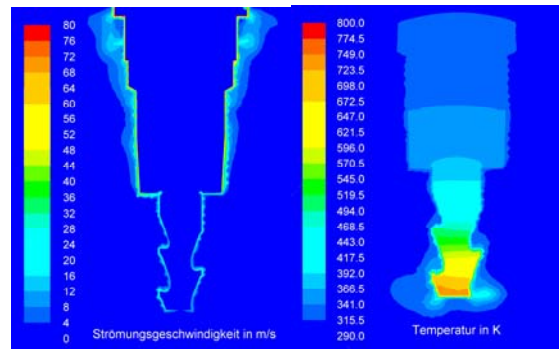
Erste Modellierungsschritte mit ANSYS Fluent bzw. CFX

Siehe Posterbeitrag TP A01

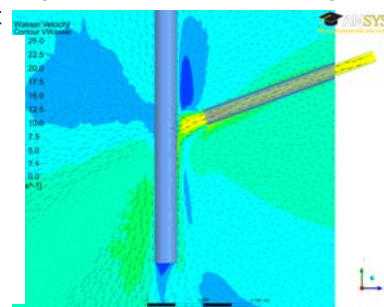
3 Zielrichtungen:

- Umströmung rotierender Werkzeuge (abgeschlossene Bachelor-Arbeit)
- Werkzeugumströmung durch Kühlmittelstrahl
- Luftbewegung im Maschinenraum

Strömungsgeschwindigkeiten in der Umgebungsluft und Temperaturfeld in Werkzeug und Umgebung (Werkzeugdrehzahl: 25.000 1/min in ruhender Luft, Schneidentemperatur: 723 K ~ 450°C)



Kühlmittelstrahl unter 3 bar Überdruck auf stehendes, idealisiertes Werkzeug (Zylinder): Modellgeometrie und Geschwindigkeitsverteilung im Axialschnitt



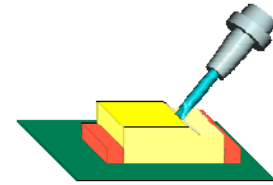
Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Versuchsstand Maschinentisch-Umhausung-Spindel-Kühlsystem
Werkzeugeispannung-Werkstückaufspannung komplett
- Für Baugruppe Werkzeug-Spannfutter separater Messaufbau
- Erste Langzeit-Temperatur- und Verschiebungsmessungen für
Baugruppen Werkzeug-Spannfutter und Werkstück-Aufspannung
- FE-Modelle für Baugruppe Werkzeug-Spannfutter
- Gute Übereinstimmung Messung – Simulation trotz vereinfachter
Modellannahmen

Ausblick

- Messungen an realen Werkzeugen
- Messungen für rotierende Werkzeuge
- Untersuchung verschiedener Kühlmittel und Kühlmethoden
- Erweiterung der FE-Modelle für diese Versuchsbedingungen
- Fortführung und Ausbau der Strömungssimulationen



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Vieler, S. (B02, WSA / RWTH)
Kneer, R. (B02, WSA / RWTH)

Bräunig, M. (A01, IWP)
Semmler, U. (A01, IWU)

IDENTIFIKATION RELEVANTER PARAMETER UND STRUKTURBEREICHE FÜR DEN WÄRMEÜBERGANG ZWISCHEN MASCHINE UND UMGEBUNG

R. Herzog, I. Riedel; Professur Numerische Mathematik (Partielle Differentialgleichungen)

S. Ihlenfeldt, C. Zwingenberger; Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik Chemnitz

Um eine thermische Eigenschaftsanalyse von Werkzeugmaschinen durchführen zu können, ist eine genaue Kenntnis der Randbedingungen zwischen Maschinenstruktur und Umgebung erforderlich. Diese beschreiben vor allem die Wechselwirkung der Strukturoberfläche mit der Umgebung durch Konvektion und Wärmestrahlung.

Für die Konvektionsrandbedingung sind dabei die Umgebungstemperatur und der Wärmeübergangskoeffizient entscheidende Einflussfaktoren.

Der Wärmeübergangskoeffizient stellt jedoch keine messbare Größe dar und ist auch nicht über die gesamte Strukturoberfläche konstant. Um diese Größe mittels Parameteridentifikation zu bestimmen, bietet sich eine CFD-Simulation der freien Konvektion an.

Da die strömungsmechanischen Simulationen einen hohen Detaillierungsgrad hinsichtlich der geometrischen Eigenschaften und der sich einstellenden Luftströmung um die Struktur erlauben, ist auf Basis dieser Vorgehensweise eine genauere Beschreibung der Konvektionsrandbedingung zu erwarten als es empirische Berechnungsvorschriften zulassen. Eine genaue Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten ist jedoch gleichzeitig an ein CFD-Modell mit hoher Netzdicke gebunden, was zu einem hohen Rechenaufwand führt. Es lässt sich feststellen, dass für die Berechnung von thermo-elastischen Verformungen an einer Werkzeugmaschine für relevante Punkte (im Allgemeinen der Tool Center Point - TCP) die genaue Kenntnis des Wärmeübergangskoeffizienten nur in bestimmten Bereichen der Strukturoberfläche erforderlich ist.

In anderen Bereichen hat eine Ungenauigkeit des Parameters nur unwesentliche Auswirkungen auf die Verformung. Die Identifikation solcher sensitiver Bereiche soll mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse erfolgen.

Im Vortrag werden die mathematischen Grundlagen der Sensitivitätsanalyse im Allgemeinen und am Beispiel eines Maschinenständers beschrieben. Weiterhin wird eine Methode vorgestellt, die Abhängigkeit skalarer Ausgangsgrößen, wie z. B. die Verschiebung am TCP von verschiedenen Eingangsgrößen, z. B. dem Wärmeübergangskoeffizienten, numerisch effizient zu berechnen. Diese Methode beruht auf der Verwendung adjungierter Modelle.

Die Sensitivitätsanalyse liefert Sensitivitätskarten, die zeigen, in welchen Bereichen die Ausgangsgröße besonders empfindlich auf Ungenauigkeiten im Parameter reagiert. Diese Bereiche sollen in der CFD-Simulation besonders fein vernetzt werden, während andere Bereiche mit niedrigen Sensitivitätswerten wesentlich gröber vernetzt werden können, was mit einer deutlichen Verringerung des Rechenaufwandes einhergeht.

Kontakt:

Ilka Riedel

Professur Numerische Mathematik (Partielle Differentialgleichungen)

TU Chemnitz

09107 Chemnitz

Tel.: 0371 531-32624

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

24. Oktober 2012

Identifikation relevanter Parameter und Strukturbereiche für den Wärmeübergang zwischen Maschine und Umgebung

R. Herzog¹ I. Riedel¹ S. Ihlenfeldt² C. Zwingenberger²

¹Professur Numerische Mathematik, TU Chemnitz (B05)

²Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU (B01)

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Gliederung

- 1 Einführung und Motivation
- 2 Zielstellung
- 3 Vorgehensweise - Sensitivitätsanalyse
- 4 Ergebnisse - Sensitivitätsanalyse
- 5 Zusammenfassung und Ausblick

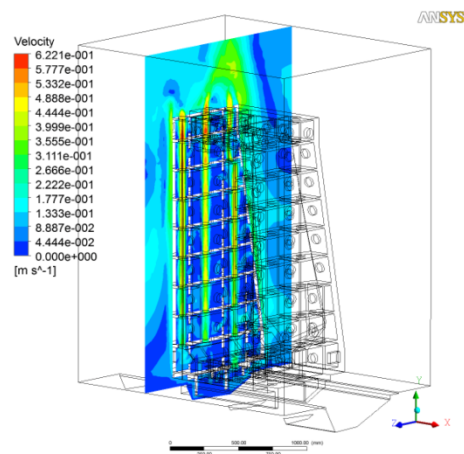
Einführung und Motivation

- Thermische Eigenschaftsanalyse von Werkzeugmaschinen erfordert Randbedingungen zwischen Maschinenstruktur und Umgebung
- Beschreibung der Wechselwirkung von Strukturoberfläche mit der Umgebung durch Konvektion und Wärmestrahlung
- Konvektionsrandbedingungen werden definiert durch Wärmeübergangskoeffizienten und Umgebungstemperatur
- Wärmeübergangskoeffizient keine messbare Größe → Berechnung auf Grundlage empirischer Gleichungen
- Differenzierung an einer komplexen Geometrie unzureichend

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Einführung und Motivation

- CFD-Simulation zur Abbildung freier Konvektion erfordert aufwändige Simulationsmodelle
- Anforderung hoher Netzdichte in Bereichen mit Haftbedingung (Wand) → hoher Berechnungsaufwand
- Messungen der Temperaturen zur Verifizierung nur an ausgewählten Bereichen mit vertretbarem Aufwand realisierbar
- Messung der Strömungsgeschwindigkeit bei freier Konvektion kaum möglich



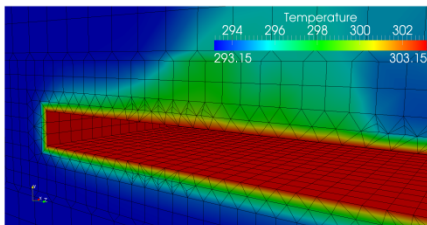
Strömungsgeschwindigkeiten der Umgebungsluft (Schnitt durch Fluid und Solid)

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

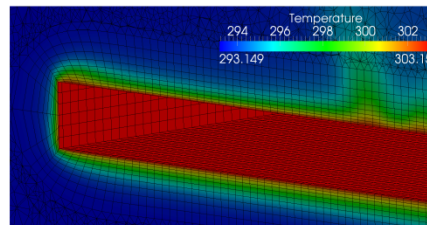
Zielstellung

- Verwendung „höherwertiger“ Simulationsmodelle zur Beschreibung der Konvektionsrandbedingungen → **CFD**
- Klassifizierung der Strukturoberfläche → Parameteridentifikation auf Basis von CFD-Simulationen
- Identifikation sensibler Bereiche, in denen eine hohe Genauigkeit der Parameter erforderlich ist → **Sensitivitätsanalyse**
- hoher Anspruch an Netzdichte für CFD-Modelle zur Beschreibung der Haftbedingung

grobes Netz → Genauigkeit mangelhaft



Netz mit Layerelementen → hohe Genauigkeit, hoher Rechenaufwand

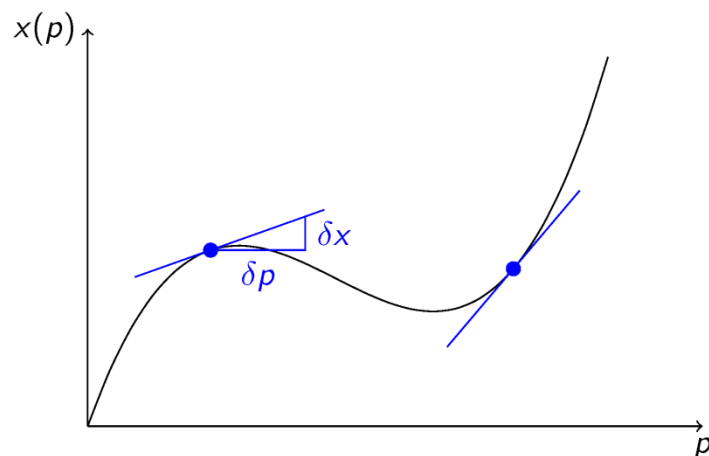


SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Idee der Sensitivitätsanalyse

Sensitivitätsanalyse ist die Berechnung von Ableitungen der Ausgangsgrößen nach den Eingangsgrößen.

→ linearisierter Zusammenhang $\delta x = x'(p) \delta p$



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Berechnung von Ableitungen

Explizite Funktion

$$x(p) \rightarrow x'(p_0) \delta p$$

Implizite Funktion

$$e(x, p) = 0$$

$$\rightarrow e_x(x(p_0), p_0) \underbrace{x'(p_0) \delta p}_{=\delta x} = -e_p(x(p_0), p_0) \delta p$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Berechnung von Ableitungen

Explizite Funktion

$$x(p) \rightarrow x'(p_0) \delta p$$

Implizite Funktion

$$e(x, p) = 0 \leftarrow \text{thermo-mechanische FE-Simulation}$$

$$\rightarrow e_x(x(p_0), p_0) \underbrace{x'(p_0) \delta p}_{=\delta x} = -e_p(x(p_0), p_0) \delta p$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Berechnung von Ableitungen

Explizite Funktion

$$x(p) \rightarrow x'(p_0) \delta p$$

Implizite Funktion

$$e(x, p) = 0 \leftarrow \text{thermo-mechanische FE-Simulation}$$

$$\rightarrow \underbrace{e_x(x(p_0), p_0)}_{?} \underbrace{x'(p_0) \delta p}_{=\delta x} = -e_p(x(p_0), p_0) \delta p$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Thermo-mechanisches Modell

Wärmeleitung (stationär)

$$-\text{div}(\lambda \nabla T) = q \quad \text{in } \Omega$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha (T - T_{\text{ref}}) = r \quad \text{auf } \Gamma = \partial \Omega$$

- T - Temperatur [K]
- q - thermische Volumenlast(dichte) [W/m³]
- r - thermische Flächenlast(dichte) [W/m²]
- λ - Wärmeleitfähigkeit [W/(K m)]
- α - Wärmeübergangskoeffizient [W/(K m²)]
- T_{ref} - Umgebungstemperatur [K]



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Thermo-mechanisches Modell

Lineare Elastizität

$$\begin{aligned}
 -\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} &= \mathbf{f} \quad \text{in } \Omega \\
 \boldsymbol{\varepsilon} &= \mathbb{C}^{-1} \boldsymbol{\sigma} + \beta (T - T_{\text{ref}}) \mathbf{I} \\
 \mathbb{C}^{-1} \boldsymbol{\sigma} &= \frac{1 + \nu}{E} \boldsymbol{\sigma} - \frac{\nu}{E} \operatorname{trace}(\boldsymbol{\sigma}) \mathbf{I} \quad \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad \text{auf } \Gamma_D \\
 \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) &= \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{g} \quad \text{auf } \Gamma_N
 \end{aligned}$$

- \mathbf{u} - Verschiebung [m]
- $\boldsymbol{\sigma}$ - Spannung [N/m²]
- $\boldsymbol{\varepsilon}$ - Verzerrung [1]
- ν - Querkontraktionszahl [1]
- E - E-Modul [N/m²]
- β - therm. volumetr. Ausdehnungskoeff. [1/K]
- \mathbf{f} - Volumenlast(dichte) [N/m³]
- \mathbf{g} - Flächenlast(dichte) [N/m²]



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Thermo-mechanisches Modell

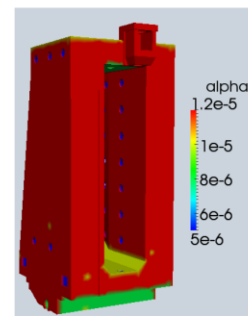
$$x \hat{=} (T, \mathbf{u}), \quad p \hat{=} \alpha$$

Wärmeleitung (stationär)

$$\begin{aligned}
 -\operatorname{div}(\lambda \nabla T) &= q \quad \text{in } \Omega \\
 \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha (T - T_{\text{ref}}) &= r \quad \text{auf } \Gamma = \partial \Omega
 \end{aligned}$$

Lineare Elastizität

$$\begin{aligned}
 -\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} &= \mathbf{f} \quad \text{in } \Omega \\
 \boldsymbol{\varepsilon} &= \mathbb{C}^{-1} \boldsymbol{\sigma} + \beta (T - T_{\text{ref}}) \mathbf{I} \quad \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad \text{auf } \Gamma_D \\
 \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) &= \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{g} \quad \text{auf } \Gamma_N
 \end{aligned}$$

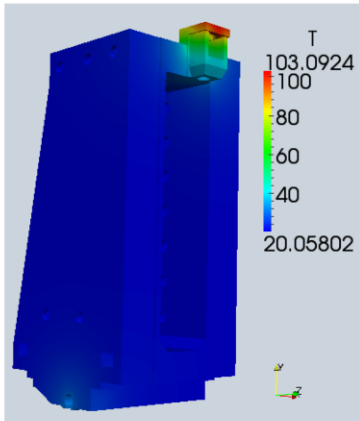


α_0 in [W/K mm²]

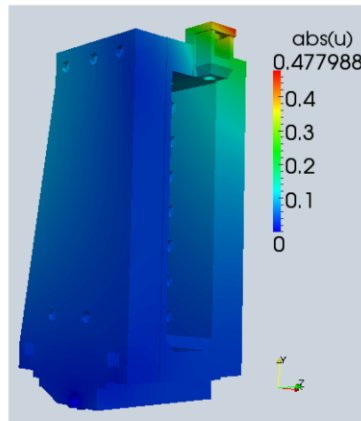
SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Beispiel Maschinenständer

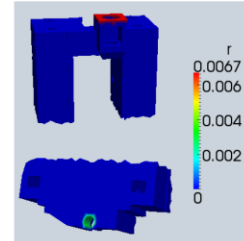
Temperatur T in [K]



Betrag der Verschiebung $|u|$ in [mm]



Wärmequellen r in [W/mm²]



Einspannung



$$u_y = u_z = 0$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Sensitivitätsmodell

$$e_x(x, p) \delta x + e_p(x, p) \delta p = 0$$

Thermisches Sensitivitätsmodell

$$\begin{aligned}
 -\operatorname{div}(\lambda \nabla \delta T) &= 0 && \text{in } \Omega \\
 \lambda \frac{\partial}{\partial n} \delta T + \alpha \delta T &= -\delta \alpha (T - T_{\text{ref}}) && \text{auf } \Gamma
 \end{aligned}$$

Elastisches Sensitivitätsmodell

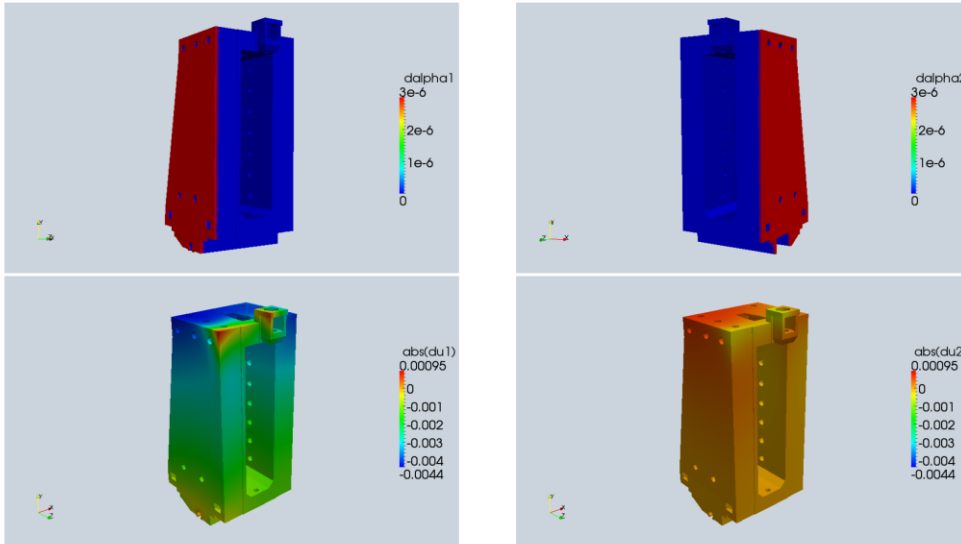
$$\begin{aligned}
 -\operatorname{div}(\delta \sigma) &= \mathbf{0} && \text{in } \Omega \\
 \delta \varepsilon &= \mathbb{C}^{-1} \delta \sigma + \beta \delta T \mathbf{I} && \delta \mathbf{u} = \mathbf{0} \text{ auf } \Gamma_D \\
 \delta \varepsilon(\delta \mathbf{u}) &= \frac{1}{2} (\nabla \delta \mathbf{u} + \nabla \delta \mathbf{u}^T) && \delta \sigma \cdot \mathbf{n} = \mathbf{0} \text{ auf } \Gamma_N
 \end{aligned}$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Beispiel Richtungsableitung

Einfluss des Wärmeübergangsparameters auf die Verschiebung

$$x'(\alpha_0) \delta\alpha = (\delta T, \delta u)$$



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Output-Funktional

- Meist ist nicht die gesamte Ableitung interessant, sondern nur ausgewählte Größen, z. B. die Verschiebung am TCP.
- Führen daher ein Output-Funktional $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ ein.

Explizite Funktion

$$f(x(p)) \rightarrow \frac{d}{dp} f(x(p_0)) \delta p = f'(x(p_0)) x'(p_0) \delta p$$

Implizite Funktion

$$f(x(p)), \text{ wobei } e(x, p) = 0$$

$$\rightarrow \frac{d}{dp} f(x(p_0)) \delta p = - f'(x(p_0)) \cdot e_x(x(p_0), p_0)^{-1} \cdot e_p(x(p_0), p_0) \delta p$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Output-Funktional

- Meist ist nicht die gesamte Ableitung interessant, sondern nur ausgewählte Größen, z. B. die Verschiebung am TCP.
- Führen daher ein Output-Funktional $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ ein.

Explizite Funktion

$$f(x(p)) \rightarrow \frac{d}{dp} f(x(p_0)) \delta p = f'(x(p_0)) x'(p_0) \delta p$$

Implizite Funktion

$$f(x(p)), \text{ wobei } e(x, p) = 0$$

$$\rightarrow \frac{d}{dp} f(x(p_0)) \delta p = - \underbrace{f'(x(p_0))}_{\square} \cdot \underbrace{e_x(x(p_0), p_0)^{-1}}_{\square} \cdot \underbrace{e_p(x(p_0), p_0)}_{\square} \delta p$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Output-Funktional

- Meist ist nicht die gesamte Ableitung interessant, sondern nur ausgewählte Größen, z. B. die Verschiebung am TCP.
- Führen daher ein Output-Funktional $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ ein.

Explizite Funktion

$$f(x(p)) \rightarrow \frac{d}{dp} f(x(p_0)) \delta p = f'(x(p_0)) x'(p_0) \delta p$$

Implizite Funktion

$$f(x(p)), \text{ wobei } e(x, p) = 0$$

$$\rightarrow \frac{d}{dp} f(x(p_0)) \delta p = - \left(\underbrace{f'(x(p_0))}_{\square} \cdot \underbrace{e_x(x(p_0), p_0)^{-1}}_{\square} \right) \cdot \underbrace{e_p(x(p_0), p_0)}_{\square} \delta p$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Output-Funktional

- Meist ist nicht die gesamte Ableitung interessant, sondern nur ausgewählte Größen, z. B. die Verschiebung am TCP.
- Führen daher ein Output-Funktional $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ ein.

Explizite Funktion

$$f(x(p)) \rightarrow \frac{d}{dp} f(x(p_0)) \delta p = f'(x(p_0)) x'(p_0) \delta p$$

Implizite Funktion

$$f(x(p)), \text{ wobei } e(x, p) = 0$$

$$\rightarrow \frac{d}{dp} f(x(p_0)) \delta p = - \underbrace{\left(f'(x(p_0)) \cdot e_x(x(p_0), p_0)^{-1} \right)}_{=y^T} \cdot e_p(x(p_0), p_0) \delta p$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Adjungiertes Modell

- z. B. $f(x) = u_z(P)$
- adjungierter Zustand $y = (S, \mathbf{v})$

Adjungierte Elastizität

$$-\operatorname{div} \tilde{\boldsymbol{\sigma}} = [0, 0, \delta p]^T \quad \text{in } \Omega$$

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbb{C}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\sigma}} \quad \mathbf{v} = \mathbf{0} \quad \text{auf } \Gamma_D$$

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(\mathbf{v}) = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \quad \tilde{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad \text{auf } \Gamma_N$$

Adjungierte Wärmeleitung

$$-\operatorname{div}(\lambda \nabla S) = \beta \frac{E}{1 - 2\nu} \operatorname{trace}(\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(\mathbf{v})) \quad \text{in } \Omega$$

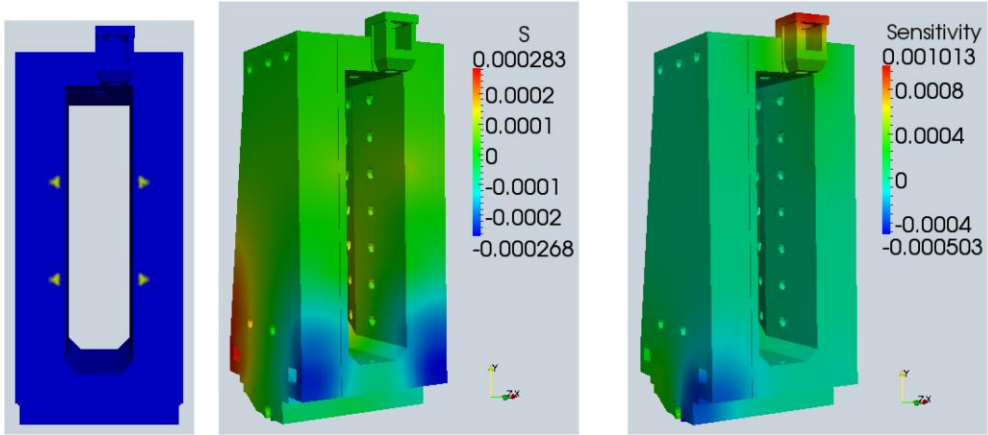
$$\lambda \frac{\partial}{\partial n} S + \alpha S = 0 \quad \text{auf } \Gamma$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Beispiel adjungierter Zustand

$$f(x) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 u_z(P_i),$$

$$\frac{d}{dp} f(x(p_0)) \delta p = \int_{\Gamma} \delta \alpha (T - T_{ref}) S ds$$



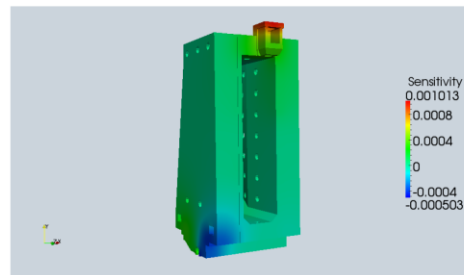
adjungierte Temperatur S $(T - T_{ref}) S$ in [K mm/W] in [mm/W]

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

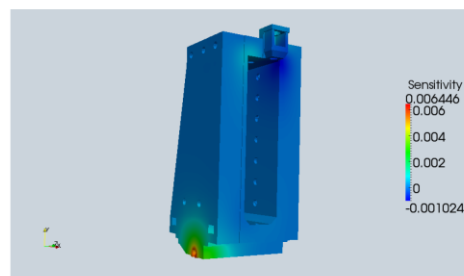
Ergebnisse - Sensitivitätsanalyse

- Sensitivitätskarten zeigen Gebiete, in denen die Lösung empfindlich auf Veränderungen des Parameters reagiert bzw. Ungenauigkeiten des Parameters verstärkt.
- Sensitivitäten sind abhängig von Anfangsdaten p_0 , thermischen Lasten und der geometrischen Situation.
- Gebiete mit hohen Sensitivitätswerten sollten in der CFD-Simulation feiner diskretisiert werden.

$$f(x) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 u_z(P_i)$$



$$f(x) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 u_x(P_i)$$



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Zusammenfassung und Ausblick

- Die Sensitivitätsanalyse mit der beschriebenen Methode ist geeignet, Bereiche zu identifizieren, die eine hohe Empfindlichkeit der Ausgangsgröße gegenüber bestimmten Parametern besitzen.
- Für das vorgestellte Beispiel der Konvektionsrandbedingung sollen die Erkenntnisse bei der Erstellung strömungsmechanischer Modelle genutzt werden, um diese effizient zu gestalten.
- Es soll in weiteren Untersuchungen nachgewiesen werden, dass ein derart „optimiertes“ CFD-Modell ausreichend genau die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten ermöglicht.

ANALYSE UND MODELLIERUNG DER FLUIDISCHEN KÜHLUNG VON MOTORSPINDELN

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

Fluidtechnische Systeme in Werkzeugmaschinen erfüllen neben Antriebsaufgaben für Vorschubbewegungen und die Werkstückspannung vor allem die Funktion der Temperierung: Sie ermöglichen die Kühlung bzw. Vorwärmung sowohl einzelner Komponenten als auch ganzer Baugruppen – beispielweise Gestellbauteile, Antriebsmotoren und Arbeitsspindeln.

Insofern bilden fluidtechnische Systeme ein wichtiges Element zur Steuerung und Beherrschung des thermoelastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen und sind als integraler Bestandteil der Maschinen in die Untersuchungen innerhalb des Themenkomplexes zur Gestaltung von Werkzeugmaschinen speziell mit dem Fokus der Genauigkeit unter den Bedingungen einer energieeffizienten Fertigung mit einzubeziehen.

Die zunehmende Komplexität und Leistungsfähigkeit der fluidtechnischen Systeme bedingt grundsätzlich einen verstärkten Einsatz von Hilfsenergie, welcher aus betriebswirtschaftlicher und ökologischer Sicht zu hinterfragen ist.

Hieraus ergibt sich ein Optimierungsproblem, das angesichts der komplexen Systemstrukturen und fehlenden Grundsatzuntersuchungen sowie Auslegungswerkzeugen heute nicht zufriedenstellend gelöst werden kann.

Diesem Anliegen widmet sich das Teilprojekt A04 unter ganzheitlicher Betrachtungsweise und entwickelt Modellierungsgrundlagen und Berechnungsmethoden für eine wissenschaftlich begründete Auslegung speziell mit dem Schwerpunkt eines optimalen thermischen Verhaltens bei minimalem Hilfsenergieeinsatz.

Im Vortrag wird zunächst die methodische Herangehensweise zur Lösung des Zielkonfliktes vorgestellt. Ausgehend von der Analyse einer Gesamtmaschine können fluidische Subsysteme identifiziert und die Modellierungsanforderungen festgelegt werden.

Die Motorspindel stellt dabei aus fluidtechnischer Sicht eine wichtige Hauptkomponente der Werkzeugmaschine dar und bildet demzufolge einen wesentlichen Schwerpunkt derzeitiger Untersuchungen.

Ausgehend vom prinzipiellen technischen Aufbau von Motorspindeln wird ein abstrahiertes Modell abgeleitet, welches die Grundlage für unterschiedliche Simulationsstrategien darstellt (konzentrierte bzw. verteilte Parameter).

Zur Untersuchung des thermischen Verhaltens von Kühlhülsen in Motorspindeln – insbesondere mit Blick auf die Parameteridentifikation und die Validierung der Simulationsmodelle – wurde ein Versuchsstand entwickelt.

Hierbei gewährleistet die modulare Konstruktion eine einfache Austauschbarkeit der Kühlhülse und ermöglicht somit die Untersuchung unterschiedlicher Strömungsgeometrien.

Der experimentelle Aufbau des Versuchsstandes wird im Vortrag näher erläutert, bevor abschließend ausgewählte Ergebnisse der Maschinenanalyse des Fräsbearbeitungszentrums DBF 630 vorgestellt werden.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Juliane Weber

Institut für Fluidtechnik, TU Dresden

01062 Dresden

Tel.: 0351-46331964


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

2. Kolloquium zum SFB/TR-96

Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

am 24. / 25. 11. 2012 in Chemnitz

Analyse und Modellierung der fluidischen Kühlung von Motorspindeln

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

Motivation und Zielstellung

Gegenstand der Forschung

- Quantifizierung des Verhaltens durchströmter WZM-Bauteile
- Steigerung der Energieeffizienz bei optimaler thermischer Wirkung

Gegenwärtige Hauptdefizite

- Wirkzusammenhänge zwischen Leistungsaufnahme und thermischen Verhalten unzureichend bekannt
- Fehlende Berechnungswerkzeuge
- Thermisch-energetische Optimierung nicht zufriedenstellend durchführbar

Resultierende Zielstellungen

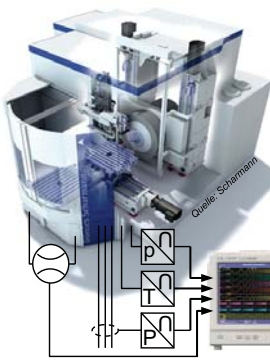
- Untersuchung thermischer und energetischer Wirkzusammenhänge in fluidtechnischen Systemen
- Schaffung netzwerkbasierter Berechnungsmodelle für das thermo-energetische Verhalten fluidtechnischer Hauptkomponenten und Systeme

Fluidtechnische Hauptkomponenten in Werkzeugmaschinen

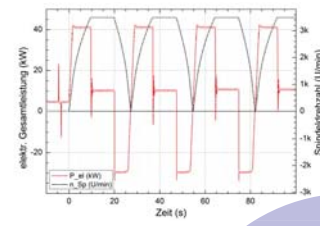


- Spindelkühlung
- Motorkühlung
- Pumpen
- Wärmetauscher

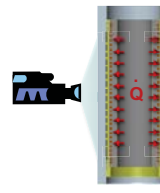
Methodische Vorgehensweise

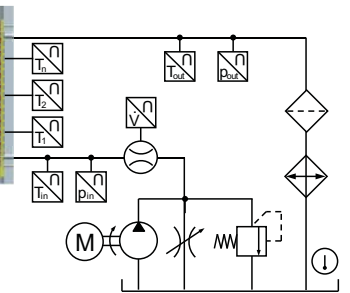


Quelle: Schlemmer



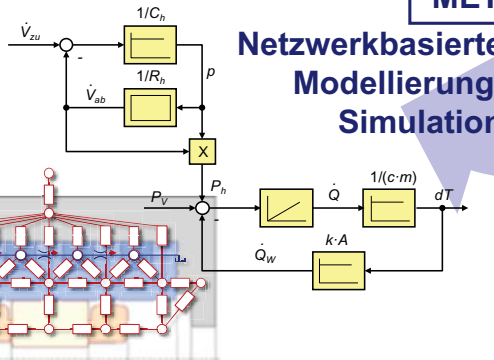
elektr. Gesamtleistung (kW)
Spindelgeschwindigkeit (U/min)
Zeit (s)



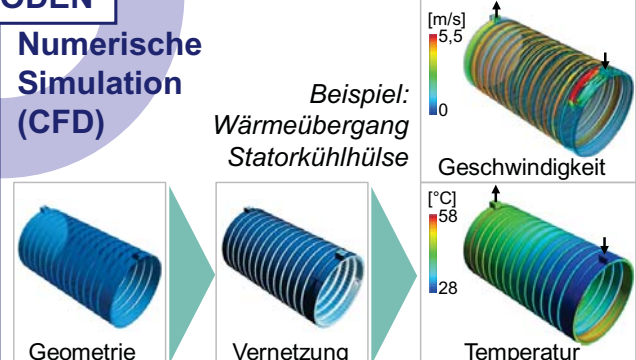


Beispiel: Prüfaufbau Stator Kühnhülse (Motorspindel)

METHODEN

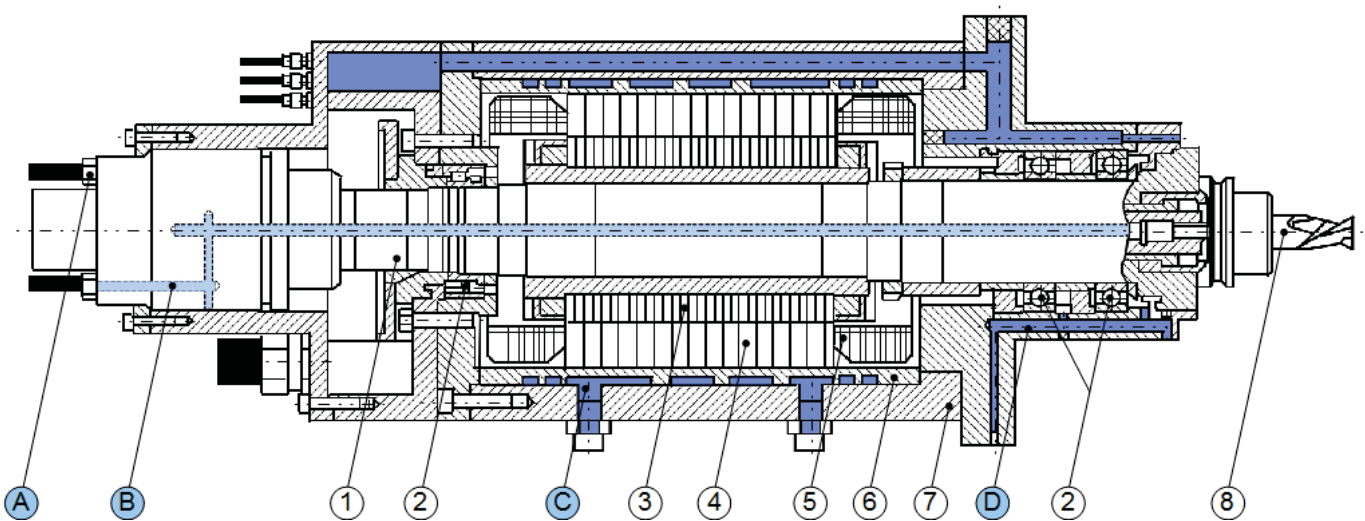


Netzwerkbasierte Modellierung, Simulation



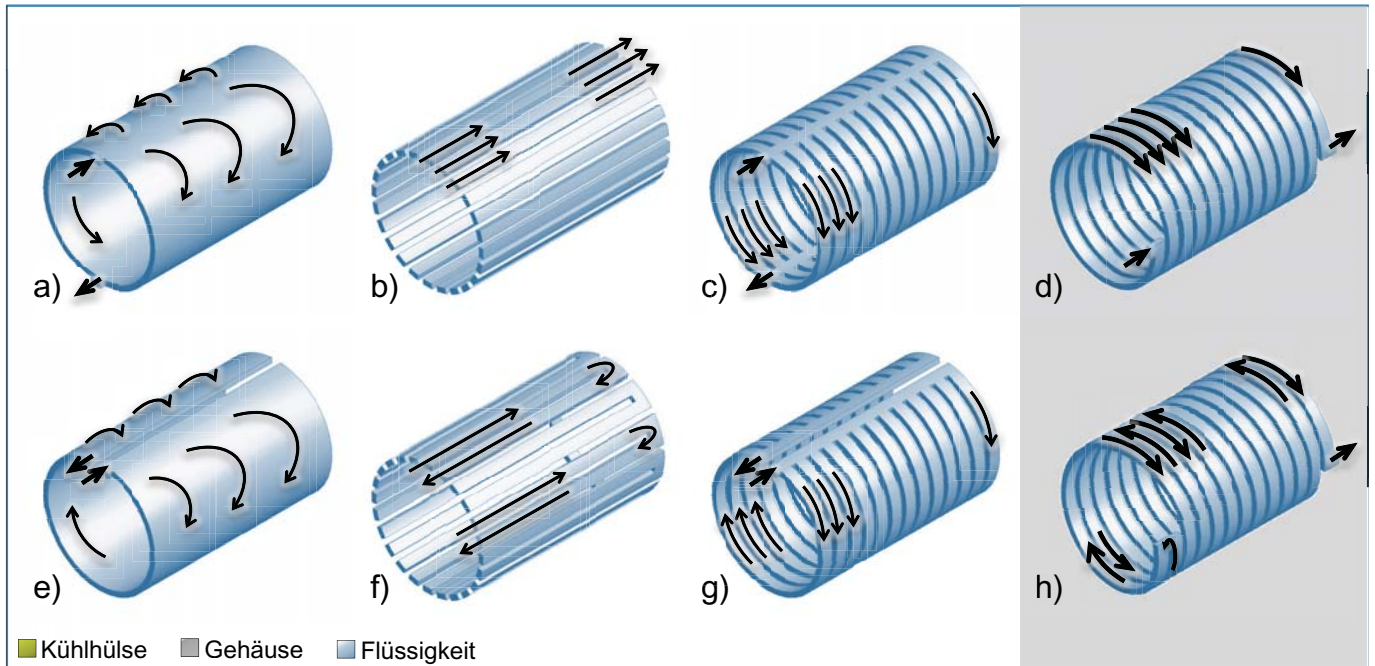
Numerische Simulation (CFD)
Beispiel: Wärmeübergang Stator Kühnhülse
Geschwindigkeit
Temperatur

Hauptkomponente: Motorspindel



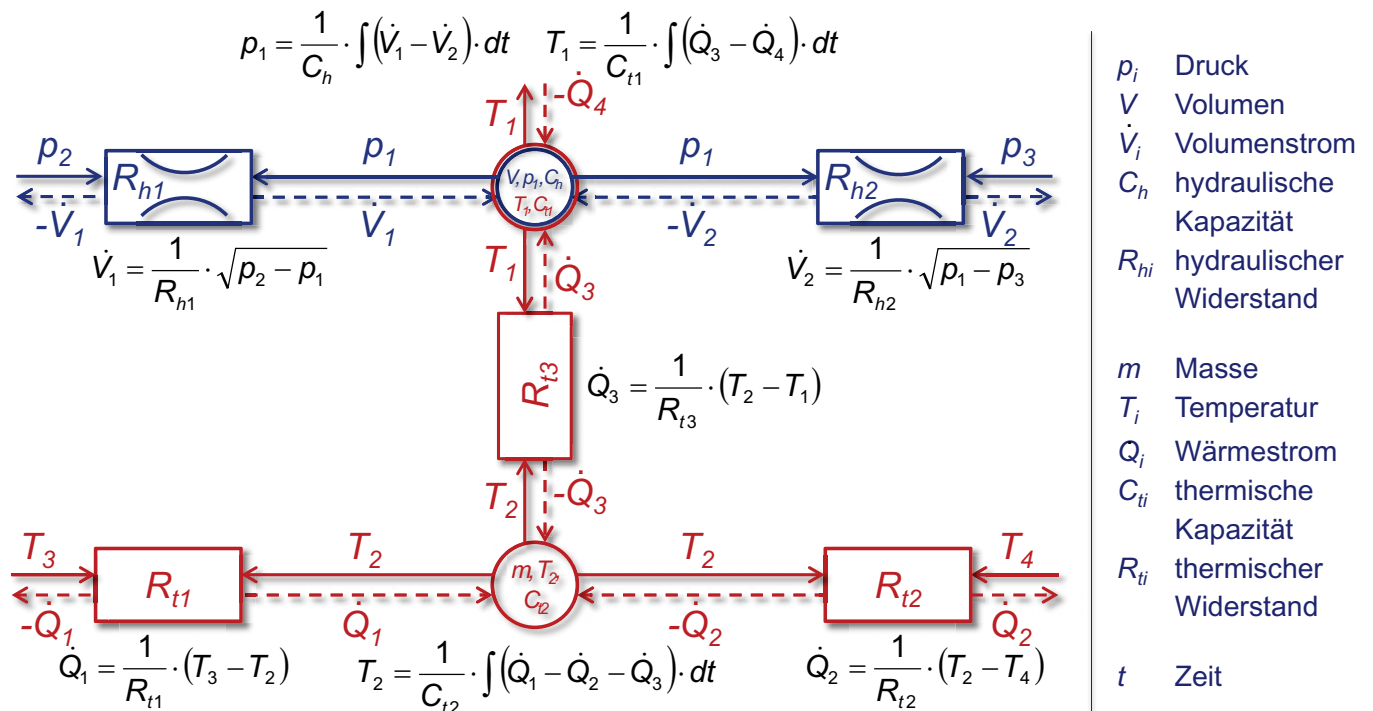
- | | | |
|---------------------------------|--------------------|------------------------|
| A ... Werkzeugkühlung | 1 ... Spindelwelle | 5 ... Wickelkopf |
| B ... Hydraulik | 2 ... Spindellager | 6 ... Stator Kühnhülse |
| <u>C ... Statorkühlung</u> | 3 ... Rotor | 7 ... Gehäuse |
| D ... Lagerkühlung & Schmierung | 4 ... Stator | 8 ... Werkzeug |

Strömungsführungen in Kühlhülsen von Motorspindeln

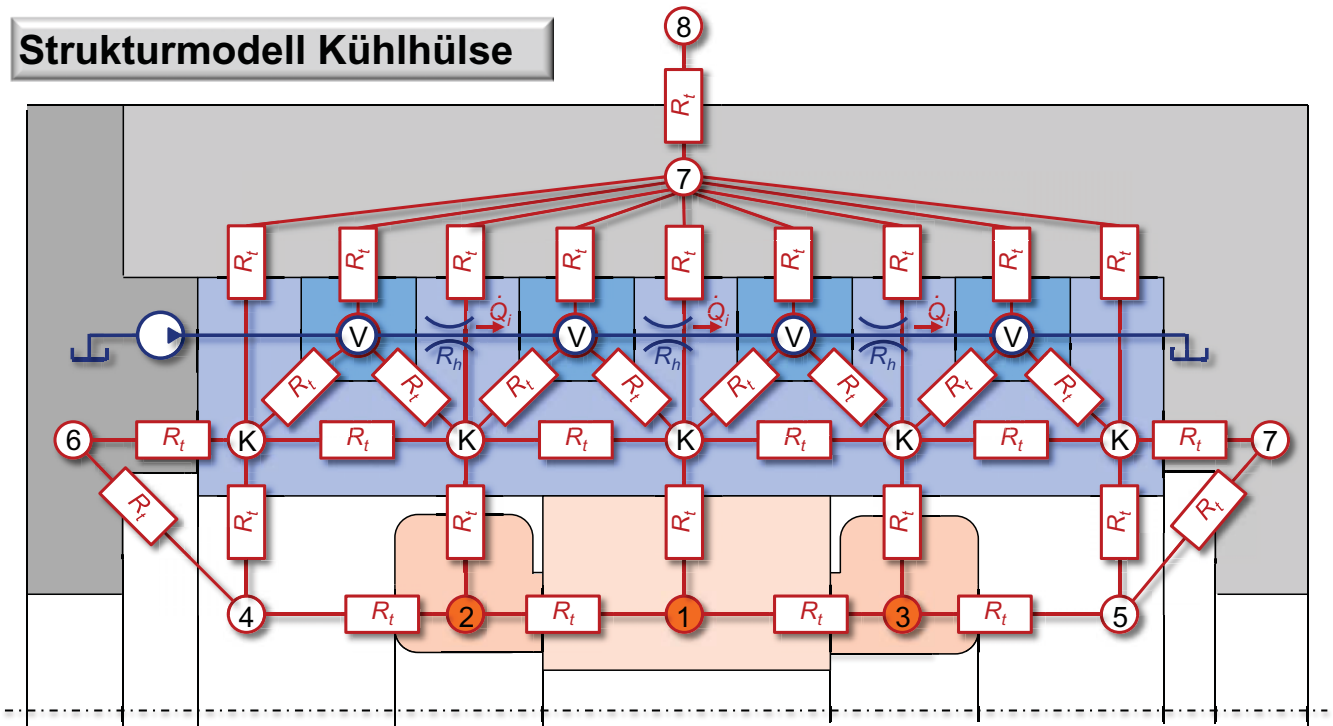


⇒ einfach (d) und doppelt (h) gewendelte Kanalstrukturen sind am weitesten verbreitet

Modellierungsgrundlagen

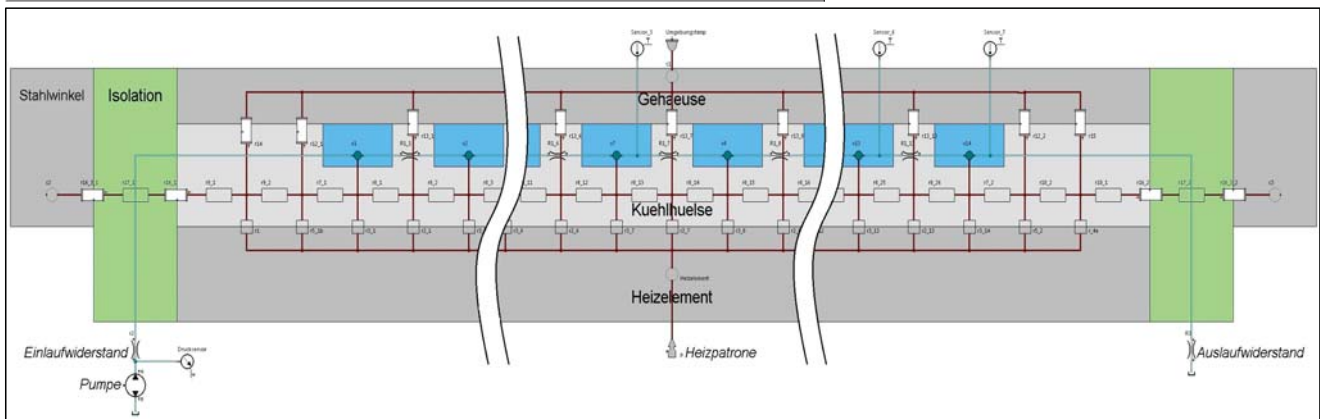


Strukturmodell Kühlhülse



- K Kühlhülse über Stator 2/3 Wickelkopf links/ rechts ○ Therm. Kapazität: T, c_t, m ○ Hydraul. Kapazität: p, V, c_p
- V Fluidvolumen 4/5 Motorraum links/ rechts R_t Therm. Widerstand: $\dot{Q}, \alpha, \lambda, A$ R_h Hydraul. Widerstand: $\dot{V}, \alpha_D, \rho, A$
- 1 Stator 6/7 Gehäuse links/ rechts ● Wärmequelle: \dot{Q}, T, c_t, m T_0 Tank: T_0
- 8 Umgebung \dot{Q}_i innere Wärme \dot{Q}_i durch R_h Ⓢ Pumpe: \dot{V}, p

Konzentrierte Parametersimulation



- Druckverluste

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \zeta \cdot \left(\frac{w}{A}\right)^2$$

- Erzwungene, einphasige, turbulente Strömung

$$\alpha = \frac{\lambda}{d_{hyd}} \cdot Nu \quad \text{mit} \quad Nu = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_{hyd}}{L}\right)^{2/3}\right] \cdot \left[1 + 3,45 \cdot \frac{d_{hyd}}{D_K}\right]$$

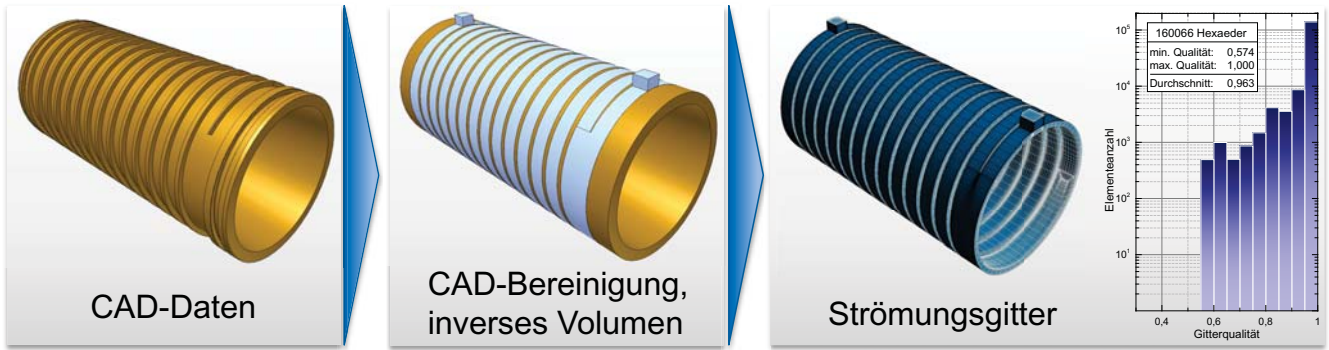
- Wärmeleitung

$$\alpha = \frac{\lambda}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \cdot \frac{1}{r}$$

- Wärmeübergang an Kontaktstellen

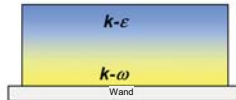
$$\alpha = C_0 \cdot \frac{p}{R_z} + C_1 \cdot \sqrt{\frac{p}{R_z}} + C_2 \quad \text{mit} \quad C_0, C_1, C_2 = const.$$

Numerische Simulation



- Turbulenz: Shear Stress Transport (SST) Modell

Kombination des $k-\omega$ Modells (Randschichten) und des $k-\epsilon$ Modells (wandferne Bereiche)



- Wärmeübertragung

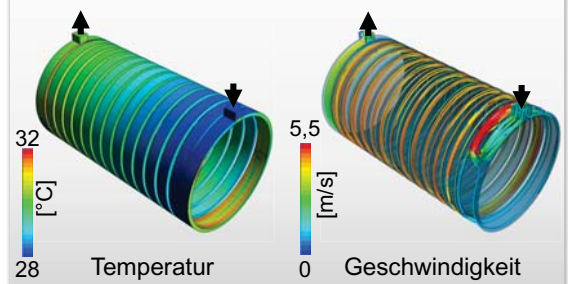
Fluid: Energietransportgleichung

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\rho \tau) + \dot{q}$$

Solid: Wärmeleitungsgleichung

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E$$

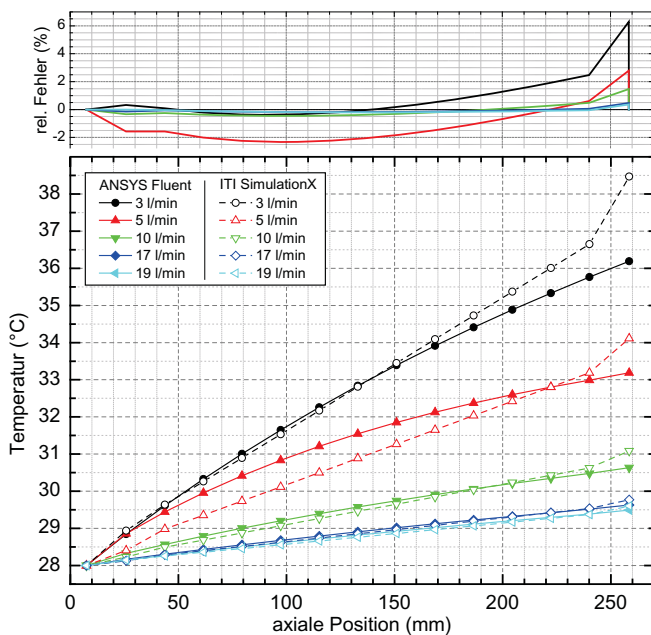
CFD-Simulation mit ANSYS Fluent



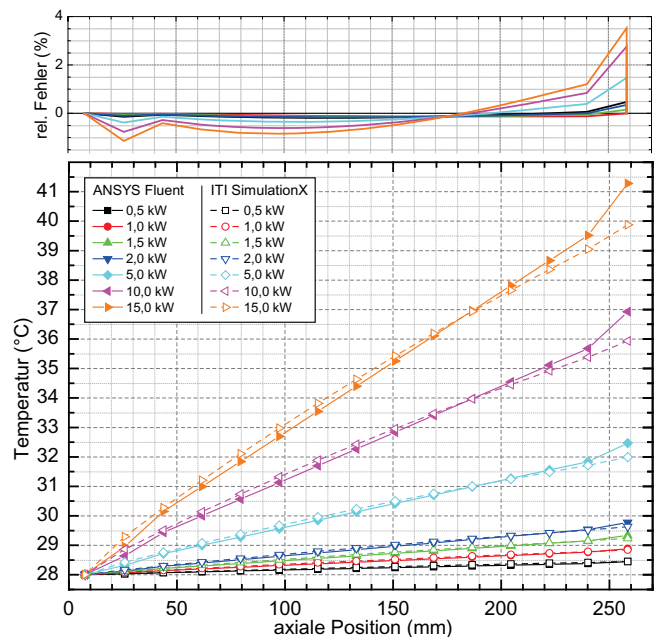
Transient Konvektion Wärmeleitung Viskose Reibung Energiequellen Festkörperbewegung

Modellierungsergebnisse

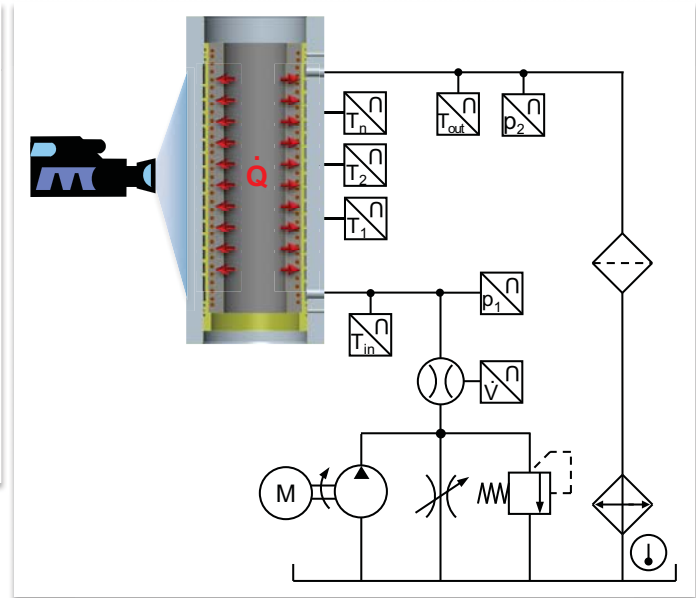
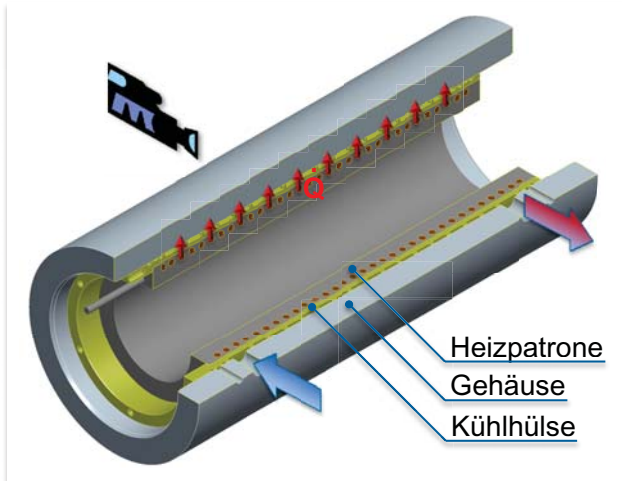
- Konstante Heizleistung (2,0 kW)



- Konstanter Volumenstrom (17 l/min)



Prüfstands-aufbau Motorspindel (Kühlhülse)

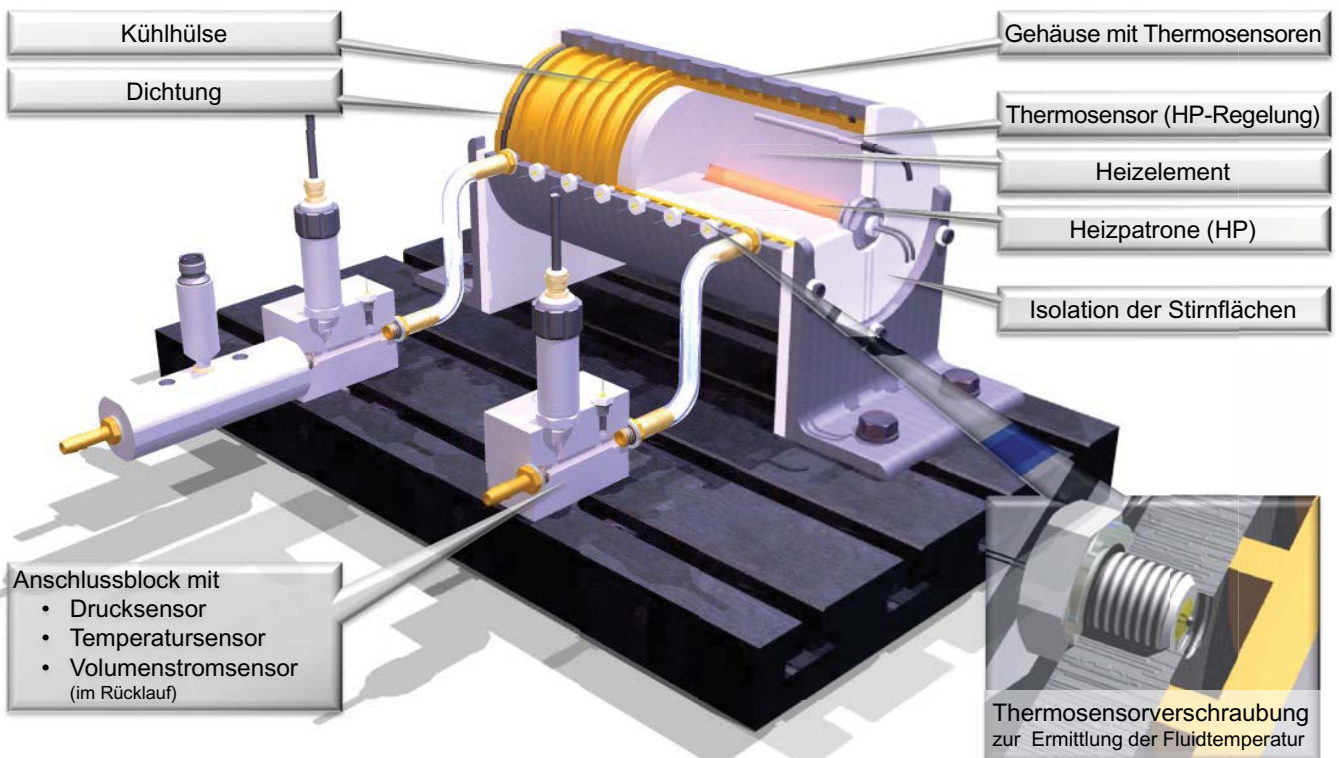


Messgrößen

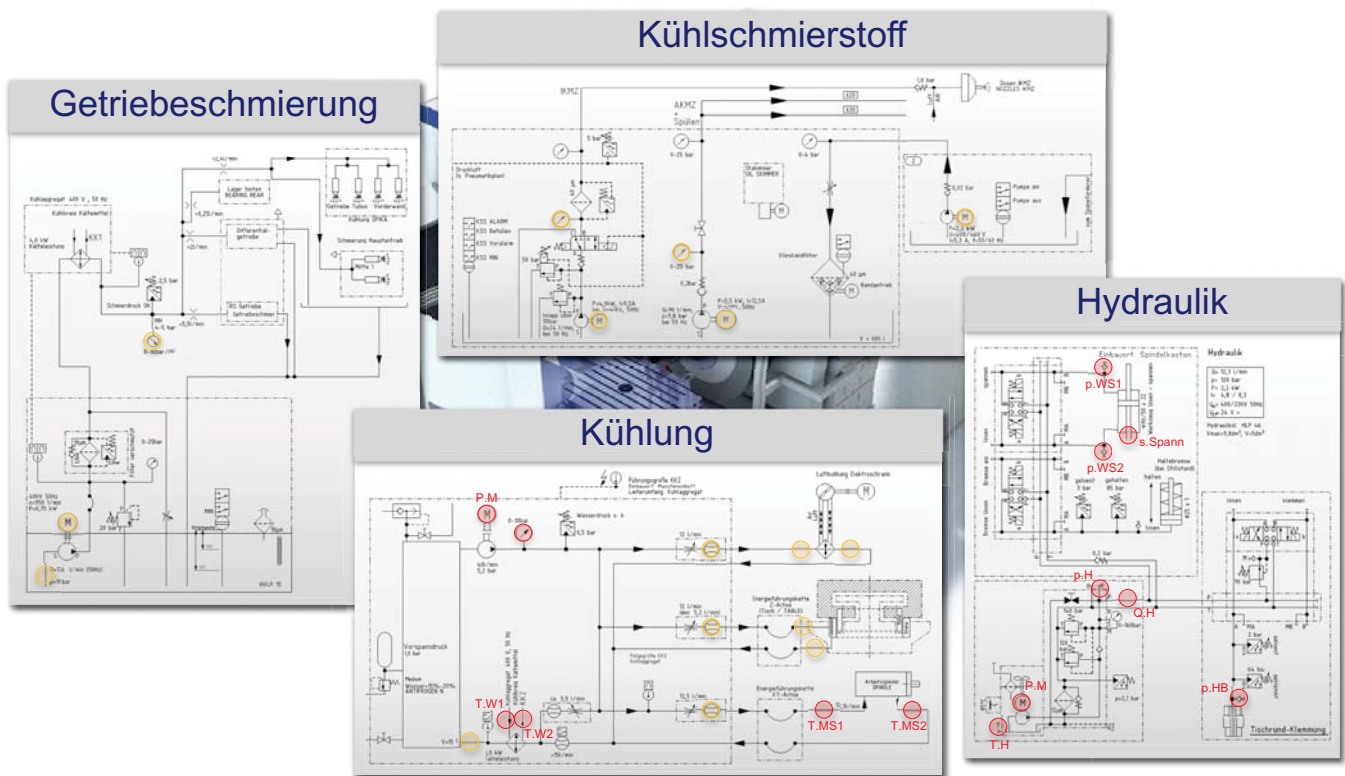
- Eingang: Fluidtemperatur T_{in} ,
Druck p_1 ,
Volumenstrom \dot{V}
- Kühlhülse: Fluidtemperaturen T_i ($i = 1 \dots n$)
- Ausgang: Fluidtemperatur T_{out} ,
Druck p_2

- ### Stellgrößen
- Drosselvolumenstrom $\dot{V}_{Dr} \Rightarrow \dot{V}$
 - Kühlertemperatur $T_{Kühl} \Rightarrow T_{in}$
 - Heizleistung $\dot{Q} \Rightarrow T_i, T_{out}$

Versuchsstand Motorspindel/Kühlhülse



Maschinenanalyse



Maschinenanalyse

Warmlauf

- Inbetriebnahme der Maschine
- Datenerfassung bis zum Erreichen eines quasistationären Zustands der fluidischen Systeme

Einrichtprozess

- Werkzeug-, Werkstückwechsel
- CNC-Programmierung
- Probelauf ohne Zerspanung
- Not-Aus

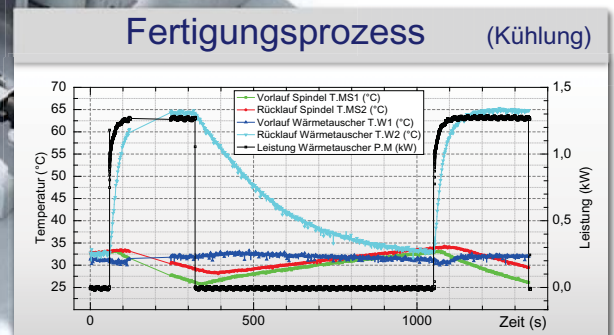
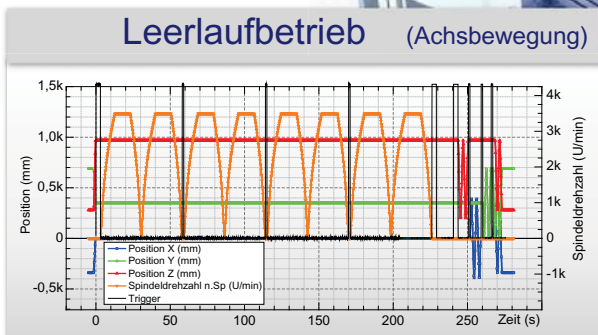
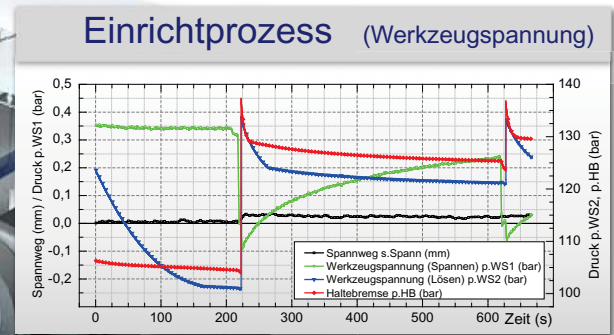
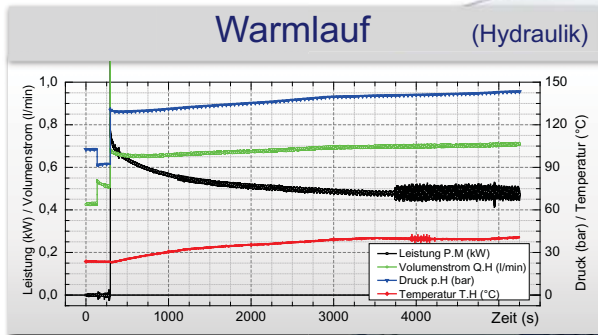
Leerlaufbetrieb

- 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

Maschinenanalyse



Fazit

- Modellierung der Stator Kühnhülse mittels konzentrierten (netzwerkbasierter Simulation) und verteilten (numerischer Simulation) Parametern
- Gute Übereinstimmung beider Simulationsstrategien bei Variation des Wärmeeintrags und der Strömungsgeschwindigkeit
- Maschinenanalyse des Fräsbearbeitungszentrums DBF 630

Forschungsbedarf

- Validierung der Simulationsmodelle mit experimentellen Daten
- Untersuchung des thermischen Verhaltens von Motorspindeln im realen Einsatz und Abgleich mit den Simulationsergebnissen
- Überprüfung der Anwendbarkeit der erstellten Simulationsmodelle für unterschiedliche Konstruktionsvarianten von Stator Kühnhülsen (Variation geometrischer Abmessungen, Variation der Strömungsführung)
- Experimentelle Untersuchung des thermofluidischen Verhaltens einer weiteren Werkzeugmaschine als zusätzliche Vergleichsbasis

OPTIMALE VERSUCHSPLANUNG FÜR DIE EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG VON KENNZAHLEN DER WÄRMEÜBERTRAGUNG AN FUGENKONTAKTEN

*R. Herzog, T. Etling; Professur Numerische Mathematik (Partielle Differentialgleichungen), TU Chemnitz
S. Vieler, R. Kneer; Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung, RWTH Aachen*

In Projekt B02 werden Grundlagenuntersuchungen zur Wärmeübertragung an Fugenkontakten zwischen verschiedenen Materialien durchgeführt. Die Identifikation des unbekanntes Wärmeübergangskoeffizienten gelingt dabei mit Hilfe von Methoden der Parameteridentifikation. Dafür wird pro Versuch eine umfangreiche Temperaturmessreihe aus Wärmebildaufnahmen genutzt.

Unvermeidlich sind jedoch die Wärmebildaufnahmen messfehlerbehaftet. Diese Messfehler wirken sich auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der identifizierten Parameter aus. Mit Hilfe klassischer statistischer Verfahren kann zunächst die Zuverlässigkeit der Identifikation auf der Basis von Konfidenzgebieten beurteilt werden. Eine unzureichende Genauigkeit kann durch Mehrfachversuche verbessert werden. Dieses Vorgehen ist jedoch aufwendig, da beispielsweise für eine Halbierung der Unsicherheit eine Vervierfachung der Versuchsanzahl erforderlich ist.

Wesentlich bessere Ergebnisse gegenüber der Wiederholung von Versuchen verspricht die optimale Versuchsplanung. Hierbei werden die Bedingungen des Versuchs derart angepasst, dass die (weiterhin fehlerbehafteten) Messwerte im Sinne eines geeigneten Maßes maximalen Informationsgehalt besitzen.

Insbesondere werden so Versuche nicht wiederholt, sondern komplementär zu bereits durchgeführten Versuchen geplant.

Im Vortrag wird das Vorgehen am Beispiel der Identifikation des Wärmeübergangskoeffizienten an einem Fugenkontakt des Versuchsstandes aus Projekt B02 vorgestellt. Die Aufgabe der optimalen Versuchsplanung wird als Optimierungsaufgabe formuliert und gelöst. Als Versuchsbedingungen sind hierbei die Anfangstemperaturen der beiden Probekörper. Gleichzeitig wird aus der Vielzahl der Daten der zum Versuch gehörenden Temperaturmessreihe eine kleine Auswahl relevanter Daten ausgewählt, was die zu verarbeitende Datenmenge bei der Parameteridentifikation erheblich reduziert.

Kontakt:

Prof. Dr. Roland Herzog

Professur Numerische Mathematik (Partielle Differentialgleichungen)

TU Chemnitz

09107 Chemnitz

Tel.: 0371 531 22530

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

2. Kolloquium des SFB/Transregio 96
25. Oktober 2012

Optimale Versuchsplanung für die experimentelle Ermittlung von Kennwerten der Wärmeübertragung an Fugenkontakten

T. Etling¹, R. Herzog¹, R. Kneer², S. Vieler²

¹Professur Numerische Mathematik (Partielle Dgl.), TU Chemnitz (B05)

²Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung, RWTH Aachen (B02)

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

1/16

Gliederung

- 1 Aufgaben der Parameteridentifikation
- 2 Statistische Analyse der Parameter
- 3 Optimale Versuchsplanung

Versuchsstand Lehrstuhl WSA, RWTH Aachen

- **Ziel:** experimentelle Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α an Fugenkontakten in Abhängigkeit des Anpressdrucks
- mittels Thermokamera beobachtbar: Temperaturverlauf in der Nähe der Kontaktstelle
- Bestimmung von α über ein Identifikationsproblem (inverses Problem)



[Fieberg, Kneer (2007)]

Mathematisches Modell: 1D-Wärmeleitung

$$\varrho_1 c_{p,1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \Delta T_1 \quad (\text{Probe 1})$$



Mathematisches Modell: 1D-Wärmeleitung

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = 0 \quad (\text{adiabat})$$

$$\varrho_1 c_{p,1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \Delta T_1 \quad (\text{Probe 1})$$



Mathematisches Modell: 1D-Wärmeleitung

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = 0 \quad (\text{adiabat})$$

$$\varrho_1 c_{p,1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \Delta T_1 \quad (\text{Probe 1})$$

Kontaktwärmestrom

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \alpha (T_2 - T_1)$$



Mathematisches Modell: 1D-Wärmeleitung

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = 0 \quad (\text{adiabat})$$

$$\varrho_1 c_{p,1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \Delta T_1 \quad (\text{Probe 1})$$

Kontaktwärmestrom

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \alpha (T_2 - T_1)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} = \alpha (T_1 - T_2)$$

$$\varrho_2 c_{p,2} \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \Delta T_2 \quad (\text{Probe 2})$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} = 0 \quad (\text{adiabat})$$



Mathematisches Modell: 1D-Wärmeleitung

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = 0 \quad (\text{adiabat})$$

$$\varrho_1 c_{p,1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \Delta T_1 \quad (\text{Probe 1})$$

Kontaktwärmestrom

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \alpha (T_2 - T_1)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} = \alpha (T_1 - T_2)$$

$$\varrho_2 c_{p,2} \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \Delta T_2 \quad (\text{Probe 2})$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} = 0 \quad (\text{adiabat})$$

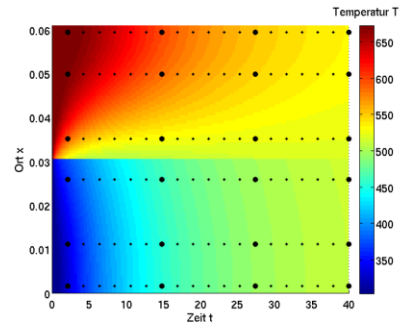


$$T_1(\cdot, 0) = T_{1,0}$$

$$T_2(\cdot, 0) = T_{2,0}$$

Identifikationsaufgabe

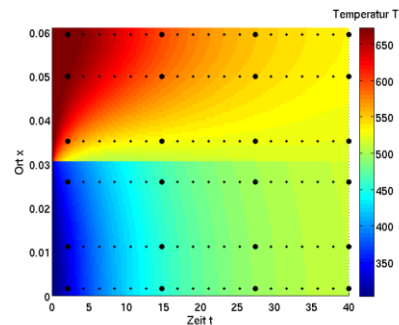
Residuum $r_{i,j}(\alpha) = \underbrace{T(x_i, t_j; \alpha)}_{\text{Modell}} - \underbrace{\eta_{i,j}}_{\text{Messwert}}$



[Fieberg, Kneer (2007); Etling (2012)]

Identifikationsaufgabe

Residuum $r_{i,j}(\alpha) = \underbrace{T(x_i, t_j; \alpha)}_{\text{Modell}} - \underbrace{\eta_{i,j}}_{\text{Messwert}}$



Kleinste-Quadrate-Aufgabe

$$\min_{\alpha \geq 0} \frac{1}{2} \sum_{i,j} r_{i,j}(\alpha)^2$$

[Fieberg, Kneer (2007); Etling (2012)]

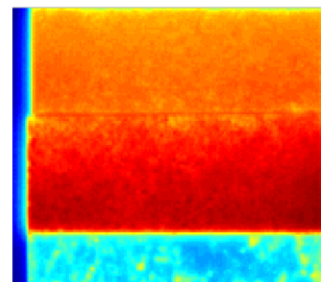
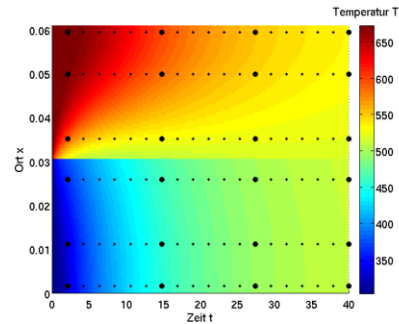
Identifikationsaufgabe

Residuum $r_{i,j}(\alpha) = \underbrace{T(x_i, t_j; \alpha)}_{\text{Modell}} - \underbrace{\eta_{i,j}}_{\text{Messwert}}$

Kleinste-Quadrate-Aufgabe

$$\min_{\alpha \geq 0} \frac{1}{2} \sum_{i,j} r_{i,j}(\alpha)^2$$

Praxis (typische Kameraaufnahme):



[Fieberg, Kneer (2007); Etling (2012)]

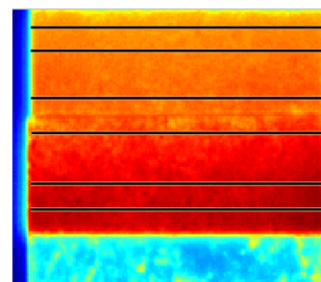
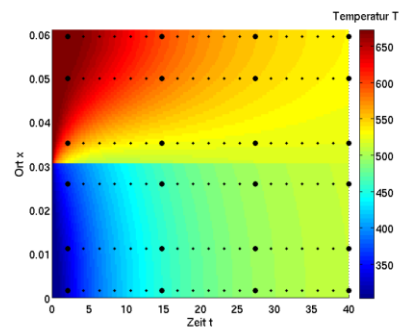
Identifikationsaufgabe

Residuum $r_{i,j}(\alpha) = \underbrace{T(x_i, t_j; \alpha)}_{\text{Modell}} - \underbrace{\eta_{i,j}}_{\text{Messwert}}$

Kleinste-Quadrate-Aufgabe

$$\min_{\alpha \geq 0} \frac{1}{2} \sum_{i,j} r_{i,j}(\alpha)^2$$

Praxis (typische Kameraaufnahme):
horizontale Mittelung der Temperatur



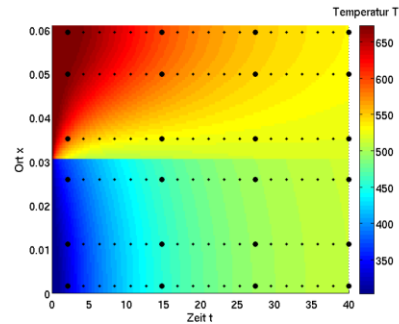
[Fieberg, Kneer (2007); Etling (2012)]

Beispiel mit simulierten Messdaten

Probe 1: Eisen mit $T_{1,0} = 673K$
 $\lambda_1 = 80 \frac{W}{mK}$, $\rho_1 c_{p,1} = 3\,571 \frac{kJ}{m^3K}$

$$\alpha = 8\,000 \frac{W}{m^2K}$$

Probe 2: Silber mit $T_{2,0} = 303K$
 $\lambda_2 = 430 \frac{W}{mK}$, $\rho_2 c_{p,2} = 2\,468 \frac{kJ}{m^3K}$



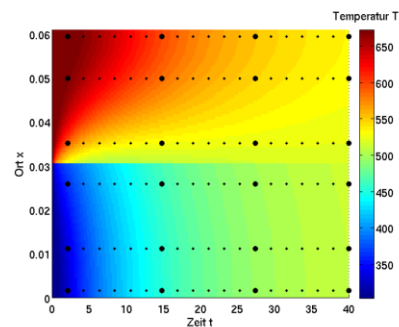
#	α
1	7 829

Beispiel mit simulierten Messdaten

Probe 1: Eisen mit $T_{1,0} = 673K$
 $\lambda_1 = 80 \frac{W}{mK}$, $\rho_1 c_{p,1} = 3\,571 \frac{kJ}{m^3K}$

$$\alpha = 8\,000 \frac{W}{m^2K}$$

Probe 2: Silber mit $T_{2,0} = 303K$
 $\lambda_2 = 430 \frac{W}{mK}$, $\rho_2 c_{p,2} = 2\,468 \frac{kJ}{m^3K}$



#	α
1	7 829
2	7 876
3	7 889
4	7 961
5	7 978

Gliederung

- 1 Aufgaben der Parameteridentifikation
- 2 Statistische Analyse der Parameter
- 3 Optimale Versuchsplanung

Auswirkungen der Messfehler

- **Messfehler** (thermisches Rauschen, Kalibrierung, Lackierung) und **Modellfehler** (Phase des Zusammenfahrens des Proben, nicht perfekte Isolierung) verursachen Ungenauigkeiten im identifizierten Parameter α
- Quantifizierung des **Messfehler**einflusses mit Hilfe von **Konfidenzintervallen** (aus statist. Verteilung der Messfehler)

Auswirkungen der Messfehler

- **Messfehler** (thermisches Rauschen, Kalibrierung, Lackierung) und **Modellfehler** (Phase des Zusammenfahrens des Proben, nicht perfekte Isolierung) verursachen Ungenauigkeiten im identifizierten Parameter α
- Quantifizierung des **Messfehler**einflusses mit Hilfe von **Konfidenzintervallen** (aus statist. Verteilung der Messfehler)

#	α	95%-Intervall
1	7 829	± 146

Auswirkungen der Messfehler

- **Messfehler** (thermisches Rauschen, Kalibrierung, Lackierung) und **Modellfehler** (Phase des Zusammenfahrens des Proben, nicht perfekte Isolierung) verursachen Ungenauigkeiten im identifizierten Parameter α
- Quantifizierung des **Messfehler**einflusses mit Hilfe von **Konfidenzintervallen** (aus statist. Verteilung der Messfehler)

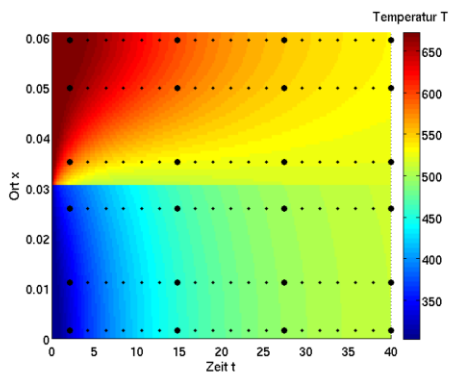
#	α	95%-Intervall
1	7 829	± 146
2	7 876	± 104
3	7 889	± 83
4	7 961	± 79
5	7 978	± 65

Wiederholung bringt $\frac{1}{\sqrt{N}}$

Gliederung

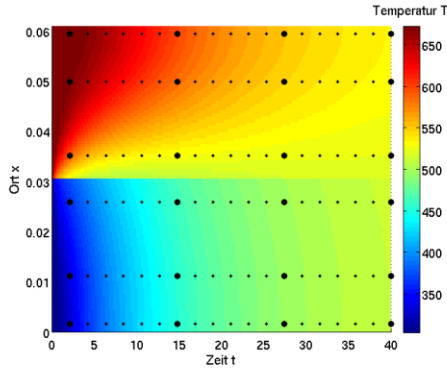
- 1 Aufgaben der Parameteridentifikation
- 2 Statistische Analyse der Parameter
- 3 Optimale Versuchsplanung

Motivation der optimalen Versuchsplanung

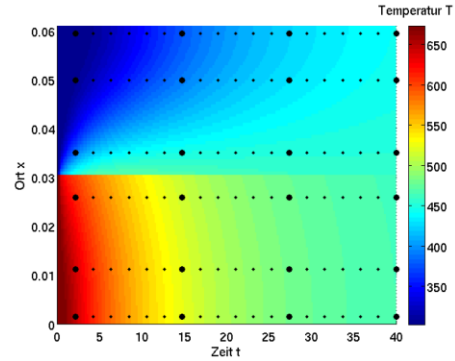


#	α	95%-Intervall
1	7 829	± 146
2	7 876	± 104
3	7 889	± 83
4	7 961	± 79
5	7 978	± 65

Motivation der optimalen Versuchsplanung

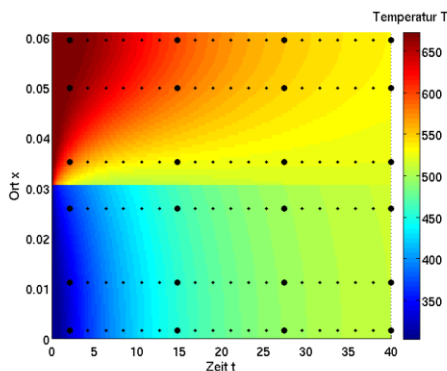


#	α	95%-Intervall
1	7 829	± 146
2	7 876	± 104
3	7 889	± 83
4	7 961	± 79
5	7 978	± 65

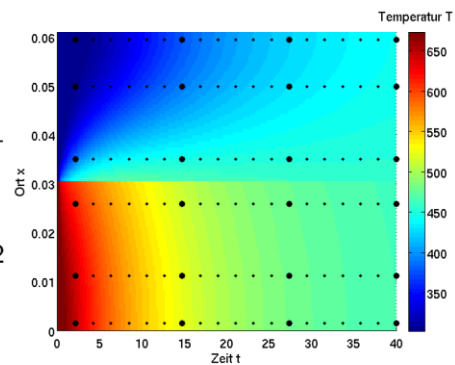


#	α	95%-Intervall
1	8 030	± 158
2	8 034	± 113
3	8 019	± 92
4	8 018	± 71
5	8 020	± 70

Motivation der optimalen Versuchsplanung



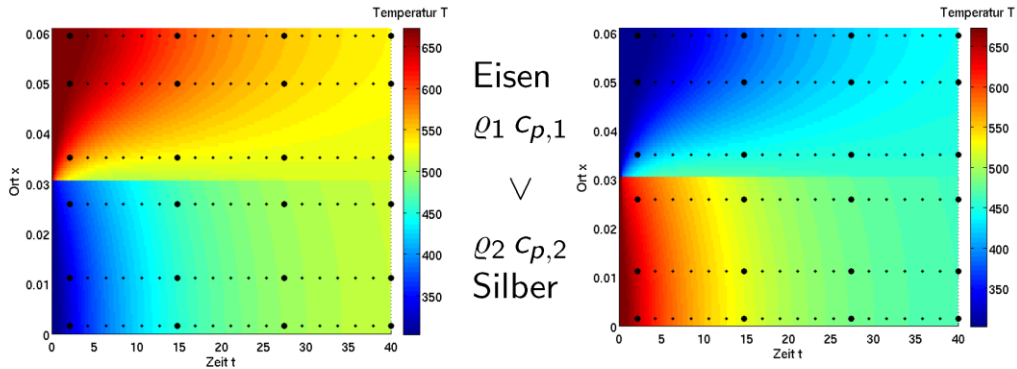
Eisen
 $\varrho_1 c_{p,1}$
 \vee
 $\varrho_2 c_{p,2}$
 Silber



#	α	95%-Intervall
1	7 829	± 146
2	7 876	± 104
3	7 889	± 83
4	7 961	± 79
5	7 978	± 65

#	α	95%-Intervall
1	8 030	± 158
2	8 034	± 113
3	8 019	± 92
4	8 018	± 71
5	8 020	± 70

Motivation der optimalen Versuchsplanung



Versuchsplanungsgrößen

- Anfangstemperaturen $T_{1,0}$ und $T_{2,0}$ der Proben
- Auswahl der Messlinien • (x_i, t_j) aus Thermografieaufnahmen

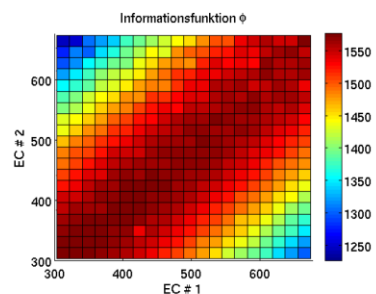
Formulierung als Optimierungsaufgabe

Variation der experimentellen Bedingungen zur Verkleinerung des Konfidenzintervalles für α :

$$\text{Minimiere } \phi\left(\underbrace{[J(T_0)^T \text{diag}(w) J(T_0)]^{-1}}_{\text{Kovarianzmatrix } C}\right)$$

unter $\sum w_i = W$

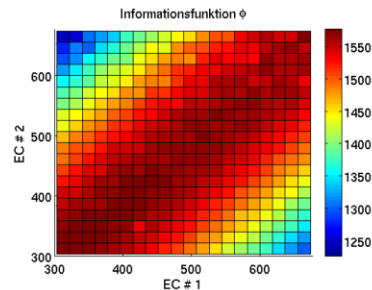
und $w_i \in \{0, 1\}, \quad 303 \leq T_0 \leq 673$



Formulierung als Optimierungsaufgabe

Variation der experimentellen Bedingungen zur Verkleinerung des Konfidenzintervalles für α :

$$\begin{aligned} &\text{Minimiere } \phi\left(\underbrace{[J(T_0)^T \text{diag}(w) J(T_0)]^{-1}}_{\text{Kovarianzmatrix } C}\right) \\ &\text{unter } \sum w_i = W \\ &\text{und } w_i \in \{0, 1\}, \quad 303 \leq T_0 \leq 673 \end{aligned}$$



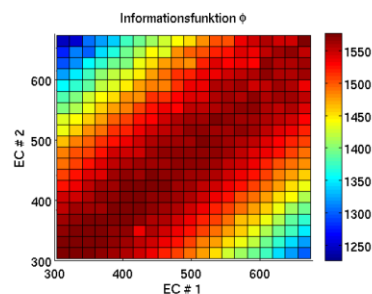
Praktische Realisierung:

- 1 Experiment durchführen, Parameter identifizieren

Formulierung als Optimierungsaufgabe

Variation der experimentellen Bedingungen zur Verkleinerung des Konfidenzintervalles für α :

$$\begin{aligned} &\text{Minimiere } \phi\left(\underbrace{[J(T_0)^T \text{diag}(w) J(T_0)]^{-1}}_{\text{Kovarianzmatrix } C}\right) \\ &\text{unter } \sum w_i = W \\ &\text{und } w_i \in \{0, 1\}, \quad 303 \leq T_0 \leq 673 \end{aligned}$$



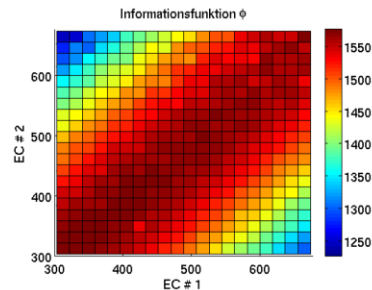
Praktische Realisierung:

- 1 Experiment durchführen, Parameter identifizieren
- 2 nächstes Experiment planen (Optimierungsaufgabe lösen)

Formulierung als Optimierungsaufgabe

Variation der experimentellen Bedingungen zur Verkleinerung des Konfidenzintervalles für α :

$$\begin{aligned} &\text{Minimiere } \phi\left(\underbrace{[J(T_0)^T \text{diag}(w) J(T_0)]^{-1}}_{\text{Kovarianzmatrix } C}\right) \\ &\text{unter } \sum w_i = W \\ &\text{und } w_i \in \{0, 1\}, \quad 303 \leq T_0 \leq 673 \end{aligned}$$



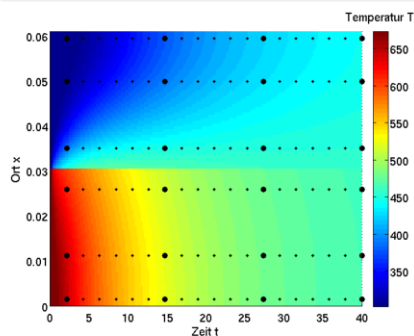
Praktische Realisierung:

- 1 Experiment durchführen, Parameter identifizieren
- 2 nächstes Experiment planen (Optimierungsaufgabe lösen)
- 3 Experiment durchführen, Parameter identifizieren
- 4 ...

Ergebnisse der Versuchsplanung

Reine Wiederholung

#	α	95%-Intervall
1	8 030	± 158
2	8 034	± 113
3	8 019	± 92
4	8 018	± 71
5	8 020	± 70



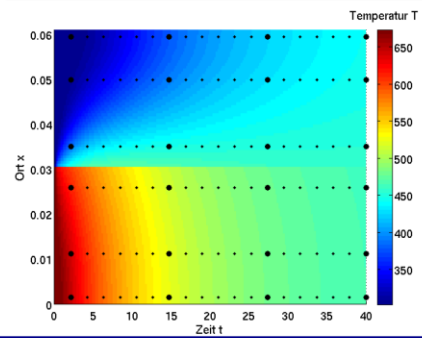
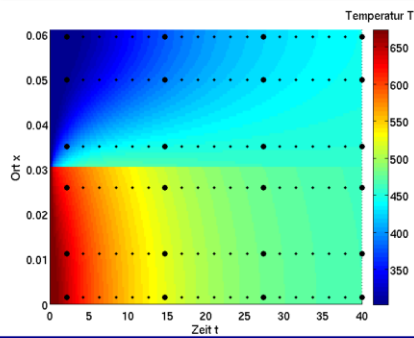
Ergebnisse der Versuchsplanung

Reine Wiederholung

#	α	95%-Intervall
1	8 030	± 158
2	8 034	± 113
3	8 019	± 92
4	8 018	± 71
5	8 020	± 70

Optimales Design

#	α	95%-Intervall
1	7 956	± 158



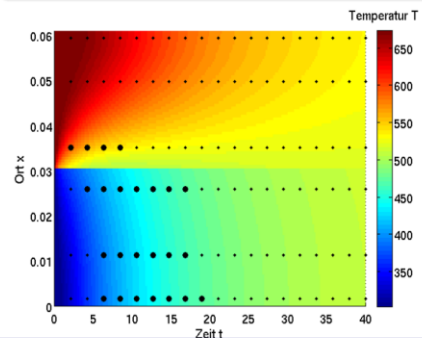
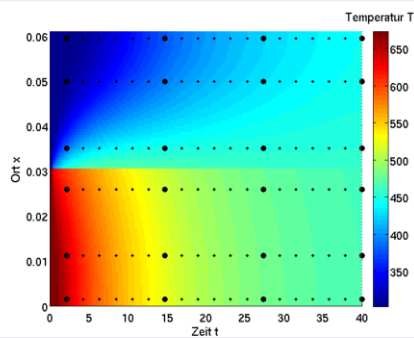
Ergebnisse der Versuchsplanung

Reine Wiederholung

#	α	95%-Intervall
1	8 030	± 158
2	8 034	± 113
3	8 019	± 92
4	8 018	± 71
5	8 020	± 70

Optimales Design

#	α	95%-Intervall
1	7 956	± 158
2	7 979	± 77
3	8 044	± 64
4	8 023	± 49
5	8 011	± 48



Erweiterung auf 3 Parameter: $\alpha, \lambda_1, \lambda_2$

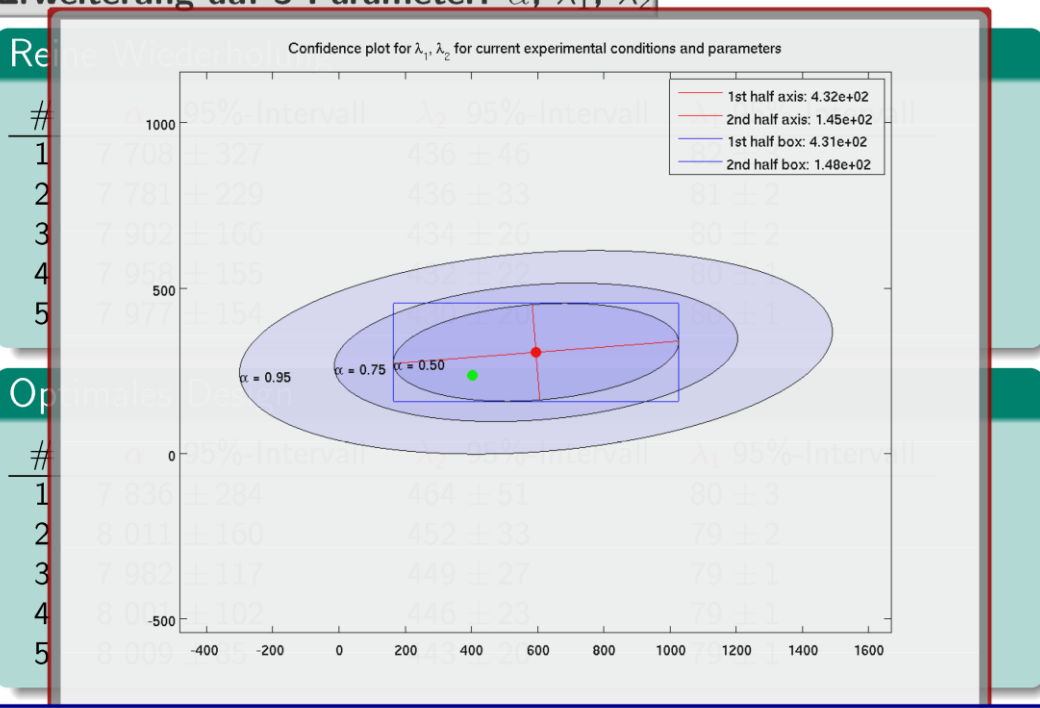
Reine Wiederholung

#	α 95%-Intervall	λ_2 95%-Intervall	λ_1 95%-Intervall
1	7 708 ± 327	436 ± 46	82 ± 3
2	7 781 ± 229	436 ± 33	81 ± 2
3	7 902 ± 166	434 ± 26	80 ± 2
4	7 958 ± 155	432 ± 22	80 ± 1
5	7 977 ± 154	430 ± 20	80 ± 1

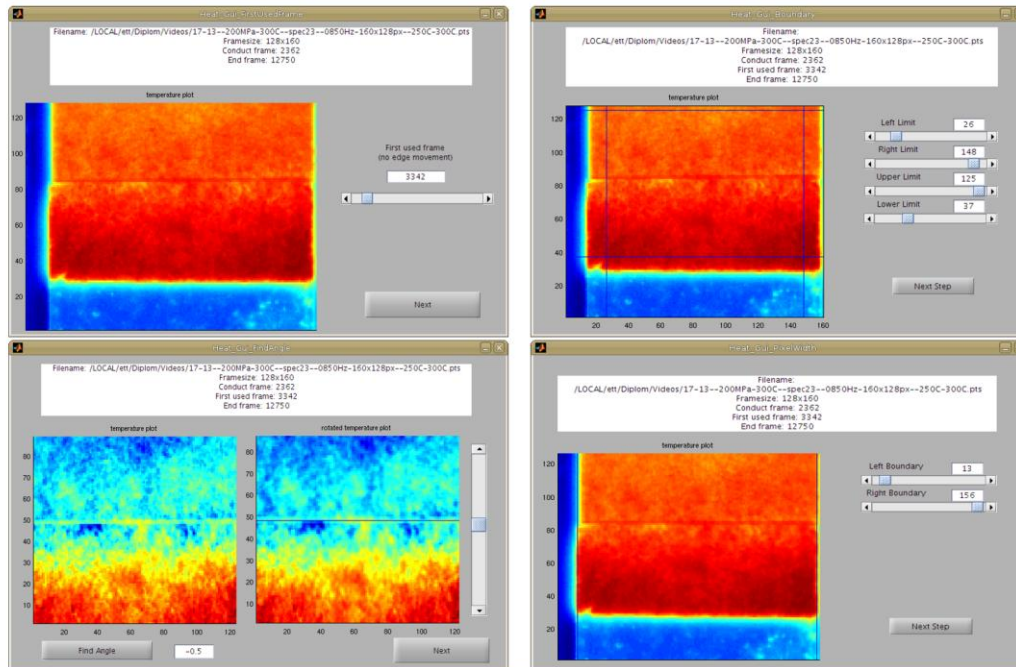
Optimales Design

#	α 95%-Intervall	λ_2 95%-Intervall	λ_1 95%-Intervall
1	7 836 ± 284	464 ± 51	80 ± 3
2	8 011 ± 160	452 ± 33	79 ± 2
3	7 982 ± 117	449 ± 27	79 ± 1
4	8 001 ± 102	446 ± 23	79 ± 1
5	8 009 ± 85	443 ± 20	79 ± 1

Erweiterung auf 3 Parameter: $\alpha, \lambda_1, \lambda_2$



Matlab-GUI (T. Etling)



Zusammenfassung

- optimale **Versuchsplanung** erlaubt bestmögliche Nutzung experimenteller Ressourcen . . .
- . . . im Hinblick auf die Genauigkeit (**Konfidenz**) der identifizierten Parameter
- ⇔ bestmögliche Wahl der **Anfangstemperaturen** $T_{1,0}$, $T_{2,0}$. . .
- . . . und Auswahl (weniger) **relevanter Datensätze** aus den Aufnahmen der Thermokamera (Problemreduktion)

Ausblick

- Anwendung auf reale Versuchsdaten aus Teilprojekt B02
- Erweiterung auf temperaturabhängige Varianzen

Referenzen



T. Etling.

Optimale Versuchsplanung für die Bestimmung von Parametern bei Wärmeübergangsexperimenten.

Diploma thesis, Chemnitz University of Technology, Germany, 2012.



C. Fieberg and R. Kneer.

Bestimmung des Kontakt-Wärmeübergangskoeffizienten aus transienten Temperaturmessungen.

Chemie Ingenieur Technik, 79(1–2):97–102, 2007.

MODERNE TECHNIKEN ZUR SCHNELLEN UND HOCHAUFLÖSENDEN SIMULATION

A. Naumann, A. Voigt, 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. Auch hier wird eine geeignete rechte Seite der Gleichung für ein glattes Ersatzproblem gesucht. Eine formale Darstellung des Lösungsoperators mit der Exponentialabbildung wird zur iterativen Approximation der rechten Seite genutzt. Das glatte Ersatzproblem kann somit durch Standardzeitintegrationsverfahren mit einer großskaligen Schrittweite gelöst werden.

Eine weitere Aufgabenstellung ist die Simulation der konvektionsgetriebenen Wärmeaustauschprozesse im Maschineninnenraum. Die Kopplung der direkten Simulation mit Maschinenmodellen hat sich als zu aufwändig erwiesen. In Kooperation mit dem Teilprojekt A05 sollen daher entsprechende Ersatzmodelle entwickelt und validiert werden.

Kontakt

Andreas Naumann

TU Dresden, Institut für Wissenschaftliches Rechnen

01062 Dresden

Tel: 0351- 46342378

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

Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Moderne Techniken zur schnellen und hochauflösenden Simulation

S. Aland, A. Naumann, A. Voigt, J. Wensch

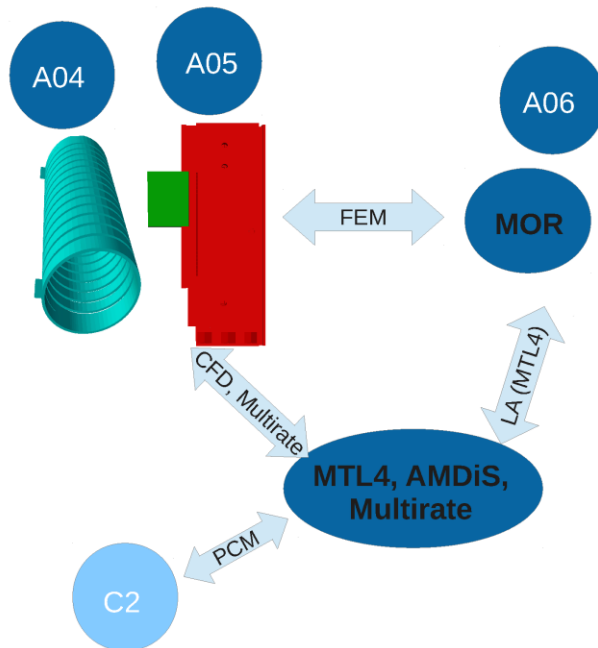
Institut für wiss. Rechnen, TU-Dresden

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

- 1 Einbindung in SFB-TR96
- 2 Wärmeleitung in gekoppelten Geometrien
- 3 Zeitintegration: Multirate
 - Stroboscopic averaging
 - Defect-correction
- 4 Innenraum-Modellierung
- 5 MTL4/MOR

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Einbindung in SFB-TR96



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

Ständer

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

PDE-System

Wärmeleitung:

$$\rho C_p T_t^j - \lambda_j \Delta T^j = \cancel{Q_j(T, t, \mathbf{x})}$$

$$\lambda_j \partial_n T^j = q_j(T, t)$$

- Quellen Q_j : Motoren,...
- Reibung und Wärmeaustausch:
 $q_j(T, t) = g(\mathbf{u}, t) + \sum_i \alpha_{ij}(T_i - T_j)$
- Verlagerungen ergeben sich aus prozessaktuellem Temperaturprofil
- FE-Diskretisierung $y_i(t) \approx T(t, \mathbf{x}_i)$ liefert ODE

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

$$y' = Ay + g_\epsilon(y, t, \dots)$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Stroboscopic averaging

- Ziel: Berechnung einer gemittelten Lösung \bar{Y}
- Ansatz: Mittelung/Approximation der ODE

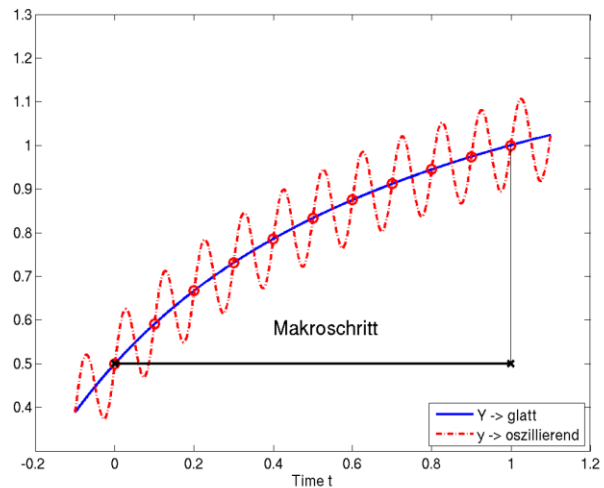
$$y' = f(y, t/\epsilon)$$

- Heterogenous Multiscale: suche nach analytischer Darstellung
 $f_\epsilon = F_0 + F_1\epsilon + F_2\epsilon^2 + \dots$
- Im allgemeinen kompliziert bis unmöglich
- Stroboscopic: Suche eine Approximation für $f(y, t/\epsilon)$, welche eine glatte (gemittelte) Lösung liefert, die in stroboskopischen Punkten $t_0 + n\epsilon$ mit der stark oszillierenden Lösung übereinstimmt

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Umsetzung

- Lösung der ODE mit Einschrittverfahren
- → Benötige Funktionswerte $f(y, t_n + c_i H)$
- Approximiere $f(y_i, t_n + c_i H)$ durch Mikrosimulationen und Differenzenquotienten:



$$f(y_i, t_n + c_i H) \approx \frac{y(\epsilon; y_i) - y_i}{\epsilon}$$

$$f(y_i, t_n + c_i H) \approx \frac{-y(2\epsilon; y_i) + 4y(\epsilon; y_i) - 3y_i}{2\epsilon}$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Ergebnis

- Bei hohen Frequenzen: Gute Übereinstimmung mit genauer Lösung
- Aufwändig, da tw. viele Mikrosimulationen notwendig

Ständer

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Defect-correction

- In Analogie zum stroboscopic averaging: suche adäquate Approximation an f
- Maßstab: Einfache Mittelung \rightarrow konstante RHS \rightarrow schnelle Simulation möglich
- Betrachte

$$y'(t) = Ay(t) + \bar{g} + g_\epsilon(t), \quad y(0) = y_0$$

- Idee: Approximiere Defekt $g_\epsilon(t)$ durch konstantes \tilde{g}

$$y'(t) = Ay(t) + \bar{g} + \tilde{g}$$

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

$$S(\epsilon, 0, \tilde{g}) = S(\epsilon, 0, g_\epsilon) \text{ linear in } \tilde{g}$$

$$\rightarrow y(t) = S(t, y_0, \cdot) \circ (\bar{g} + S(\epsilon, 0, \cdot)^{-1} \circ S(\epsilon, 0, g - \bar{g}))$$

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Umsetzung

- Zerlege Quellterm: $g = \bar{g} + g_\epsilon$
- Löse $S(\epsilon, 0, \tilde{g}) = S(\epsilon, 0, g_\epsilon)$
 $\Rightarrow A\tilde{g} = b \rightarrow$ GMRES (restarted)

```
b=solve(0,eps, y0=0;geps)
```

```
q(:,0)=b/norm(b)
```

```
while res > tol do
```

```
    solve(0,eps, y0=0;gtilde)
```

```
    Orthogonalisieren  $\rightarrow$  q(:, step+1)
```

```
    Berechne Residuum
```

```
    Aktualisiere gtilde
```

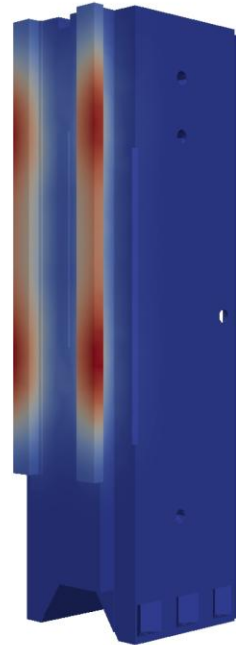
```
end while
```

- Löse Ersatzproblem $y_t = Ay + \bar{g} + \tilde{g}$ mit großen Zeitschritten

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Ergebnisse

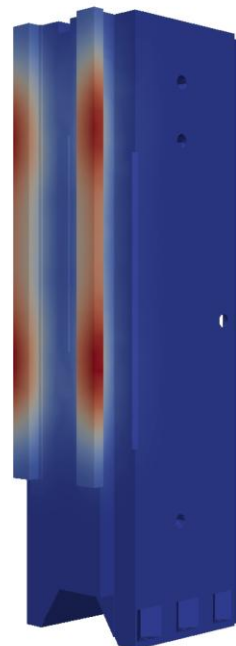
Methode	L2-Fehler	Zeit [s]
direkt	-	22.3
Mittelung	44.7e-4	2.5
Verb. Mittelung	2.3 e-4	2.7
Defekt Korr.	1.6 e-4	1.7
Verb. Def. Korr	0.5 e-4	1.8



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

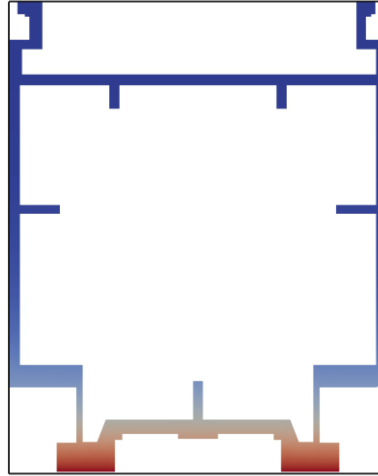
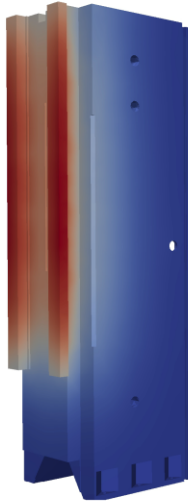
Ergebnisse

Methode	L2-Fehler	Zeit [s]
direkt	-	22.3
Mittelung	44.7e-4	2.5
Verb. Mittelung	2.3 e-4	2.7
Defekt Korr.	1.6 e-4	1.7
Verb. Def. Korr	0.5 e-4	1.8



SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Innenraum-Modellierung



- Reduzierung der Komplexität auf 2D-Geometrie
- Vorgabe der Temperaturprofile am Rand

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Innenraum-Modellierung

- Betrachte Luft als inkompressibles Fluid
- Annahme geringer Temperatur- und Dichteänderungen
 $\rightarrow \rho(T) = \rho_0 \frac{T_0}{T} \approx \rho_0 (2 - T/T_0)$
- Boussinesq-Approximation:

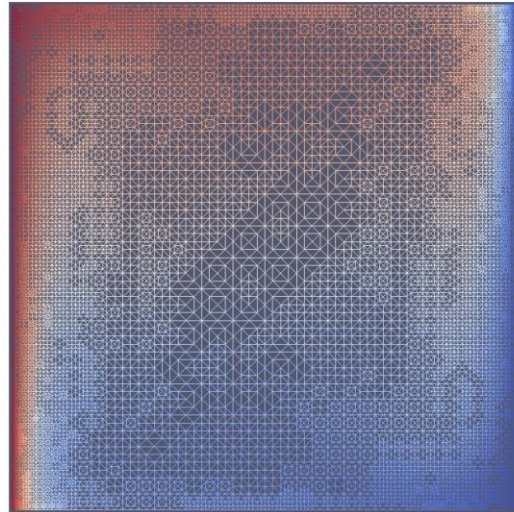
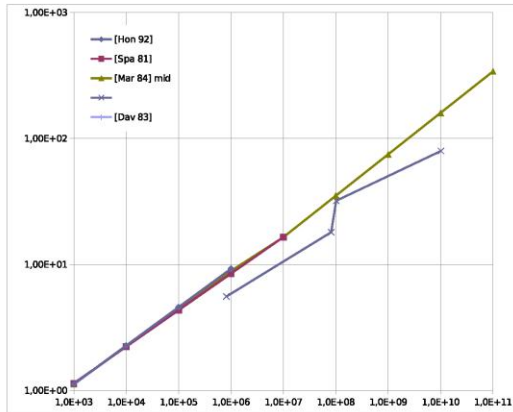
$$\rho_0 \mathbf{u}_t + \rho_0 \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \mu \Delta \mathbf{u} = - \nabla P + g \rho_0 \frac{T}{T_0} \mathbf{e}_z$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

- Charakteristische Kennzahl: Nusselt-Zahl ($\dot{Q}_{tot}/\dot{Q}_{leit}$)
- Teil I: Vergleich Nusselt aus CFD-Lösungen mit Literatur
- Teil II: Berechnung des Wärmeübergangs bei konkreter/komplexer Temperaturverteilung

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Innenraum, Vgl. Literatur



- Konfiguration: Konstante Temperaturen entlang des linken bzw. des rechten Randes
- Gute Übereinstimmung mit Literatur

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Ergebnisse, Innenraum

T1L20

T100L20

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Konfiguration: $\Delta T = 1K$, $L = 20cm$ • Stationäres Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil | <ul style="list-style-type: none"> • Konfiguration: $\Delta T = 100K$, $L = 20cm$ • Instationäres Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil |
|--|--|

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

LA/MTL4/MOR

- Gegenwärtige Algorithmenentwicklung: Matlab
- Problem: Abhängigkeit von einer Software
- Parallelisierung, Einsatz von HPC fraglich
- Übertragung nach C/C++: Fehleranfällig
- Optimierte Bibliotheken: LAPACK, aufwändige Fehlersuche
- Ziel: mathematische Notation in C++ analog zu Matlab
- → ursprüngliche Notation der Algorithmen
- → gesteigerte Wiedererkennbarkeit
- Plattform unabhängiger Code → HPC-System ATLAS

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

MTL4/MOR

template<typename **Matrix**>

void Ircf_srm(**Matrix**& A, **Matrix**& B, **Matrix**& C, **Matrix**& ZB, **Matrix**& ZC,
uint max_order, **Matrix**& Ar, **Matrix**& Br, **Matrix**& Cr)

{DECLARATIONS.....

boost::tie(S, V, D)= svd(TMP, tol); // [U0,S0,V0] = svd(ZC'*ZB,0);

Vector s0(diagonal(V)); //s0=diag(S0);

size_type ks(size(s0)), k0(ks); //ks=length(s0); k0=ks;

.....DECLARATIONS.....

Matrix VB(ZB*D[iall][irange(0,r)]); //VB = ZB*V0(:,1:r);

Matrix VC(ZC*S[iall][irange(0,r)]); //VC = ZC*U0(:,1:r);

Vector ones(r, 1.0), sigma_r(r, 0.0);

sigma_r= diagonal(V[irange(0,r)][irange(0,r)]); //sigma_r=diag(S0(1:r,1:r));

ones= 1/sigma_r; ones= sqrt(ones);

Matrix SB(VB*diagonal(ones)); //SB = VB*diag(ones(r,1)./sqrt(sigma_r));

Matrix SC(VC*diagonal(ones)); //SC = VC*diag(ones(r,1)./sqrt(sigma_r));

Ar= trans(SC)*(A*SB); //Ar = SC'*(A*SB);

Br= trans(SC)*B; //Br = SC'*B;

Cr= C*SB; //Cr = C*SB;

SFB/Transregio 96: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Ausblick

- Ausbau CFD in Kühlhülse mit TP A04
- Lösung der gekoppelten Wärmeleitungsgleichung mit diffuse Domain
- Fehleranalyse Defect-correction
- Weiterentwicklung MTL4: Ausdruckoptimierung

PARAMETERERHALTENDE MODELLORDNUNGS- REDUKTION FÜR DIE SIMULATION THERMO- ELASTISCHER PROBLEME AN WERKZEUGMASCHINEN

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

Im Vortrag wird ein Ansatz zur parametrischen Modellordnungsreduktion (MOR) auf Basis des balancierten Abschneidens (BT) dargestellt. Ziel der MOR ist es, ein reduziertes System zu generieren, welches eine gute Approximation des Ein- / Ausgangsverhalten des original Systems angibt.

Dazu wird zunächst eine Beschreibung eines parameterfreien, gewöhnlichen Differentialgleichungssystems mit konstanten Systemmatrizen (E, A, B, C) und der zugehörigen Übertragungsfunktion eingeführt. Die Güte der Approximation des reduzierten Systems bezüglich des vollen Systems kann anhand der Übertragungsfunktionen der jeweiligen Systeme gemessen werden. Zur Berechnung der für die Reduktion eines solchen Systems mittels BT benötigten Projektionsmatrizen ist es notwendig, die Gramschen des Systems als Lösungen der zugehörigen verallgemeinerten Lyapunovgleichungen zu bestimmen. Realisiert werden diese Berechnungen mit Hilfe der SR Methode (*Square-Root method*).

Darauf aufbauend wird die Anwendung dieser Reduktionstechnik auf LTI-Systeme mit parameterabhängigen Systemmatrizen ($E(p), A(p), B(p), C(p)$) diskutiert. Da die Berechnung eines reduzierten Systems für jeden Parameterwert sehr zeit- und speicheraufwändig ist, werden lediglich die Projektionsmatrizen für geeignete Parameterstellen bestimmt. Durch Zusammenfügen dieser Matrizen ergeben sich Projektionsmatrizen, welche im Weiteren zur Reduktion der Ausgangssysteme für alle Parameterwerte genutzt werden können. Eine weitere Effizienzsteigerung kann erreicht werden, indem die parameterabhängigen Systemmatrizen in eine parameteraffine Darstellung überführt werden (Extraktion der Parameterabhängigkeit aus den Matrizen). Dies erlaubt es, die reduzierten Systemmatrizen einmalig im Voraus der Simulation zu berechnen. Die Methode wird anhand des Maschinenständers einer konventionellen Fräsmaschine (Beispiel Teilprojekt A05) demonstriert. Für dieses spezielle Beispiel ist lediglich die Eingangsmatrix $B(p)$ vom Parameter p abhängig.

Der erzeugte relative Fehler der entsprechenden Übertragungsfunktionen ist für verschiedene Anzahlen der Parameterstützstellen dargestellt. Hervorzuheben ist dabei, dass bereits bei der Wahl einer einzigen Stützstelle ein maximaler relativer Fehler im einstelligen Prozentbereich erzeugt werden kann.

Kontakt:

Norman Lang

Technische Universität Chemnitz,

Fakultät für Mathematik,

Reichenhainerstr. 41, 09107 Chemnitz

Tel: +49 (0)371-531-39794

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

24. Oktober, 2012

Parametererhaltende Modellordnungsreduktion für die Simulation thermo-elastischer Probleme an Werkzeugmaschinen

Prof. Peter Benner, Norman Lang, Dr. Jens Saak

SFB/Transregio 96 2.Kolloquium

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Gliederung

- ① Modellordnungsreduktion (MOR)
 - Das System
 - Grundidee Modellordnungsreduktion
- ② Balanciertes Abschneiden (BT)
 - Gramsche Matrizen und Lyapunov Gleichungen
 - Realisierungen und Balancierung
 - Zusammenfassung und Implementierung im SR Algorithmus
 - Übertragungsfunktion und Fehlerschranke
- ③ Parametererhaltende Modellordnungsreduktion (PMOR)
 - Motivation
 - PMOR mittels BT
- ④ Numerische Ergebnisse
 - Ständer (TP A05)
- ⑤ Zusammenfassung und Ausblick

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Modellordnungsreduktion (MOR)

Das System

Wir betrachten das

lineare, zeitinvariante (LTI) System

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

mit

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

und

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

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Modellordnungsreduktion (MOR)

Das System

Wir betrachten das

lineare, zeitinvariante (LTI) System

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

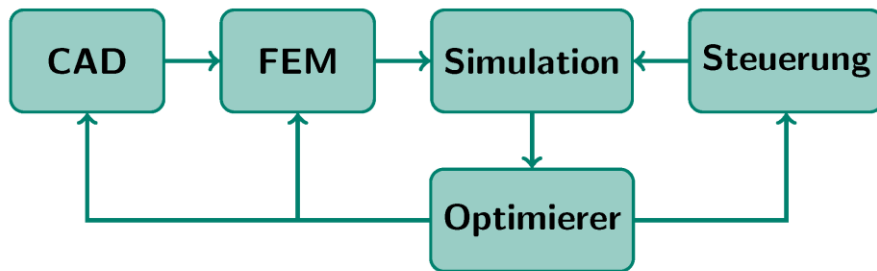
Im Kontext „FEM für die Wärmeleitung“:

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

Im Folgenden zunächst $E = I$ (sonst betrachte $\tilde{A} := E^{-1}A$, $\tilde{B} := E^{-1}B$).

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

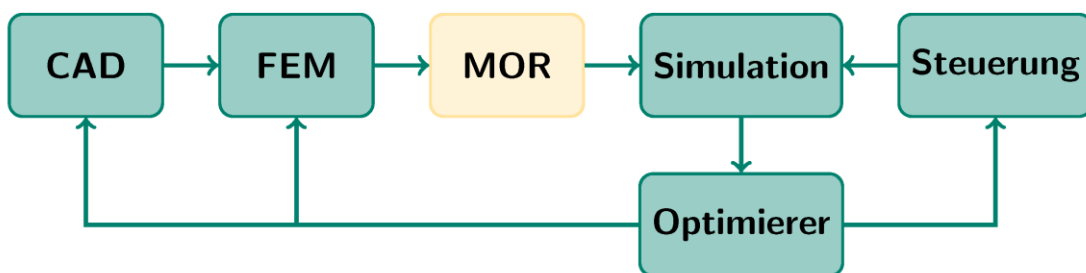
Modellordnungsreduktion (MOR)
Grundidee Modellordnungsreduktion



- Berechnung der Simulation auf Basis des **vollen** Systems für jedes neue CAD/FEM-Setup.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

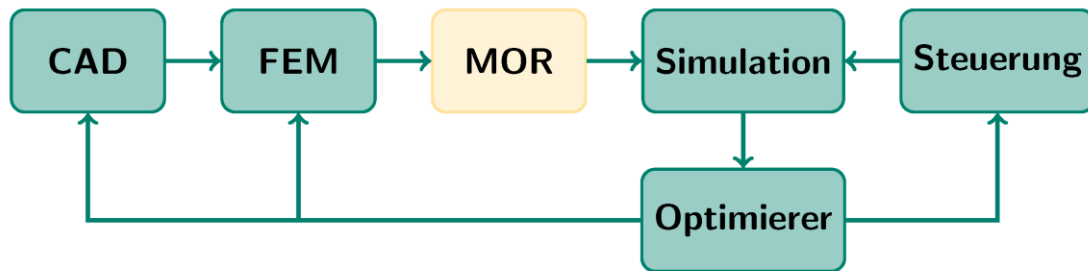
Modellordnungsreduktion (MOR)
Grundidee Modellordnungsreduktion



- Berechnung der Simulation auf Basis des **reduzierten** Systems.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Modellordnungsreduktion (MOR)
Grundidee Modellordnungsreduktion



- Berechnung der Simulation auf Basis des reduzierten Systems.
- ⇒ Reduktion des Rechenaufwandes und damit Beschleunigung der Simulation.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Modellordnungsreduktion (MOR)
Grundidee Modellordnungsreduktion

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

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

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Modellordnungsreduktion (MOR)

Grundidee Modellordnungsreduktion

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

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

Modellordnungsreduktion

Finde Projektionsmatrizen

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

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Modellordnungsreduktion (MOR)

Grundidee Modellordnungsreduktion

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

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

Modellordnungsreduktion

Finde Projektionsmatrizen

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

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

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Modellordnungsreduktion (MOR)

Grundidee Modellordnungsreduktion

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

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

Modellordnungsreduktion

Finde Projektionsmatrizen

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

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

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Modellordnungsreduktion (MOR)

Grundidee Modellordnungsreduktion

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

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

Modellordnungsreduktion

Finde Projektionsmatrizen

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

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

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

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Gramsche Matrizen und Lyapunov Gleichungen

Die unendlichen Erreichbarkeits- und Beobachtbarkeits-Gramschen zu Σ

$$P = \int_0^{\infty} e^{A\tau} B B^T e^{A^T \tau} d\tau \quad \text{und} \quad Q = \int_0^{\infty} e^{A\tau} C^T C e^{A^T \tau} d\tau$$

werden abgeleitet aus

- Eingangs-zu-Zustands Abbildung: $\xi(t) = e^{At} B$ und
- Zustand-zu-Ausgangs Abbildung: $\eta(t) = C e^{At}$.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Gramsche Matrizen und Lyapunov Gleichungen

Die unendlichen Erreichbarkeits- und Beobachtbarkeits-Gramschen zu Σ

$$P = \int_0^{\infty} e^{A\tau} B B^T e^{A^T \tau} d\tau \quad \text{und} \quad Q = \int_0^{\infty} e^{A\tau} C^T C e^{A^T \tau} d\tau$$

erfüllen

$$\text{Bild}(P) = \text{Erreichbarkeitsmenge zu } (A, B)$$

und

$$\text{Bild}(Q) = \text{Rekonstruierbarkeitsmenge zu } (C, A).$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Gramsche Matrizen und Lyapunov Gleichungen

Die unendlichen Erreichbarkeits- und Beobachtbarkeits-Gramschen zu Σ

$$P = \int_0^{\infty} e^{A\tau} B B^T e^{A^T \tau} d\tau \quad \text{und} \quad Q = \int_0^{\infty} e^{A\tau} C^T C e^{A^T \tau} d\tau$$

- minimal nötige Eingangsenergie, um Σ asymptotisch von 0 nach x_e zu bringen ist $x_e^T P^{-1} x_e$.
- die maximale von x_o erzeugte Ausgangsenergie auf einem unendlichen Beobachtungshorizont ist $x_o^T Q x_o$.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Gramsche Matrizen und Lyapunov Gleichungen

Die unendlichen Erreichbarkeits- und Beobachtbarkeits-Gramschen zu Σ

$$P = \int_0^{\infty} e^{A\tau} B B^T e^{A^T \tau} d\tau \quad \text{und} \quad Q = \int_0^{\infty} e^{A\tau} C^T C e^{A^T \tau} d\tau$$

lösen die zwei Lyapunovgleichungen:

$$AP + PA^T = -BB^T,$$

$$A^T Q + QA = -C^T C.$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Gramsche Matrizen und Lyapunov Gleichungen

Die unendlichen Erreichbarkeits- und Beobachtbarkeits-Gramschen zu Σ

$$P = \int_0^{\infty} e^{A\tau} B B^T e^{A^T \tau} d\tau \quad \text{und} \quad Q = \int_0^{\infty} e^{A\tau} C^T C e^{A^T \tau} d\tau$$

lösen die zwei Lyapunovgleichungen:

$$A P E^T + E P A^T = -B B^T,$$

$$A^T Q E + E^T Q A = -C^T C.$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Realisierungen und Balancierung

Definition

Sätze von Matrizen E, A, B, C mit identischem I/O-Verhalten heißen **Realisierungen** $\Sigma(E; A, B, C)$ des Systems.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Realisierungen und Balancierung

Definition

Sätze von Matrizen E, A, B, C mit identischem I/O-Verhalten heißen **Realisierungen** $\Sigma(E; A, B, C)$ des Systems.

Definition

Die Eigenwerte von $PEQE^T$ sind Invarianten des Systems. Ihre Quadratwurzeln heißen **Hankel Singulärwerte (HSV)** von Σ .

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Realisierungen und Balancierung

Definition

Sätze von Matrizen E, A, B, C mit identischem I/O-Verhalten heißen **Realisierungen** $\Sigma(E; A, B, C)$ des Systems.

Definition

Die Eigenwerte von $PEQE^T$ sind Invarianten des Systems. Ihre Quadratwurzeln heißen **Hankel Singulärwerte (HSV)** von Σ .

Definition

Eine Realisierung $\Sigma(E; A, B, C)$ heißt **balanciert**, falls gilt

$$P = Q = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n).$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Realisierungen und Balancierung

Definition

Sätze v
heißen

balancierte Realisierung \rightsquigarrow

- Zustände gleichzeitig gut steuerbar und beobachtbar,
- bzw. Zustände die viel Eingangenergie benötigen, erzeugen wenig Ausgangsenergie,
- Idee des balancierten Abschneidens: Beschränkung auf dominante HSV.

Definition

Die Eig
Quadra

Definition

Eine Realisierung $\Sigma(E; A, B, C)$ heißt **balanciert**, falls gilt

$$P = Q = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n).$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Zusammenfassung und Implementierung im SR Algorithmus

Zusammenfassung:

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

$$AP + PA^T + BB^T = 0, \quad A^T Q + QA + C^T C = 0,$$

$P = Q = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$ mit $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n > 0$ erfüllen.

- $\{\sigma_1, \dots, \sigma_n\}$ sind die **Hankel Singulärwerte** von Σ .
- Balancierte Realisierung durch **Zustandsraumtransformation**

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

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

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Zusammenfassung und Implementierung im SR Algorithmus

Implementierung: SR Methode (für MTL4 in Bearbeitung - TP A07)

- 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: $(W^T A V, W^T B, C V)$.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Übertragungsfunktion und Fehlerschranke

Laplacetransformation des Systems $\Sigma(E; A, B, C)$ liefert die

Übertragungsfunktion

$$G(\sigma) = C(A - \sigma E)^{-1} B.$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Übertragungsfunktion und Fehlerschranke

Laplace-Transformation des Systems $\Sigma(E; A, B, C)$ liefert die

Übertragungsfunktion

$$G(\sigma) = C(A - \sigma E)^{-1}B.$$

Damit zeigt man die

Fehlerschranke

$$\|G - \hat{G}_r\| \leq 2 \sum_{i=r+1}^n \sigma_i.$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)

Übertragungsfunktion und Fehlerschranke

Laplace-Transformation des Systems $\Sigma(E; A, B, C)$ liefert die

Übertragungsfunktion

$$G(\sigma) = C(A - \sigma E)^{-1}B.$$

Damit zeigt man die

Fehlerschranke

$$\|G - \hat{G}_r\| \leq 2 \sum_{i=r+1}^n \sigma_i = 2 \operatorname{Spur}(\Sigma_2).$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Balanciertes Abschneiden (BT)
Übertragungsfunktion und Fehlerschranke

Laplacetransformation des Systems $\Sigma(E; A, B, C)$ liefert die

Übertragungsfunktion

$$G(\sigma) = C(A - \sigma E)^{-1}B.$$

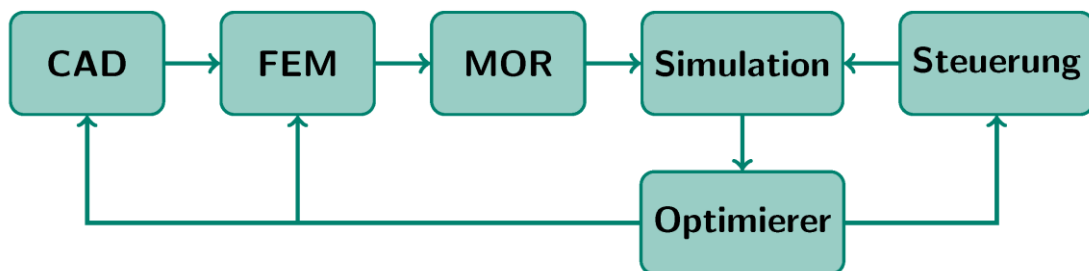
Damit zeigt man die

Fehlerschranke

$$\|G - \hat{G}_r\| \leq 2 \sum_{i=r+1}^n \sigma_i.$$

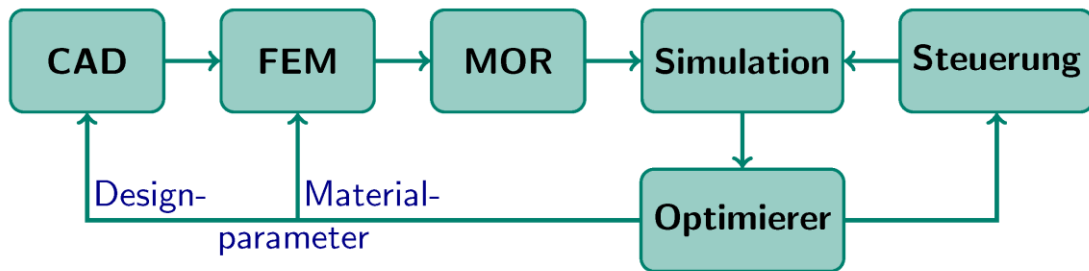
Es gilt insbesondere: $\|y - \hat{y}\| \leq 2 \sum_{i=r+1}^n \sigma_i \|u\|$

Parametererhaltende Modellordnungsreduktion (PMOR)
Motivation



- Ausgangspunkt: MOR-beschleunigte Prozesskette

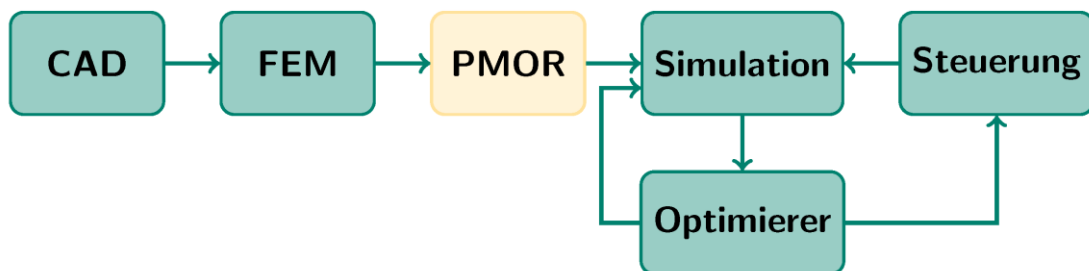
Parametererhaltende Modellordnungsreduktion (PMOR)
Motivation



- Ausgangspunkt: MOR-beschleunigte Prozesskette
- Aber: Berechnung des **reduzierten** Systems und Simulation auf dessen Basis für **jedes** neue CAD/FEM-Setup.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

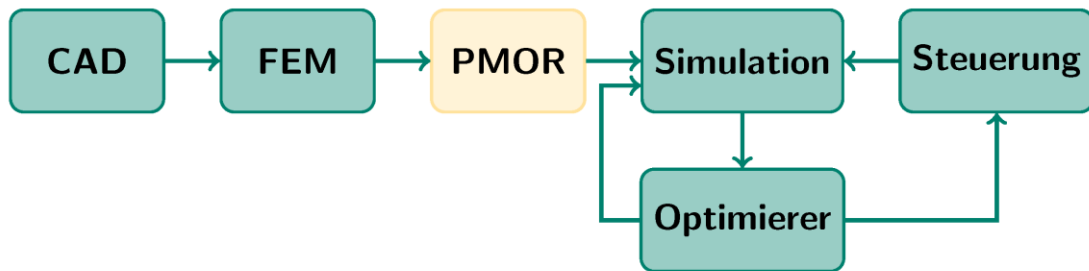
Parametererhaltende Modellordnungsreduktion (PMOR)
Motivation



- Design-/Materialparameter im Modell enthalten.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Parametererhaltende Modellordnungsreduktion (PMOR)
Motivation



- Design-/Materialparameter im Modell enthalten.
- ⇒ **Eliminierung** der wiederholten Designphase und damit **Beschleunigung** des Gesamtprozesses.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Parametererhaltende Modellordnungsreduktion (PMOR)

Wir betrachten

das parametrisierte LTI System

$$\begin{aligned} E(p)\dot{x}(t) &= A(p)x(t) + B(p)u(t), \\ y(t) &= C(p)x(t) \end{aligned} \quad (\text{pLTI})$$

mit Parameter $p \in \mathbb{R}^d$ und der

Übertragungsfunktion

$$G(\sigma, p) = C(p)(\sigma E(p) - A(p))^{-1}B(p).$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Parametererhaltende Modellordnungsreduktion (PMOR)

Ziel: Ordnungsreduktion unter Parametererhalt.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Parametererhaltende Modellordnungsreduktion (PMOR)

Ziel: Ordnungsreduktion unter Parametererhalt, d.h. man sucht
das reduzierte System

$$\begin{aligned}\hat{E}(p)\dot{\hat{x}}(t) &= \hat{A}(p)x(t) + \hat{B}(p)u(t), \\ \hat{y}(t) &= \hat{C}(p)\hat{x}(t).\end{aligned}$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Parametererhaltende Modellordnungsreduktion (PMOR)

Ziel: Ordnungsreduktion unter **Parametererhalt**, d.h. man sucht

das reduzierte System

$$\begin{aligned}\hat{E}(p)\dot{\hat{x}}(t) &= \hat{A}(p)\hat{x}(t) + \hat{B}(p)u(t), \\ \hat{y}(t) &= \hat{C}(p)\hat{x}(t).\end{aligned}$$

⇒ Berechnung von $\hat{E}(p)$, $\hat{A}(p)$, $\hat{B}(p)$, $\hat{C}(p)$ für jeden Parameterwert p zu aufwendig.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Parametererhaltende Modellordnungsreduktion (PMOR)

Ziel: Ordnungsreduktion unter **Parametererhalt**, d.h. man sucht

das reduzierte System

$$\begin{aligned}\hat{E}(p)\dot{\hat{x}}(t) &= \hat{A}(p)\hat{x}(t) + \hat{B}(p)u(t), \\ \hat{y}(t) &= \hat{C}(p)\hat{x}(t).\end{aligned}$$

⇒ Berechnung von $\hat{E}(p)$, $\hat{A}(p)$, $\hat{B}(p)$, $\hat{C}(p)$ für jeden Parameterwert p zu aufwendig.

Ausweg:

Kombination ordnungsreduzierter Modelle für ausgewählte Parameterwerte p .

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

PMOR mittels BT

Zunächst: Beschränkung auf eindimensionalen Parameterraum.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

PMOR mittels BT

Zunächst: Beschränkung auf eindimensionalen Parameterraum.

Vorgehen:

- 1 Wähle k Parameterwerte $p_1, \dots, p_k \in [a, b]$.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

PMOR mittels BT

Zunächst: Beschränkung auf eindimensionalen Parameterraum.

Vorgehen:

- ① Wähle k Parameterwerte $p_1, \dots, p_k \in [a, b]$.
- ② Anwendung von BT auf k deterministische Systeme vom Typ (pLTI) ergibt die reduzierten Übertragungsfunktionen

$$\hat{G}_j(\sigma) := \hat{G}(\sigma, p_j) = \hat{C}(p_j)(\sigma \hat{E}(p_j) - \hat{A}(p_j))^{-1} \hat{B}(p_j),$$

$$\forall j = 1, \dots, k.$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

PMOR mittels BT

Zunächst: Beschränkung auf eindimensionalen Parameterraum.

Vorgehen:

- ① Wähle k Parameterwerte $p_1, \dots, p_k \in [a, b]$.
- ② Anwendung von BT auf k deterministische Systeme vom Typ (pLTI) ergibt die reduzierten Übertragungsfunktionen

$$\hat{G}_j(\sigma) := \hat{G}(\sigma, p_j) = \hat{C}(p_j)(\sigma \hat{E}(p_j) - \hat{A}(p_j))^{-1} \hat{B}(p_j),$$

$$\forall j = 1, \dots, k.$$

- ③ Erhalte Projektionsmatrizen $V_j, W_j \in \mathbb{R}^{n \times r_j}$ für $\hat{G}_j(\sigma)$.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

PMOR mittels BT

Zunächst: Beschränkung auf eindimensionalen Parameterraum.

Vorgehen:

- ① Wähle k Parameterwerte $p_1, \dots, p_k \in [a, b]$.
- ② Anwendung von BT auf k deterministische Systeme vom Typ (pLTI) ergibt die reduzierten Übertragungsfunktionen

$$\hat{G}_j(\sigma) := \hat{G}(\sigma, p_j) = \hat{C}(p_j)(\sigma \hat{E}(p_j) - \hat{A}(p_j))^{-1} \hat{B}(p_j),$$

$$\forall j = 1, \dots, k.$$

- ③ Erhalte Projektionsmatrizen $V_j, W_j \in \mathbb{R}^{n \times r_j}$ für $\hat{G}_j(\sigma)$.
- ④ Verknüpfe Projektionsmatrizen zu $V = [V_1, \dots, V_k]$ und $W = [W_1, \dots, W_k]$ für $\hat{G}(\sigma, p)$.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

PMOR mittels BT

Zunächst: Beschränkung auf eindimensionalen Parameterraum.

Vorgehen:

$$\hat{E}(p) = W^T E(p) V \in \mathbb{R}^{r \times r}, \quad \hat{A}(p) = W^T A(p) V \in \mathbb{R}^{r \times r},$$

$$\hat{B}(p) = W^T B(p) \in \mathbb{R}^{r \times m}, \quad \hat{C}(p) = C(p) V \in \mathbb{R}^{p \times r}$$

$$\hat{G}_j(\sigma) := \hat{G}(\sigma, p_j) = \hat{C}(p_j)(\sigma \hat{E}(p_j) - \hat{A}(p_j))^{-1} \hat{B}(p_j),$$

$$\forall j = 1, \dots, k.$$

- ③ Erhalte Projektionsmatrizen $V_j, W_j \in \mathbb{R}^{n \times r_j}$ für $\hat{G}_j(\sigma)$.
- ④ Verknüpfe Projektionsmatrizen zu $V = [V_1, \dots, V_k]$ und $W = [W_1, \dots, W_k]$ für $\hat{G}(\sigma, p)$.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

PMOR mittels BT

Zunächst: Beschränkung auf eindimensionalen Parameterraum.

Vorgehen:

$$\hat{E}(p) = W^T E(p) V \in \mathbb{R}^{r \times r}, \quad \hat{A}(p) = W^T A(p) V \in \mathbb{R}^{r \times r},$$

$$\hat{B}(p) = W^T B(p) \in \mathbb{R}^{r \times m}, \quad \hat{C}(p) = C(p) V \in \mathbb{R}^{p \times r}$$

$$r \leq r_1 + \dots + r_k$$

$$\hat{G}_j(\sigma) := G(\sigma, p_j) = C(p_j)(\sigma E(p_j) - A(p_j))^{-1} B(p_j),$$

$$\forall j = 1, \dots, k.$$

- ③ Erhalte Projektionsmatrizen $V_j, W_j \in \mathbb{R}^{n \times r_j}$ für $\hat{G}_j(\sigma)$.
- ④ Verknüpfe Projektionsmatrizen zu $V = [V_1, \dots, V_k]$ und $W = [W_1, \dots, W_k]$ für $\hat{G}(\sigma, p)$.

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

PMOR mittels BT

Zunächst: Beschränkung auf eindimensionalen Parameterraum.

Vorgehen:

$$\hat{E}(p) = W^T E(p) V \in \mathbb{R}^{r \times r}, \quad \hat{A}(p) = W^T A(p) V \in \mathbb{R}^{r \times r},$$

$$\hat{B}(p) = W^T B(p) \in \mathbb{R}^{r \times m}, \quad \hat{C}(p) = C(p) V \in \mathbb{R}^{p \times r}$$

$$r \leq r_1 + \dots + r_k$$

$$\hat{G}_j(\sigma) := G(\sigma, p_j) = C(p_j)(\sigma E(p_j) - A(p_j))^{-1} B(p_j),$$

$$\hat{A}(p) = W^T A(p) V \quad [\text{BAUR ET AL. '11}]$$

$$W = [W_1, \dots, W_k] \text{ für } G(\sigma, p).$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

PMOR mittels BT

Zunächst: Beschränkung auf eindimensionalen Parameterraum.

Vorgehen:

$$\hat{E}(p) = W^T E(p) V \in \mathbb{R}^{r \times r}, \quad \hat{A}(p) = W^T A(p) V \in \mathbb{R}^{r \times r},$$

$$\hat{B}(p) = W^T B(p) \in \mathbb{R}^{r \times m}, \quad \hat{C}(p) = C(p) V \in \mathbb{R}^{p \times r}$$

$$r \leq r_1 + \dots + r_k$$

$$G_j(s) := G(s, p_j) = C(p_j)(sE(p_j) - A(p_j))^{-1} B(p_j),$$

$$\hat{A}(p) = W^T A(p) V \quad [\text{BAUR ET AL. '11}]$$

$$= W^T (A_0 + f_1(p)A_1 + \dots + f_M(p)A_M) V$$

$$W = [w_1, \dots, w_k] \text{ mit } G(s, p).$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

PMOR mittels BT

Zunächst: Beschränkung auf eindimensionalen Parameterraum.

Vorgehen:

$$\hat{E}(p) = W^T E(p) V \in \mathbb{R}^{r \times r}, \quad \hat{A}(p) = W^T A(p) V \in \mathbb{R}^{r \times r},$$

$$\hat{B}(p) = W^T B(p) \in \mathbb{R}^{r \times m}, \quad \hat{C}(p) = C(p) V \in \mathbb{R}^{p \times r}$$

$$r \leq r_1 + \dots + r_k$$

$$G_j(s) := G(s, p_j) = C(p_j)(sE(p_j) - A(p_j))^{-1} B(p_j),$$

$$\hat{A}(p) = W^T A(p) V \quad [\text{BAUR ET AL. '11}]$$

$$= W^T (A_0 + f_1(p)A_1 + \dots + f_M(p)A_M) V$$

$$= W^T A_0 V + f_1(p)W^T A_1 V + \dots + f_M(p)W^T A_M V$$

$$W = [w_1, \dots, w_k] \text{ mit } G(s, p).$$

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Numerische Ergebnisse
Ständer (TP A05)

- ANSYS FEM Semidiskretisierung:
 - DOFs: $n = 16626$
 - Eingänge: $m = 20$
 - Ausgänge: $p = n$
- Verfahrbewegung des Schlittens liefert positionsabhängige Eingangsmatrizen.
- Erstellung eines parametrisierten Modells.



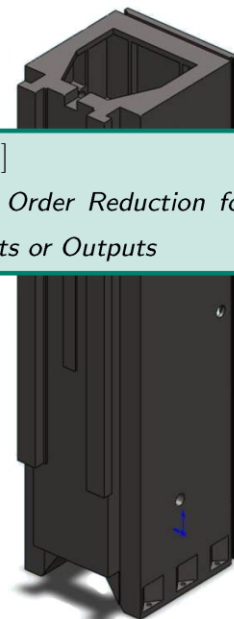
SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Numerische Ergebnisse
Ständer (TP A05)

- ANSYS FEM Semidiskretisierung [BENNER/SCHNEIDER '11]
 - DOFs: $n = 16626$
 - Eingänge: $m = 20$
 - Ausgänge: $p = n$
(hier: $p = 1 \hat{=} \text{Durchschnittstemp.}$)

Balanced Truncation Model Order Reduction for LTI Systems with many Inputs or Outputs

- Verfahrbewegung des Schlittens liefert positionsabhängige Eingangsmatrizen.
- Erstellung eines parametrisierten Modells.



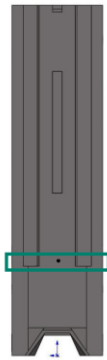
SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Ständer (TP A05)
 Parametrisches Modell

Betrachte das LTI System mit Systemmatrizen
 $E, A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ aus Ansys (TP A05), $B = [b_\ell]_{\ell=1}^n \in \mathbb{R}^{n \times 1}$

$$E\dot{x}(t) = Ax(t) + B(p)u(t),$$

$$y(t) = Cx(t).$$



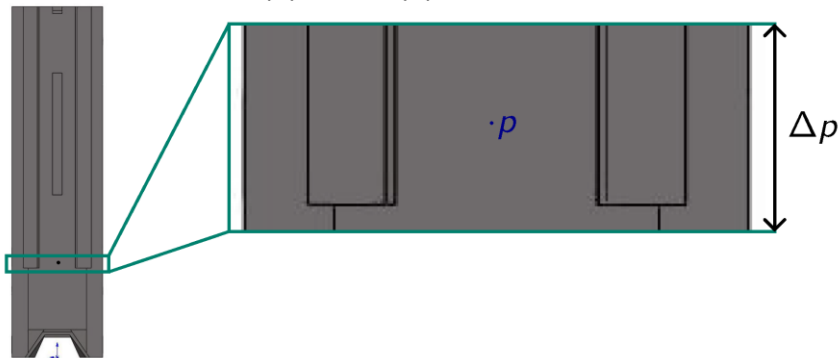
SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Ständer (TP A05)
 Parametrisches Modell

Betrachte das LTI System mit Systemmatrizen
 $E, A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ aus Ansys (TP A05), $B = [b_\ell]_{\ell=1}^n \in \mathbb{R}^{n \times 1}$

$$E\dot{x}(t) = Ax(t) + B(p)u(t),$$

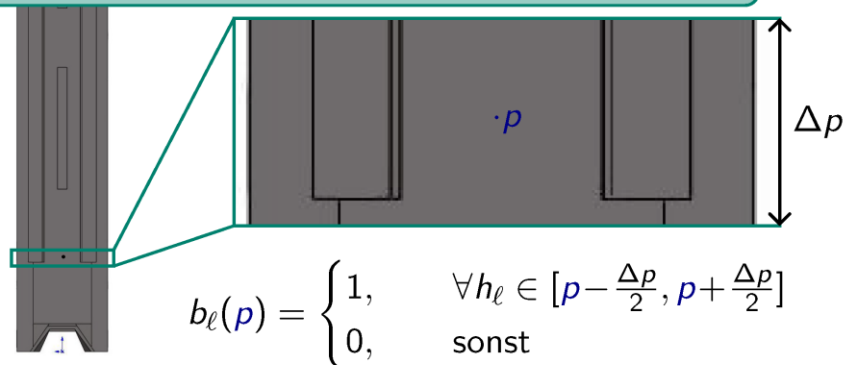
$$y(t) = Cx(t).$$



SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Ständer (TP A05)
 Parametrisches Modell

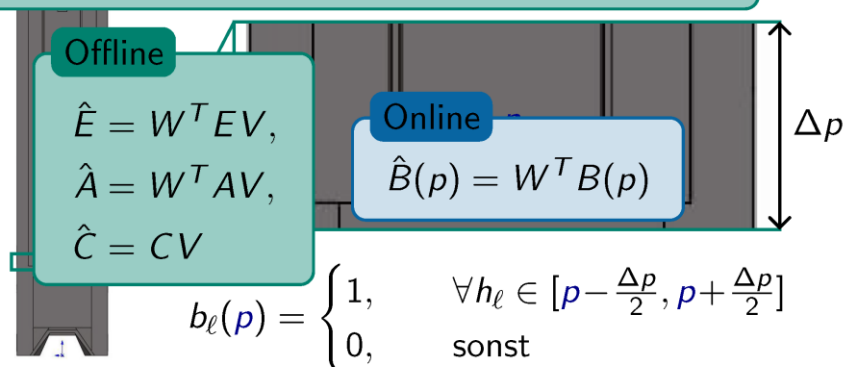
Betrachte das LTI System mit Systemmatrizen

 $E, A \in \mathbb{R}^{n \times n}, C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ aus Ansys (TP A05), $B = [b_\ell]_{\ell=1}^n \in \mathbb{R}^{n \times 1}$
 $\Delta p \hat{=}$ Höhe des Werkzeugschlittens,
 $h_\ell \hat{=}$ Höhenkoordinate des ℓ -ten Freiheitsgrades


SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

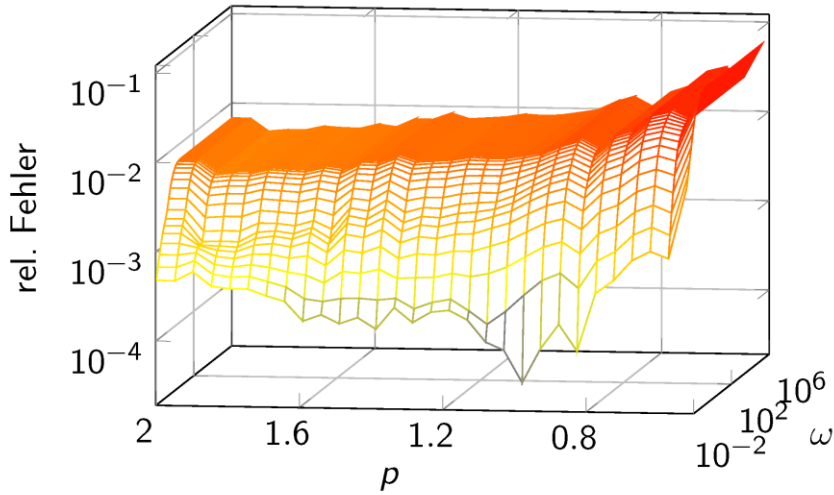
Ständer (TP A05)
 Parametrisches Modell

Betrachte das LTI System mit Systemmatrizen

 $E, A \in \mathbb{R}^{n \times n}, C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ aus Ansys (TP A05), $B = [b_\ell]_{\ell=1}^n \in \mathbb{R}^{n \times 1}$
 $\Delta p \hat{=}$ Höhe des Werkzeugschlittens,
 $h_\ell \hat{=}$ Höhenkoordinate des ℓ -ten Freiheitsgrades


SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

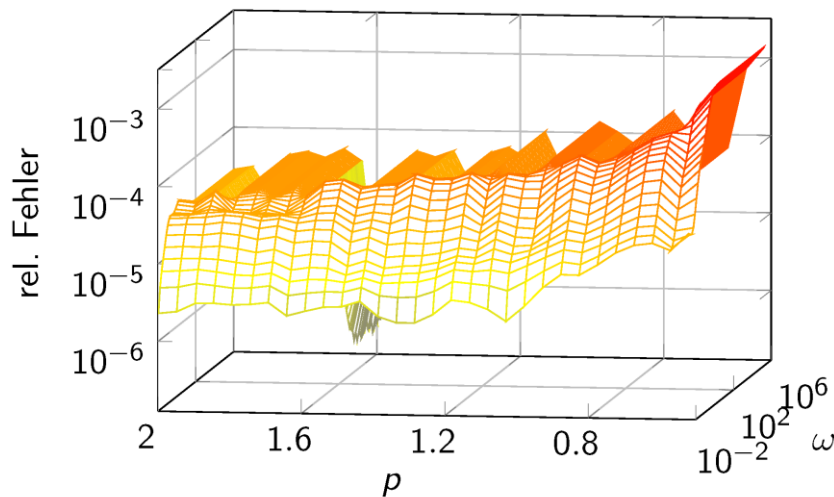
Ständer (TP A05)



Relativer Fehler $\frac{|G(j\omega,p) - \hat{G}(j\omega,p)|}{|G(j\omega,p)|}$ für $k = 1$ Stützstelle

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

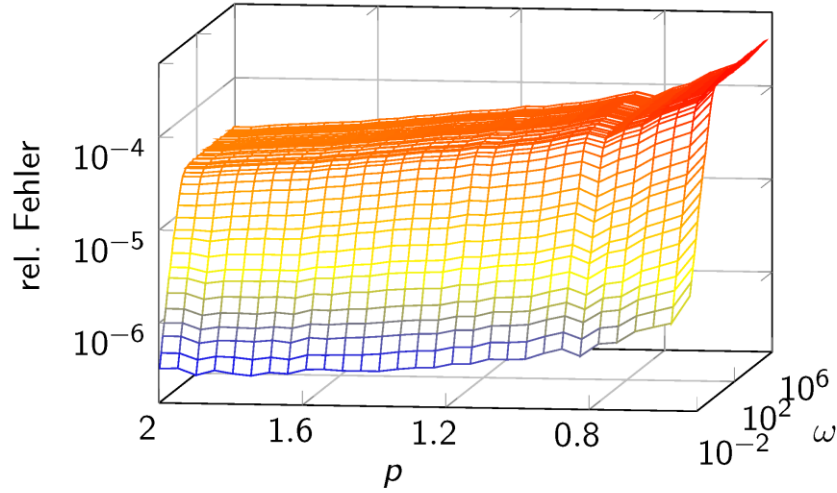
Ständer (TP A05)



Relativer Fehler $\frac{|G(j\omega,p) - \hat{G}(j\omega,p)|}{|G(j\omega,p)|}$ für $k = 2$ Stützstellen

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Ständer (TP A05)



Relativer Fehler $\frac{|G(j\omega,p) - \hat{G}(j\omega,p)|}{|G(j\omega,p)|}$ für $k = 3$ Stützstellen

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Ständer (TP A05)

BT-Toleranz 10^{-3}				
k	Zeit für V, W	$\max(G(\cdot) - \hat{G}(\cdot))$	$\max\left(\frac{ G(\cdot) - hG(\cdot) }{ G(\cdot) }\right)$	red. Ord.
1	≈ 20s	2.074E -3	1.752E -1	6
2	≈ 40s	1.792E -3	1.227E -1	10
3	≈ 61s	1.152E -5	5.717E -3	17

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Ständer (TP A05)

BT-Toleranz 10^{-3}				
k	Zeit für V, W	$\max(G(\cdot) - \hat{G}(\cdot))$	$\max\left(\frac{ G(\cdot) - hG(\cdot) }{ G(\cdot) }\right)$	red. Ord.
1	$\approx 20s$	2.074E -3	1.752E -1	6
2	$\approx 40s$	1.792E -3	1.227E -1	10
3	$\approx 61s$	1.152E -5	5.717E -3	17

BT-Toleranz 10^{-4}				
k	Zeit für V, W	$\max(G(\cdot) - \hat{G}(\cdot))$	$\max\left(\frac{ G(\cdot) - \hat{G}(\cdot) }{ G(\cdot) }\right)$	red. Ord.
1	$\approx 20s$	1.264E -3	5.499E -2	8
2	$\approx 40s$	3.898E -5	5.648E -3	16
3	$\approx 60s$	6.044E -6	3.106E -3	23

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Ständer (TP A05)

BT-Toleranz 10^{-3}				
k	Zeit für V, W	$\max(G(\cdot) - \hat{G}(\cdot))$	$\max\left(\frac{ G(\cdot) - hG(\cdot) }{ G(\cdot) }\right)$	red. Ord.
1	$\approx 20s$	2.074E -3	1.752E -1	6
2	$\approx 40s$	1.792E -3	1.227E -1	10
3	$\approx 61s$	1.152E -5	5.717E -3	17

BT-Toleranz 10^{-4}				
k	Zeit für V, W	$\max(G(\cdot) - \hat{G}(\cdot))$	$\max\left(\frac{ G(\cdot) - \hat{G}(\cdot) }{ G(\cdot) }\right)$	red. Ord.
1	$\approx 20s$	1.264E -3	5.499E -2	8
2	$\approx 40s$	3.898E -5	5.648E -3	16
3	$\approx 60s$	6.044E -6	3.106E -3	23

BT-Toleranz 10^{-5}				
k	Zeit für V, W	$\max(G(\cdot) - \hat{G}(\cdot))$	$\max\left(\frac{ G(\cdot) - \hat{G}(\cdot) }{ G(\cdot) }\right)$	red. Ord.
1	$\approx 20s$	4.073E -4	5.871E -2	10
2	$\approx 41s$	2.777E -6	1.384E -3	20
3	$\approx 60s$	6.522E -8	2.452E -4	30

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Einführung in die Modellordnungsreduktion (MOR)

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Einführung in die Modellordnungsreduktion (MOR)
- Balanciertes Abschneiden als spezielle MOR-Technik

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Einführung in die Modellordnungsreduktion (MOR)
- Balanciertes Abschneiden als spezielle MOR-Technik
- Erweiterung auf parametrische Modellreduktion (PMOR)

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Einführung in die Modellordnungsreduktion (MOR)
- Balanciertes Abschneiden als spezielle MOR-Technik
- Erweiterung auf parametrische Modellreduktion (PMOR)
- Anwendung der PMOR auf das Beispiel „Ständer“ (TP A05)

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Einführung in die Modellordnungsreduktion (MOR)
- Balanciertes Abschneiden als spezielle MOR-Technik
- Erweiterung auf parametrische Modellreduktion (PMOR)
- Anwendung der PMOR auf das Beispiel „Ständer“(TP A05)

Ausblick

- Verwendung von $C = I_n$ für die Kopplung von Wärmeleitungs- und Strukturgleichungen [BENNER/SCHNEIDER '11]

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Einführung in die Modellordnungsreduktion (MOR)
- Balanciertes Abschneiden als spezielle MOR-Technik
- Erweiterung auf parametrische Modellreduktion (PMOR)
- Anwendung der PMOR auf das Beispiel „Ständer“(TP A05)

Ausblick

- Verwendung von $C = I_n$ für die Kopplung von Wärmeleitungs- und Strukturgleichungen [BENNER/SCHNEIDER '11]
- Untersuchung weiterer PMOR Methoden und Vergleich mit BT basiertem Verfahren

SFB/TR-96: AG Simulation und Parametrierung: TP A06

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Einführung in die Modellordnungsreduktion (MOR)
- Balanciertes Abschneiden als spezielle MOR-Technik
- Erweiterung auf parametrische Modellreduktion (PMOR)
- Anwendung der PMOR auf das Beispiel „Ständer“ (TP A05)

Ausblick

- Verwendung von $C = I_n$ für die Kopplung von Wärmeleitungs- und Strukturgleichungen [BENNER/SCHNEIDER '11]
- Untersuchung weiterer PMOR Methoden und Vergleich mit BT basiertem Verfahren
- Wahl geeigneter Stützstellen (möglichst optimal)

EFFIZIENTE SIMULATION THERMO-ELASTISCHER VERFORMUNGEN AN WERKZEUGMASCHINEN MIT ORDNUNGSREDUZIERTEN MODELLEN BEI BERÜCKSICHTIGUNG GROSSER RELATIVBEWEGUNGEN

K. Großmann, A. Galant; A. Mühl; Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, TU Dresden

Zeitlich variable und örtlich inhomogene Temperaturfelder führen in Werkzeugmaschinen aufgrund thermo-mechanischer Eigenschaften der Maschinenstruktur zu Verformungen und damit zu einer thermisch bedingten Verlagerung des Tool Center Point.

Die Simulation dieser Verformungen ist eine wichtige Aufgabe in der konstruktiven Gestaltungsphase.

Es existiert entwicklungsseitig ein iterativer Prozess zwischen Konstruktion, FEM-Berechnung und Bewertung.

Dieser Entwicklungsprozess lässt sich effizienter gestalten, indem anschließend an die Ableitung thermo-elastischer FE-Modelle aus dem CAD eine Modellordnungsreduktion (MOR) erfolgt.

Die entstehenden „kleinen“ Modelle lassen sich direkt auf der Steuerung der Werkzeugmaschine implementieren, mit Lastdaten beaufschlagen und durch numerische Integration lösen.

Die so berechenbaren thermo-elastischen Verformungen können für steuerungintegrierte Korrekturen im Betrieb der Werkzeugmaschine verwendet werden.

Weiterhin können die reduzierten und kondensierten thermo-elastischen Teilmodelle in eine digitale block-orientierte Simulationsumgebung wie ANSYS-Simplorer oder MATLAB-Simulink importiert, dort variabel gekoppelt und an weitere Modellbereiche beliebiger physikalisch-technischer Domänen – wie der Regelungstechnik – angebunden werden.

Die direkte Anbindung an den CAD-FEM-Entwicklungsprozess ist gewährleistet, so dass die Datenhaltung im Entwicklungsprozess durchgängig bleibt.

Im Vortrag werden folgende Themen angesprochen und am Beispiel einer vereinfachten Werkzeugmaschinen-Struktur demonstriert:

- Kompakte Modellierung von Baugruppen durch MOR (mit ANSYS und MATLAB)
- Thermo-elastische Interaktion von Baugruppen
- Berücksichtigung der Relativbewegung (Implementierung MATLAB/Simulink)
- Poseabhängige elastische Reaktion der Gesamtmaschine

Kontakt:

Alexander Galant

TU Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik

01062 Dresden

Tel.: 0 351-46336102

E-Mail: galant@iwmm.mw.tu-dresden.de

Effiziente Simulation thermo-elastischer Verformungen an Werkzeugmaschinen mit ordnungsreduzierten Modellen bei Berücksichtigung großer Relativbewegungen

Knut Großmann, Alexander Galant, Andreas Mühl

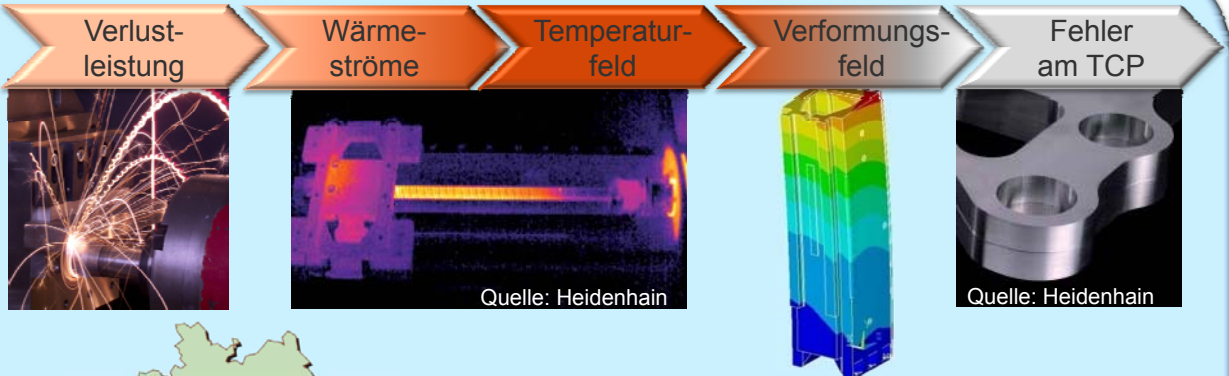
Gliederung

- I. Motivation & Zielsetzung
- II. Vereinfachungsannahmen & Test-Beispiel
- III. Prozesskette der effizienten thermischen Analyse
- IV. Erweiterungen & Berechnungsergebnisse

I. Motivation & Zielsetzung

Motivation

SFB/Transregio 96



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

www.transregio96.de

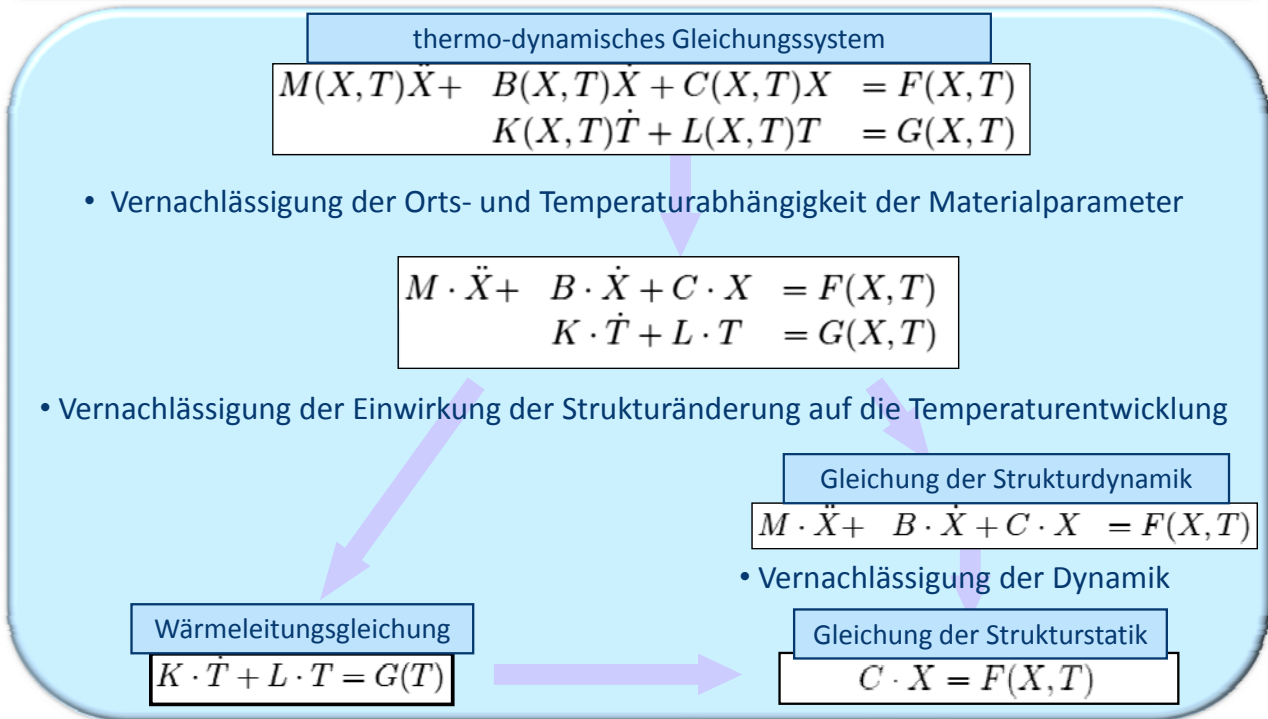
Zielstellung

- Bereitstellung einer für die industrielle Anwendung praktikablen Tool-Kette sowie dafür erforderlicher Software-Module und Modell-Objekte zur
 - ausgehend von CAD-Geometrie,
 - über die FEM-Modellierung,
 - zur Simulation,
 durchgängig unterstützen, **effizienten** Analyse des thermo-elastischen Verhaltens von WZM-Strukturen mit **relativ zueinander bewegten Baugruppen**.

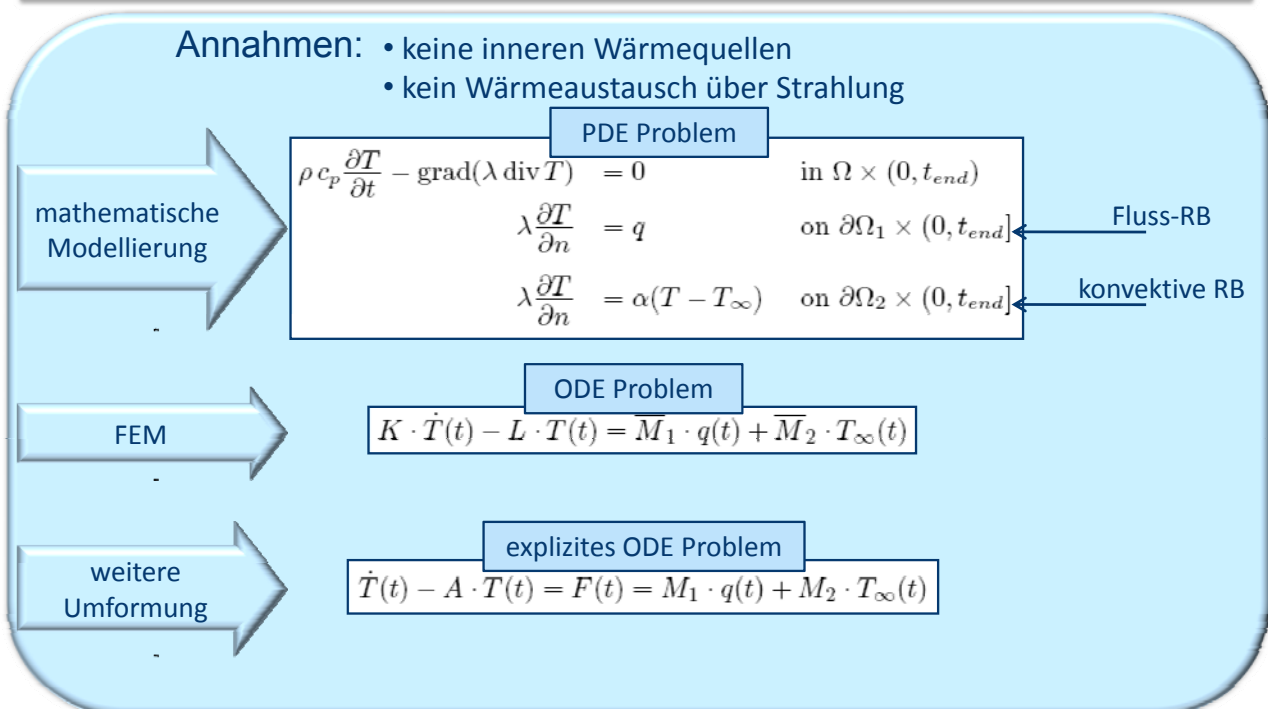


II. Vereinfachungsannahmen & Test-Beispiel

Auftrennen des thermo-elastischen Gleichungssystems



Zustandsraumdarstellung



Zustandsraumdarstellung

explizites ODE Problem

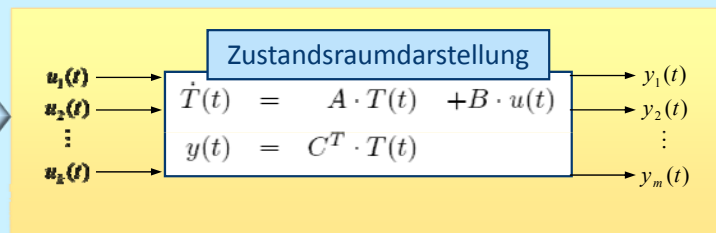
$$\dot{T}(t) - A \cdot T(t) = F(t) = M_1 \cdot q(t) + M_2 \cdot T_\infty(t)$$

$$F = \underbrace{[M_1 \cdot B_1, M_2 \cdot B_2]}_B \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_k \end{bmatrix}$$

$B \in \mathbb{R}^{N \times k}$ - sog. **Steuermatrix**

Weiter definieren wir $C \in \mathbb{R}^{N \times m}$ - : sog. **Messmatrix**. Diese vermittelt zwischen allen Temperaturen $T(t)$ und m bestimmten Temperaturwerten (Mittelwerte oder Knotentemperaturen): $y_1(t), \dots, y_m(t)$, so dass gilt: $y(t) = C^T \cdot T(t)$

nach Einsetzen



Test-Beispiel

• CAD und Material:

• Lasteinbringung:

- Temperierung
 - Aufstellfläche des Ständers
 - Seitenfläche des Ständers
 - Frontfläche des Spindelstocks
- Wärmefluss durch Verlustleistung
 - Kontaktflächen der Gleitführung
- Konvektion
 - Modellierung der Luftschichtung



Ständer (S)



III. Prozesskette der effizienten thermischen Analyse

Prozessschritte der Analyse

A. OFFLINE Phase

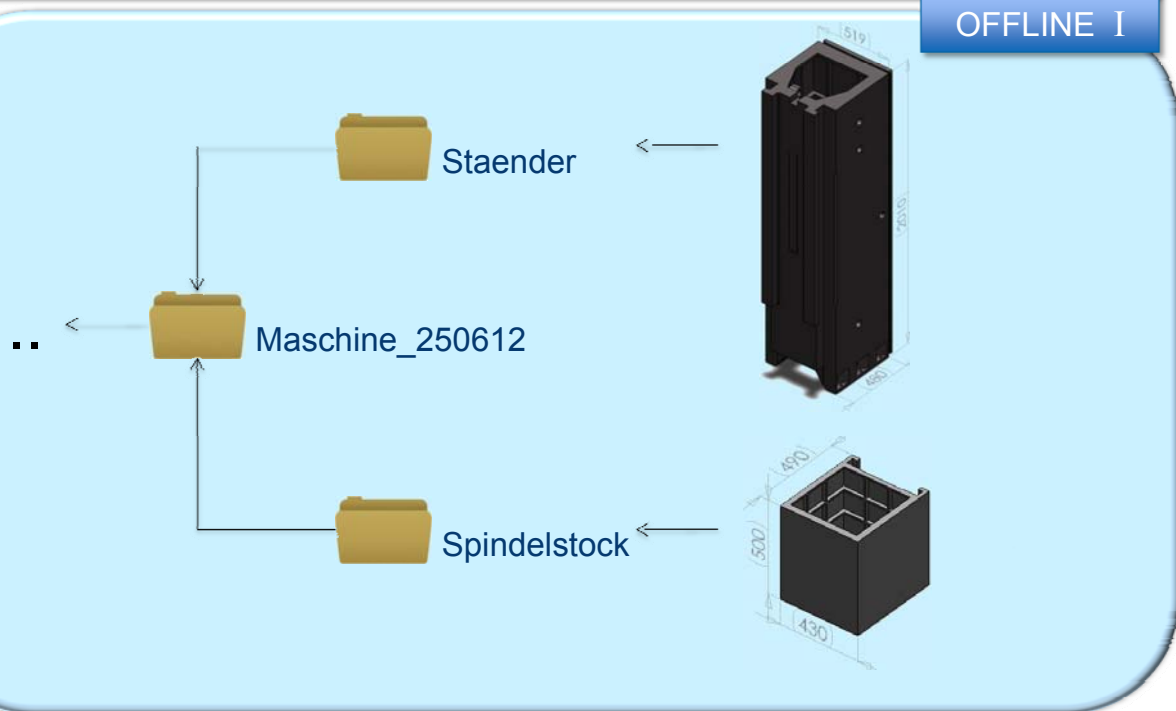
- I. Modellierung einzelnen BG
- II. Geometrische Koppelung
- III. Definition der Kontakte

B. ONLINE Phase

- I. Steuerungs- und Kontaktparametrierung
- II. Berechnung
- III. Auswertung

I. BG-Modellierung: Ordnerstruktur & CAD

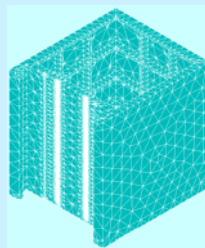
OFFLINE I



I. BG-Modellierung: FEM

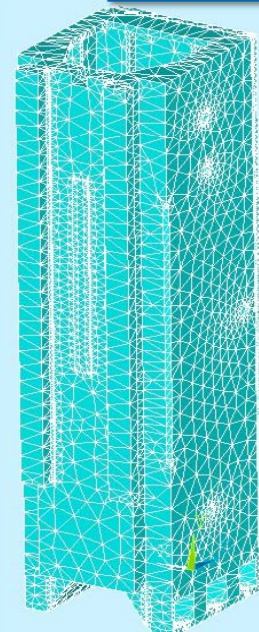
OFFLINE I

- Import in Ansys (z.B. über WorkBench)



- Definition der thermischen Materialparameter

- Wahl von FE-Elementen und Vernetzung



I. BG-Modellierung: FEM

OFFLINE I

• Typen und Positionen der Lasten:

- Temperierung
 - konstante Umgebungstemperatur

$$\alpha = 100 \frac{W}{m^2 K}$$

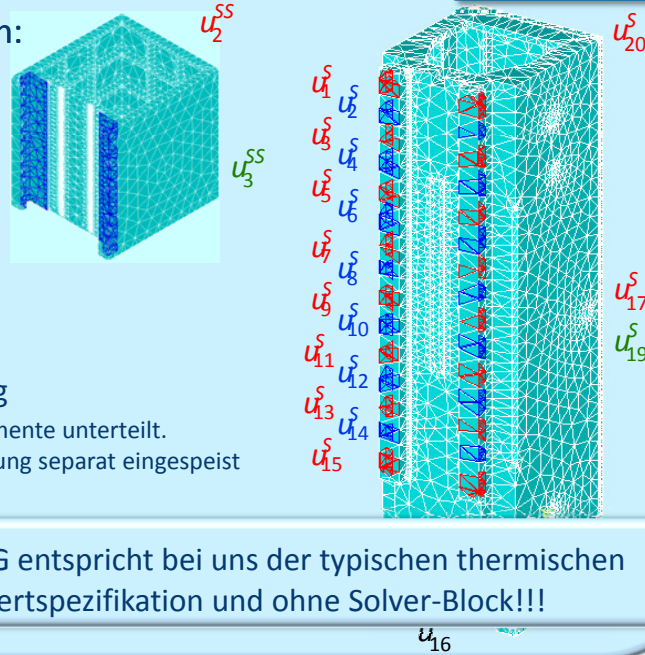
$$u_{16}^s, u_{17}^s, u_2^{ss}$$

- Konvektion
 - Modellierung der Luftschichtung
 - zeitlich abhängige Lufttemperatur

$$u_{18}^s, u_{19}^s, u_{20}^s, u_3^{ss}$$

- Wärmefluss durch Verlustleistung
 - Die Führungsschienen werden in 15 Segmente unterteilt.
 - An jedem Segment kann die Verlustleistung separat eingespeist

$$u_1^s, \dots, u_{15}^s, u_1^{ss}$$



Bem.: FE-Modellierung einzelnen BG entspricht bei uns der typischen thermischen Analyse in ANSYS ohne Lastwertspezifikation und ohne Solver-Block!!!

I. BG-Modellierung: Export der Systeminformation

OFFLINE I

Thermische Systemgleichung

Kapazitäten-Matrix

$$K \dot{T} + (L_\lambda + L_\alpha) \cdot T = F$$

Wärmeleitungs-Matrix L Konvektions-Matrix

statische Analyse

$$L \cdot T = F$$

transiente Analyse

$$(K + \Delta t \cdot L) \cdot T^{n+1} = K \cdot T^n + \Delta t \cdot F$$

Gesamtsteifigkeits-Matrix K_G

Szenario 1: statisch, ohne Konvektion

Szenario 2: statisch, mit Konvektion

Szenario 3: transient mit $\Delta t = 1$

Ausschreiben der K_G -Matrizen in separate Dateien (HBMAT-Befehl)

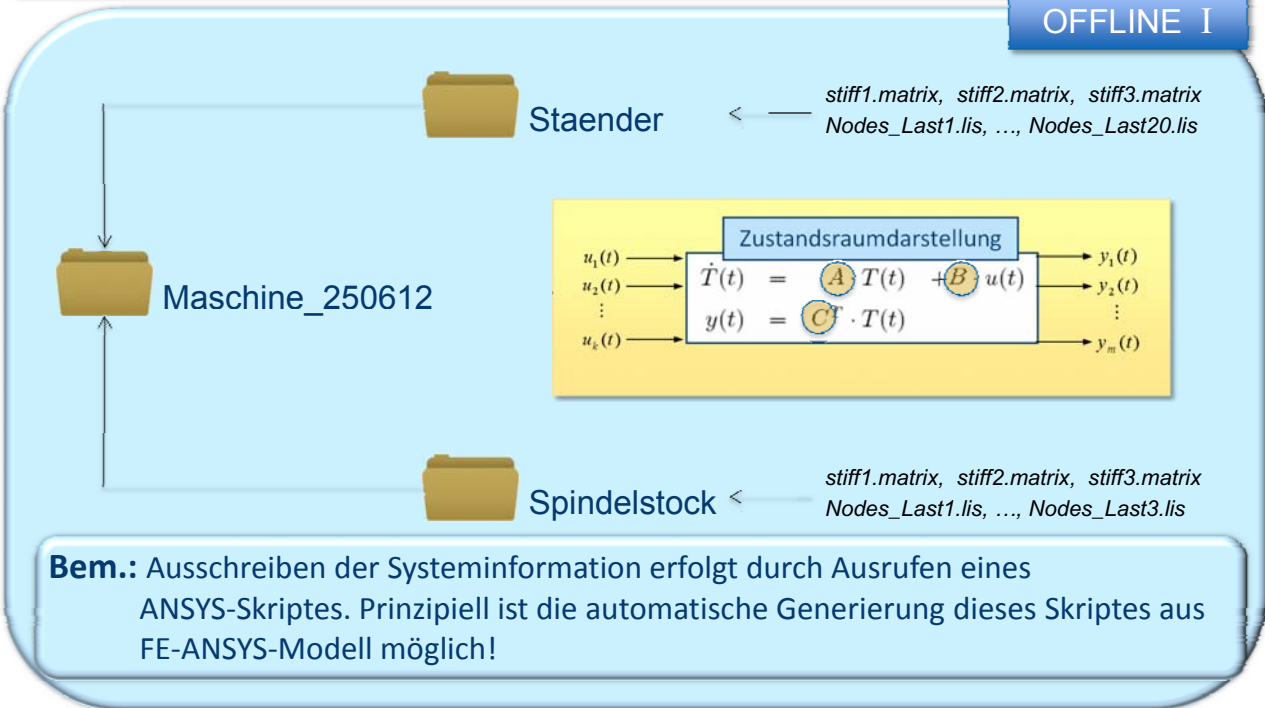
$$K_G = L_\lambda \rightarrow \text{stiff1.matrix}$$

$$K_G = L \rightarrow \text{stiff2.matrix}$$

$$K_G = K + L \rightarrow \text{stiff3.matrix}$$

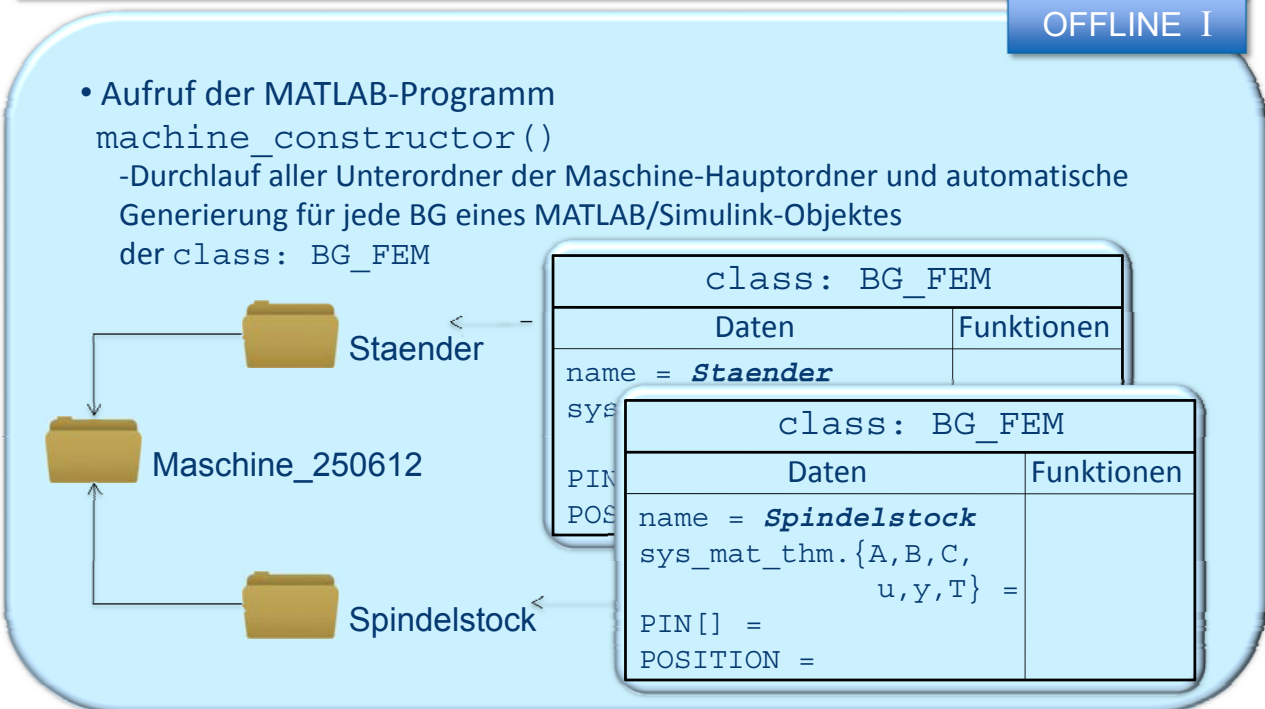
I. BG-Modellierung: Export der Systeminformation

OFFLINE I



I. BG-Modellierung: Generieren der MATLAB/Simulink-Instanzen

OFFLINE I



I. BG-Modellierung: Generieren der MATLAB/Simulink-Instanzen

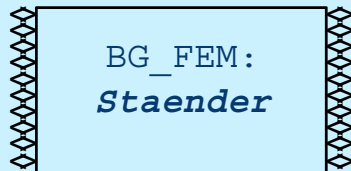
OFFLINE I

- Aufbau des class: BG_FEM

class: PIN	
Daten	Funk.
type = {HFlux/Conv}	
nodes[] =	
character_pnt = (0,0,0) ^T	

class: BG_FEM	
Daten	Funktionen
name = BG_Name	
sys_mat_thm. {A,B,C, u,y,T} =	
PIN[] =	
POSITION =	

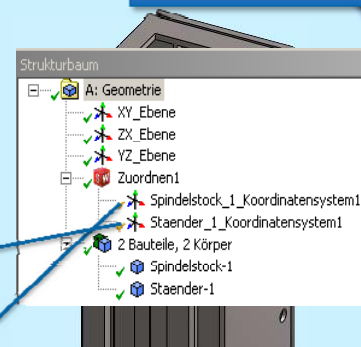
- Graphische Darstellung des BG_FEM-Objektes nach außen (Graphische Schnittstelle als Simulink/SimulationX/Simplorer-Objekt)



II. Geometrische Koppelung: Baugruppen

OFFLINE II

- CAD-Gesamtmaschinen-Modell aufbau
 - Dabei müssen alle BG entsprechend der Null-Referenzierung positioniert sein, d.h. alle Achsen-Positionen in Maschinen-Koordinatensystem sind auf Null zustellen.
- Einlesen lokaler Koordinatensystemen (KS) einzelnen BG bzgl. globalen (Maschinen-) KS
 - Diese Information ist direkt in CAD-System verfügbar. Also Automatisierung ist möglich! Z.B. über ANSYS-WB



class: POSITION	
Daten	Funk.
null = (0,0,0) ^T	
ex = (1,0,0) ^T	
ey = (0,1,0) ^T	
ez = (0,0,1) ^T	

Details von Spindelstock_1_Koordinatensystem1	
Spindelstock_1_Koordinatensystem1	
Importierte Ebene	
Zuordnen1	
Ungsdaten	[-0,5 1015 -648]
der X-Achse	[-1 0 0]
der Y-Achse	[0 0 -1]
der Z-Achse	[0 -1 0]
inatensystem exportieren?	Ja

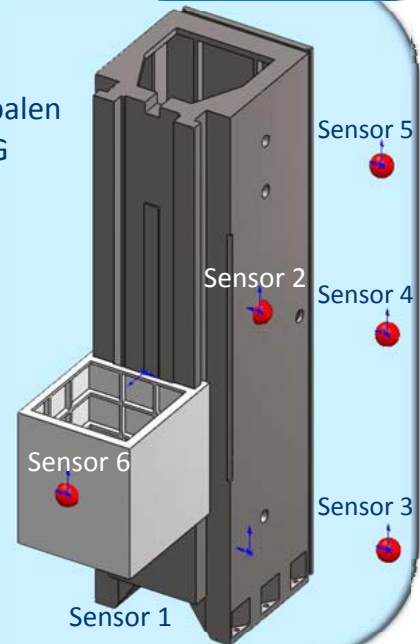
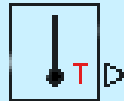
II. Geometrische Koppelung: Sensoren

OFFLINE II

- Generierung der SENSOR-Objekten
 - Montage per Hand durch MATLAB-Programm `sensor_constructor()` oder automatisch in globalen KS wie bei BG-Montage durch Einführen „spezieller“ BG namens SENSOR

class: SENSOR	
Daten	Funktionen
name =	f_sensor()
bg = 0	
character_pnt =	
(0,0,0) ^T	

- Produzierte SENSOR-Simulink -Instanz



II. Geometrische Koppelung: Achsen

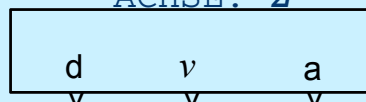
OFFLINE II

- Generierung der Achse-Objekten
 - Montage per Hand durch MATLAB-Programm `achse_constructor()`

class: ACHSE	
Daten	Funktionen
name = Z	f_distance()
POSITION =	f_velocity()
	f_accelerate()

- Produzierte SENSOR-Simulink -Instanz

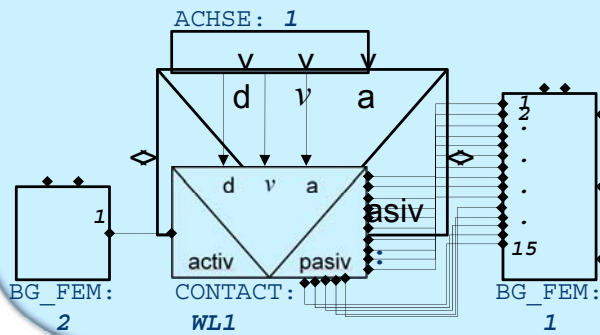
ACHSE: Z



III. Kontakte-Erstellung: Definition

OFFLINE III

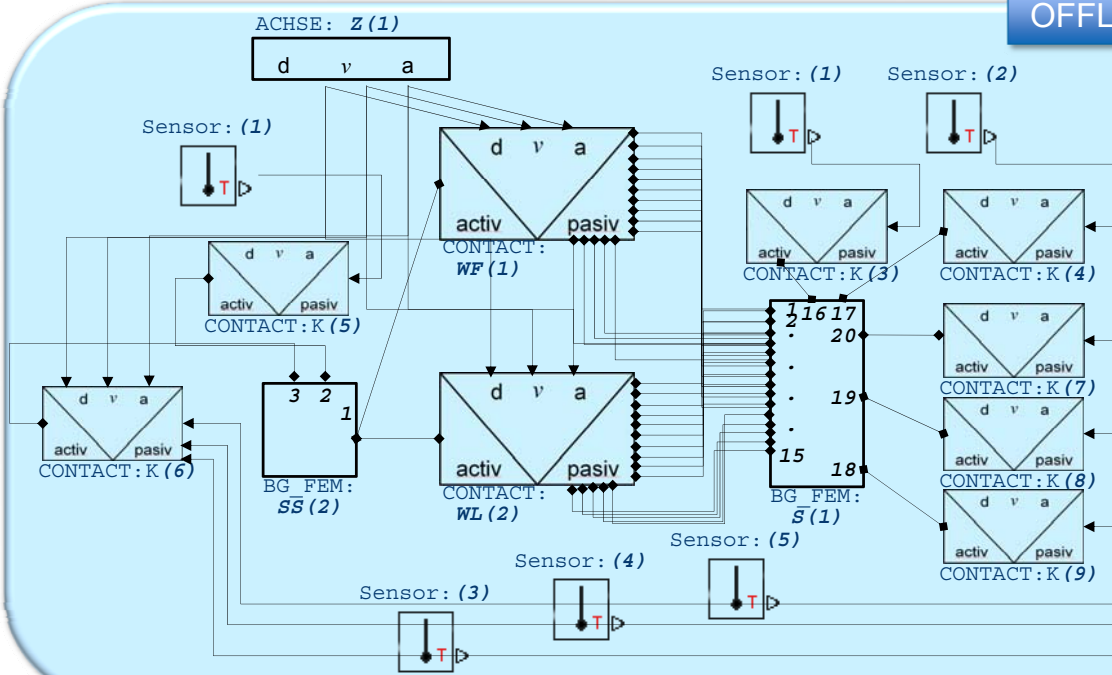
- Generierung der CONTACT-Objekten
 - Der CONTACT-Objekt beschreibt die Parametrierung der Lastwerten (Eingangssignalen). Diese hängen von der aktuellen technologischen Größen (Achse- und Antriebsdaten) und der aktuellen Interaktion-Zustand zwischen Baugruppen und der Umgebung (Randtemperatur, geom. Lage)
- Die CONTACT-Instanz in Simulink:
- Aufbau des CONTACT- Objektes



class: CONTACT	
Daten	Funktionen
name =	f_activ()
bg_activ =	f_pasiv()
bg_pasiv =	
pin_activ =	
pin_pasiv[] =	
achse =	
character_length =	

III. Kontakte-Erstellung: Gesamtsignalplan der Maschine

OFFLINE III



I. Steuerungs- und Kontaktparametrierung

• Kontaktparametrierung:

- Temperierung

$$q - \alpha(T - T_U) \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad \alpha = 100 \frac{W}{m^2 K} u_1^{SS}$$

- Konvektion

$$q - \alpha(T - T_U) \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad \alpha = 4 \frac{W}{m^2 K}$$

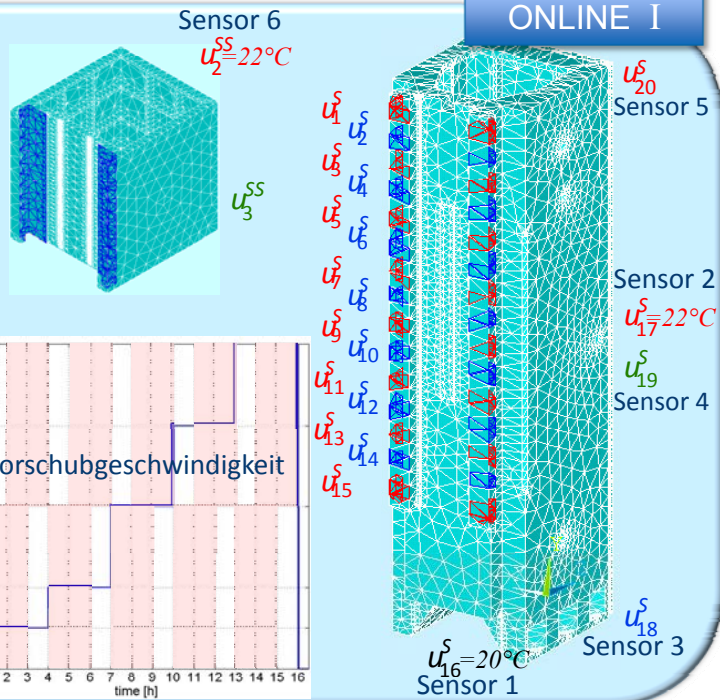
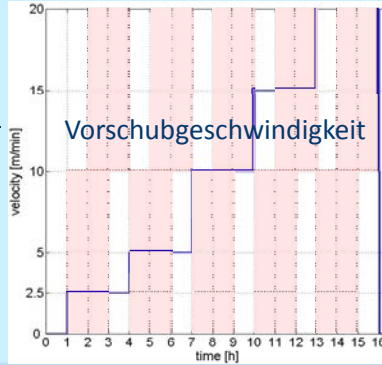
- Verlustleistung

$$q = \eta \frac{v^2}{s} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad \text{Hydrostatische Reibungsansatz}$$

η – dynamische Viskosität,
 s – Spaltbreite,
 v – Vorschubgeschwindigkeit

Umgebungstemperatur

• Bewegungsregime



II. Berechnung: Eingangssignalen(RB)

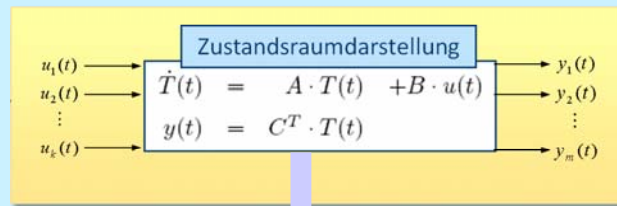
Positions-Skale

Temperatur-Skale



II. Berechnung: Lösungsalgorithmus

ONLINE II



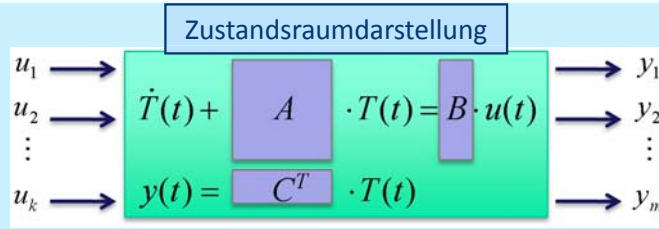
$$T^{n+1} = (I + \Delta t A)^{-1} \cdot (T^n + \Delta t B \cdot u^{n+1})$$

$$y^{n+1} = C^T \cdot T^{n+1}$$

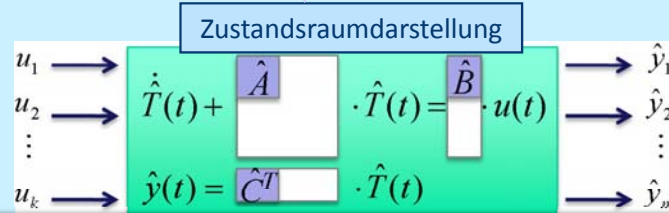
1. Berechne u^{n+1}
2. Berechne T^{n+1} & y^{n+1} und gehe zu 1.

IV. Erweiterungen & Berechnungsergebnisse

MOR-Erweiterung

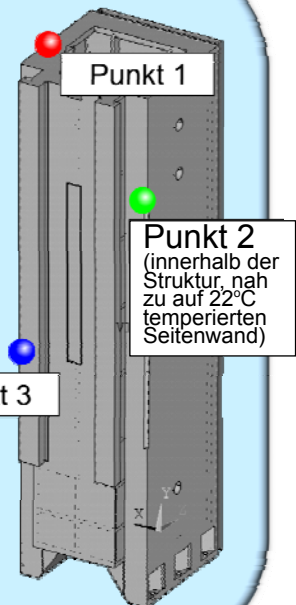
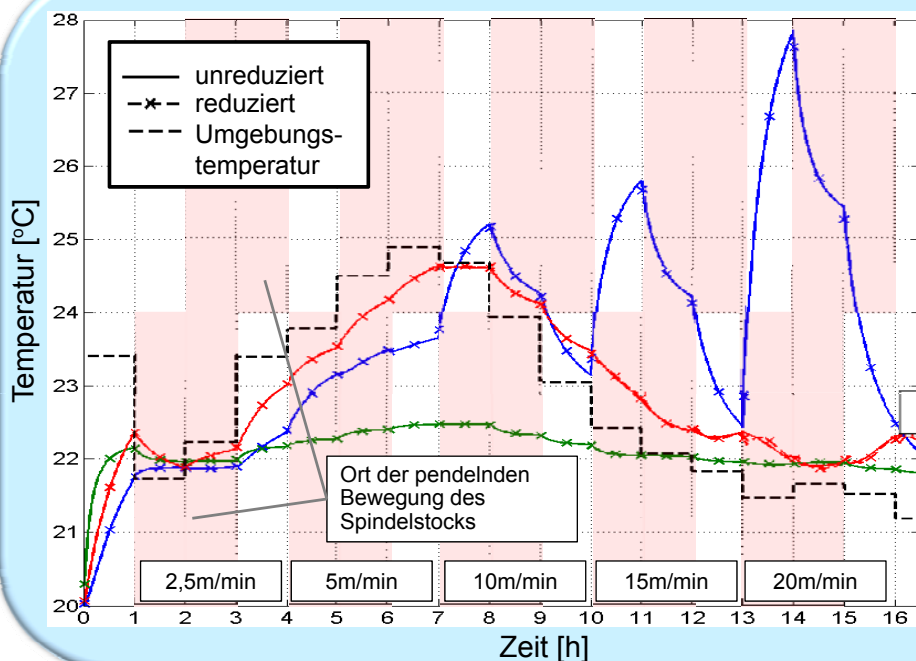


MOR Reduktion ($A, B, C \rightarrow \hat{A}, \hat{B}, \hat{C}$) führt zur kompakten Zustandsform

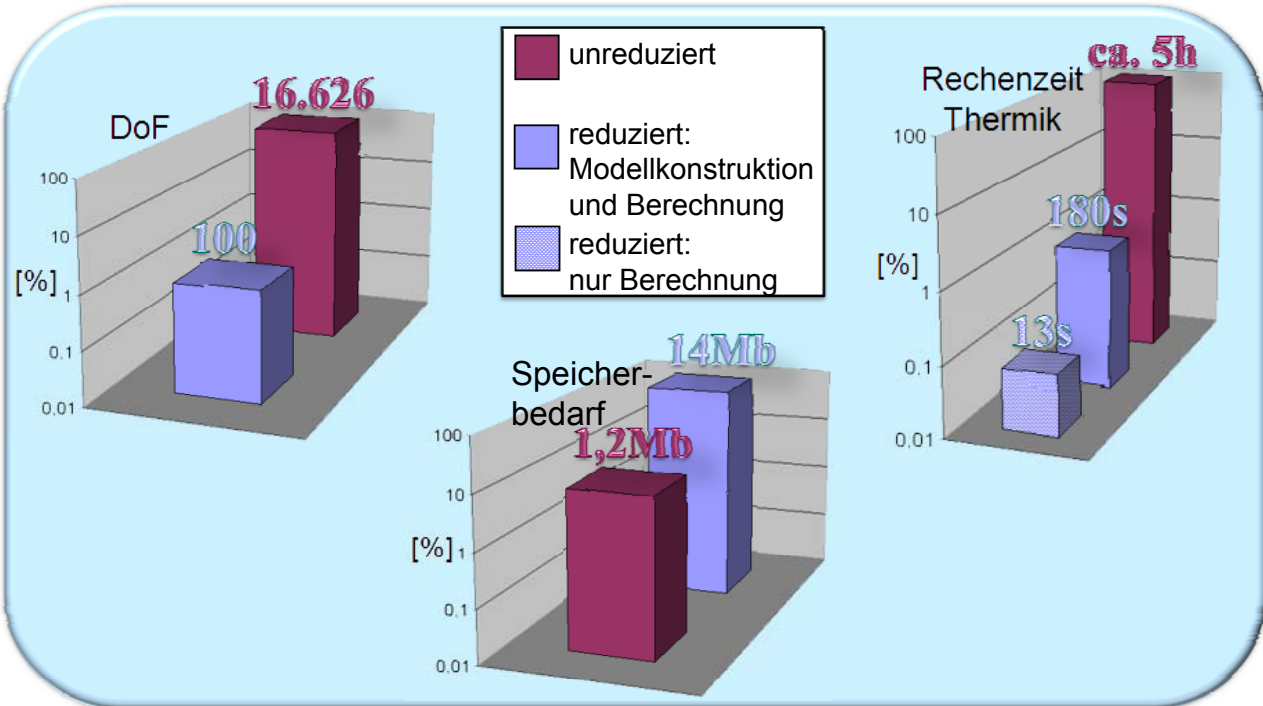


Bem.: MOR-Algorithmen sind hochgradig automatisierbar! Also praktisch kein Zusatzaufwand für den Nutzer.

Reduziert versus unreduziert: Temperatur an drei Strukturpunkten



Reduziert versus unreduziert: Aufwandsvergleich



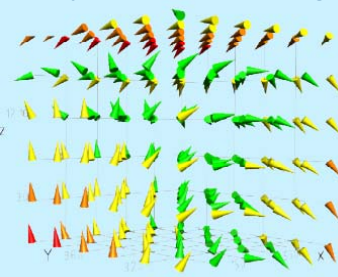
Ansatz zu effizienten Verformungsberechnung

Elastische Systemgleichung

$$\text{Steifigkeitsmatrix } \begin{pmatrix} C \\ C_{XT} \end{pmatrix} X - \begin{pmatrix} C_{XT} \\ C \end{pmatrix} T = F$$

thermische Steifigkeitsmatrix

Beispiel: $N=216$ Posen (6 in jede Raumrichtung)

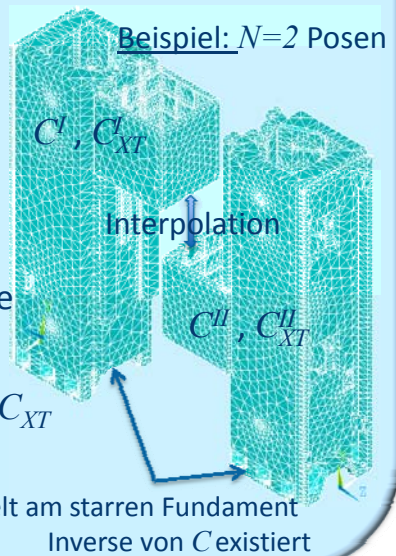


(Bildquelle: SIEMENS AG)

• TCP wird in N Positionen des Arbeitsraums betrachtet

N verschiedene Konstellationen für BG-Lage

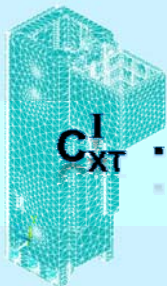
N verschiedene C und C_{XT}



Berechnung von thermischen Ersatzkräften und Verformungen

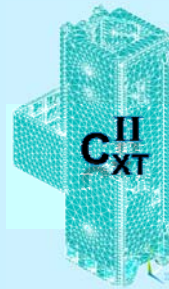
- Für jede der N BG-Konstellationen werden die Ersatzkräfte berechnet

$$F_{Ersatz}^i = C_{XT}^i \cdot T$$



$$C_{XT}^I \cdot T = F_{Ersatz}^I$$

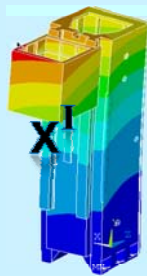
,



$$C_{XT}^{II} \cdot T = F_{Ersatz}^{II}$$

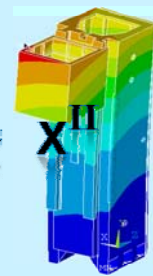
- Für jede der N BG-Konstellationen werden die Verformungen berechnet

$$C_{XT}^{I-1} \cdot F_{Ersatz}^I = X^I$$



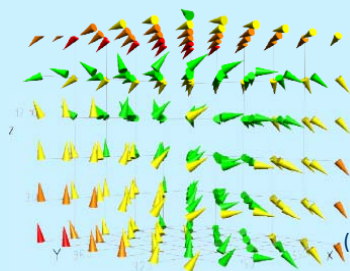
,

$$C_{XT}^{II-1} \cdot F_{Ersatz}^{II} = X^{II}$$



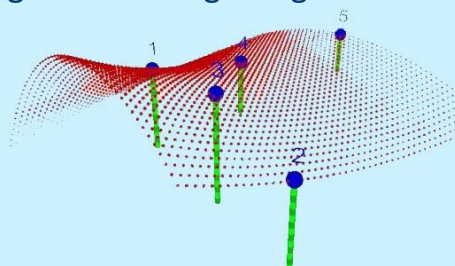
Verlagerungen am TCP

- Verlagerungen an der N TCP-Positionen im Arbeitsraum



(Bildquelle: SIEMENS AG)

- Interpolation ergibt die Verlagerungen am TCP in jedem Punkt des Arbeitsraums



THERMISCHE ANALYSE BEWEGTER BAUGRUPPEN MITTELS FEM AM BEISPIEL DER FÜHRUNGSWAGEN

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

Berechnungsmodelle, die im Rahmen des Teilbereichs A05 des SFB/TR 96 entwickelt werden, sollen das thermische Verhalten der jeweils simulierten Werkzeugmaschine prozessaktuell abbilden. Um diese zentrale Anforderung zu erfüllen, müssen die Modelle Baugruppen enthalten, welche über definierte Positionsvorgaben bewegt werden können. Damit soll die Prozessabhängigkeit der Temperaturfeldausbildung erfasst werden.

Um eine Analyse kompletter Werkzeugmaschinen mit bewegten Baugruppen durchführen zu können, ist es notwendig, sich zunächst mit der zugänglichen Technologie zur Simulation derartiger Probleme auseinanderzusetzen. Der Vortrag behandelt daher einführend die generellen Möglichkeiten, welche die im SFB verwendete FE-Software ANSYS zur Bildung solcher Simulationsmodelle mit variabel positionierbaren Komponenten bereitstellt bzw. zulässt. Neben den physikalischen Anforderungen ist dabei ebenfalls der bereits absehbare Konflikt zwischen Aufwand und Genauigkeit eine jener Zielsetzungen, an denen sich die derzeit ausschließlich qualitativen Untersuchungen orientieren. Ausgehend davon wird dargestellt, welche Arten der Wärmeübertragung und -entstehung als thermisch relevant betrachtet werden. Für diese wird auf Basis der theoretischen Grundlagen erläutert, wie eine Umsetzung in ANSYS vorteilhaft erfolgen kann und was zu beachten ist, um unplausible Ergebnisse zu vermeiden. Behandelt werden dazu Themen wie:

- transiente Analyse
- Kontakttechnologie
- Randbedingungen

Als numerisches Versuchsobjekt dient dabei ein vereinfachtes FE-Modell (siehe Bild 1) der Schiene-Wagen-Paarung einer Profilschienenführung. Auf dieses werden die berücksichtigten Phänomene (in Abb. 1 die Wärmerentstehung infolge Reibung im bewegten Kontakt) beaufschlagt und qualitativ hinsichtlich ihrer physikalischen Nachvollziehbarkeit bewertet.

Da die Profilschienenführung für das thermische Verhalten der bewegten Maschine ein entscheidendes Bauelement ist, werden die herrschenden Temperaturverhältnisse am und im Wagen des Weiteren in separaten Arbeiten detailliert untersucht. Die darin verwendeten Ansätze und Techniken zur Steigerung der quantitativen Ergebnisgüte werden vorgestellt und es wird erläutert, wie deren Integration in ein Modell der Gesamtmaschine perspektivisch erfolgen kann.

Zuletzt wird in einem kurzen Ausblick die Frage erörtert: „Wie kann das Verhältnis zwischen Aufwand und Ergebnisgenauigkeit positiv beeinflusst werden?“. Die vorgestellten Ansätze bilden den Ausgangspunkt für die zukünftigen Arbeiten in diesem Teilprojekt. Sie beschränken sich inhaltlich zunächst darauf, die numerische Auswertung der Modelle in Richtung eines verminderten Rechenaufwands zu beeinflussen (z.B. Zeitschrittweitensteuerung), sonst aber unabhängig vom betrachteten Modell zu arbeiten. Damit soll eine problemlose Übertragbarkeit auf andere thermische Simulationsmodelle gewährleistet werden.

Kontakt:

Marian Partzsch

Institut für Festkörpermechanik, Professur für Dynamik und Mechanismentechnik, TU Dresden

Tel.: 0351-46337958

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

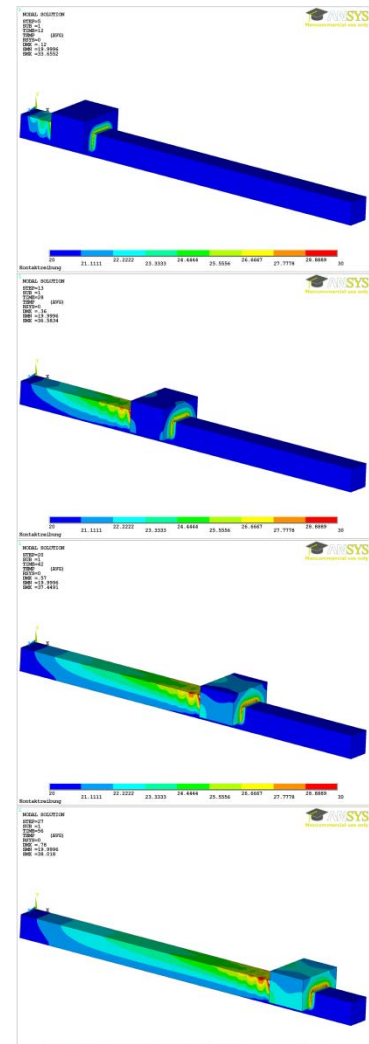


Bild 1: Temperaturfeld durch Reibwärmeeintrag im Kontakt

Thermische Analyse bewegter Baugruppen mittels FEM am Beispiel der Führungswagen

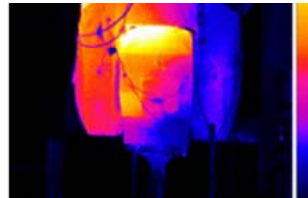
Marian Partzsch

Prof. Michael Beitelschmidt

Teilprojekt A05 am IFKM: Prozessaktuelle Systemanalyse

Kolloquium zum SFB/TR 96 – 25. Oktober 2012

Inhalt



1. Thermische Analyse mithilfe der FEM
2. Detailuntersuchungen
3. Ausblick

Inhalt



1. Thermische Analyse mithilfe der FEM
2. Detailuntersuchungen
3. Ausblick

Grundlagen der Wärmeübertragung

Wärmeleitung im Feststoff:

$$\text{PDGL: } \frac{\partial}{\partial t} T(\vec{r}, t) = a(t) \cdot \nabla^2 T(\vec{r}, t) \quad \text{mit} \quad a(t) = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$$

FOURIERSches Gesetz:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \nabla T(\vec{r}, t) \quad \longrightarrow \quad \text{RB als: - Temperatur - Wärmestromdichte}$$

Wärmestrahlung zwischen Fläche A und Fläche B:

$$\dot{q}_{AB} \sim \left[5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \cdot (T_A^4 - T_B^4) \right]$$

\longrightarrow Vernachlässigbar!

Grundlagen der Wärmeübertragung

Konvektion:

Wärmeübertragung an vorbeiströmendes Fluid

→ Nur Freie Konvektion

Wärmestromdichte normal zur Wand:

$$\dot{q}_{conv} = -\lambda_{fluid} \cdot \frac{dT}{dy} \Big|_{y=0} \approx \alpha_{conv} \cdot (T_{Wand} - T_{fluid})$$

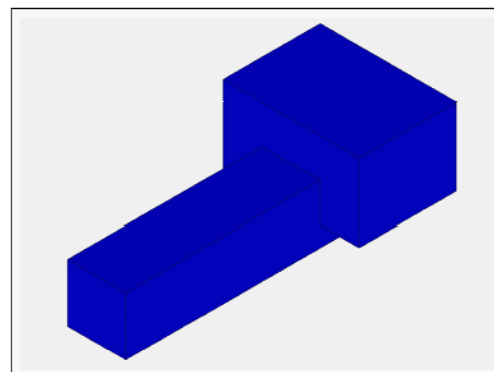
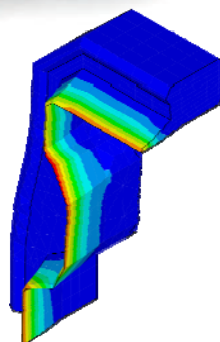
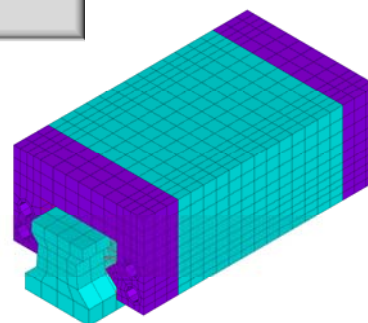
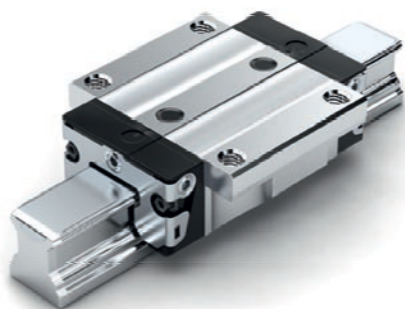
Reibung:

Thermomechanische Reibwärme-Formulierung

$$\dot{q}_{fric} = (\mu \cdot p) \cdot v_{rel}$$

→ Nur Thermische DOF: $\dot{q}_{fric} = f(v_{rel}, \mu)$

Führungswagen - Profilschienenführung



Umsetzung für transiente Analyse

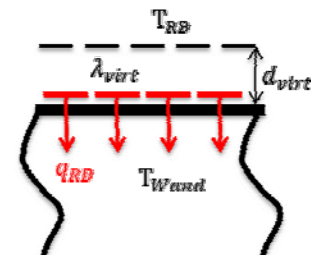
Generelle Festlegungen:

- Nur Berechnung des thermischen Felds
 - zunächst keine Kopplung mit strukturellen Freiheitsgraden
- Aber: Verwendung von Coupled-Field-Elementen
- Kontaktelemente um Bewegung einzubinden
- Keine SubSteps

Wärmeleitung/Randbedingungen:

- Direkte Temperaturvorgabe T_{RB} vermeiden
- Besser über Wärmestromdichte \dot{q}_{RB}

$$\rightarrow \dot{q}_{RB} = \frac{\lambda_{virt}}{d_{virt}} \cdot (T_{RB} - T_{Wand})$$



6/17

Umsetzung für transiente Analyse

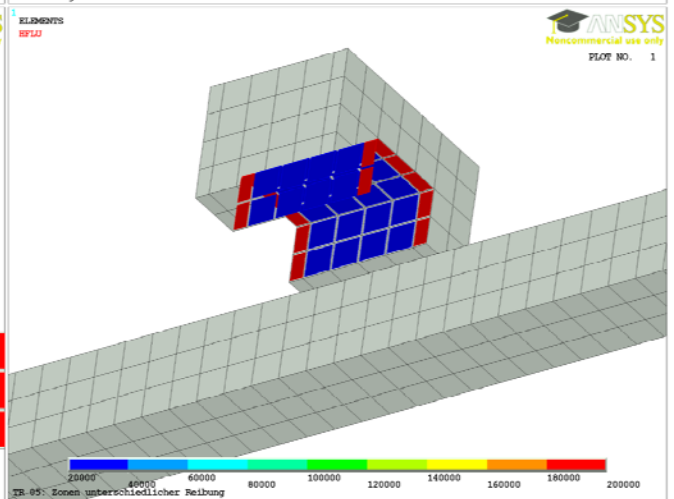
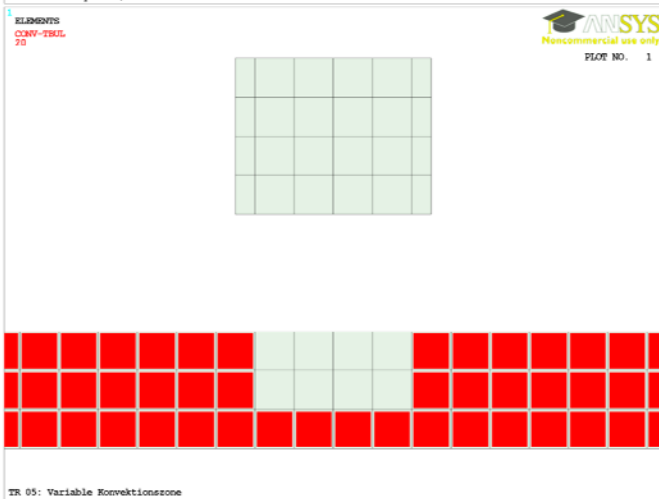
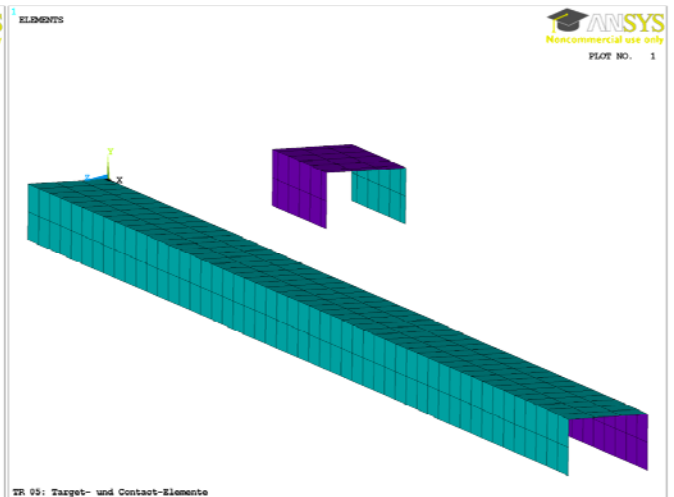
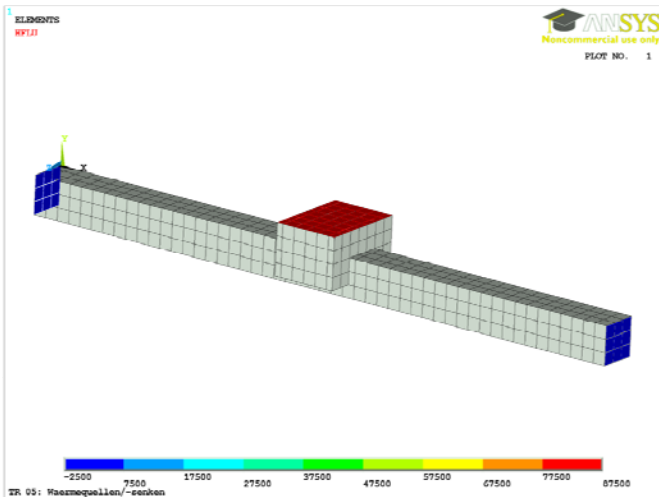
Freie Konvektion:

- Direkt über Filmkoeffizient (α_{conv}) und Bulk-Temperatur (T_{fluid})
- Konvektion auch im Kontakt
 - Prozessaktuelle Anpassung der Konvektionsflächen
- Später: $\alpha_{conv} = \alpha_{conv}(T_{Wand})$ → nach JUNGnickel

Reibung:

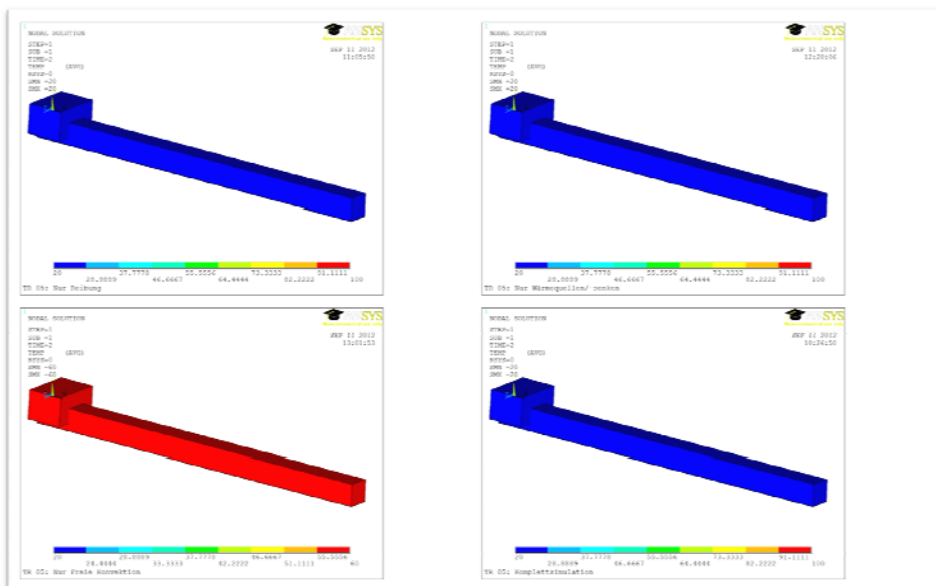
- Als Wärmestromdichte im Kontakt
 - Zonen unterschiedlicher Reibung auf Contact-Fläche

7/17



Beispielsimulation

Bewegung des Wagen auf Schiene:



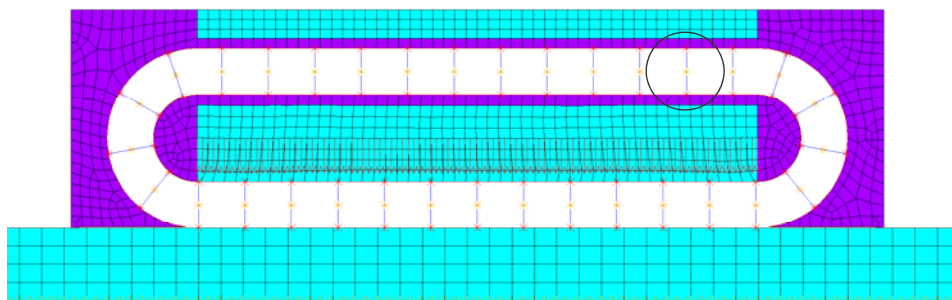
Inhalt



1. Thermische Analyse mithilfe der FEM
2. Detailuntersuchungen
3. Ausblick

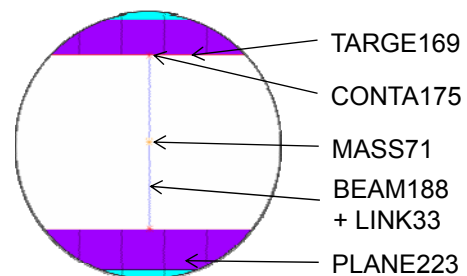
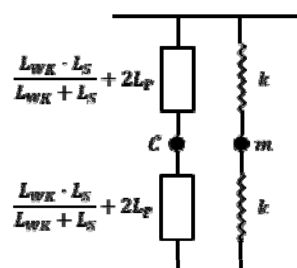
DA: BEISITZER – Analyse der Führungswagen an 2D-Modell

Balkenumlauf:



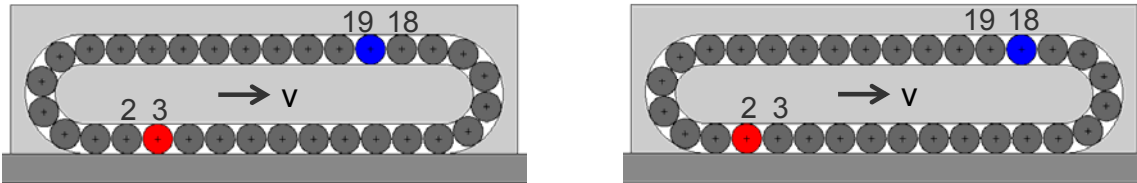
Wälzkörper:

S ... Schmierspalt
 WK ... Wälzkörper
 P ... Öl (parallel)

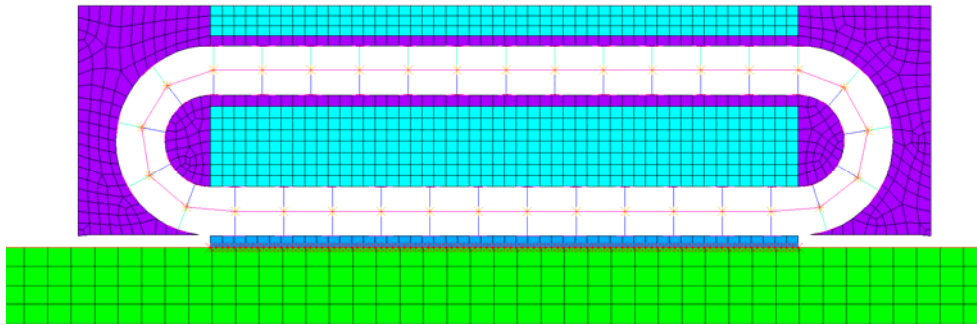


DA: BEISITZER – Analyse der Führungswagen an 2D-Modell

Temperaturumlauf:

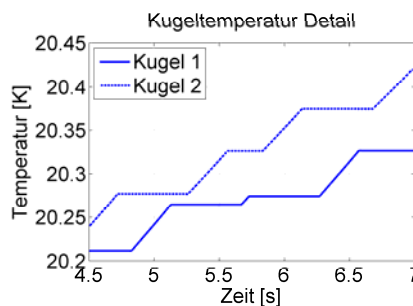
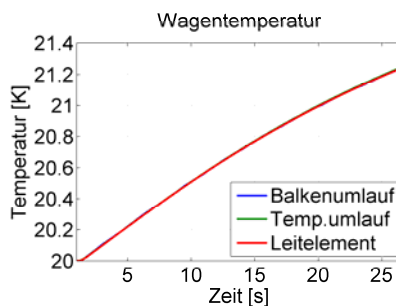
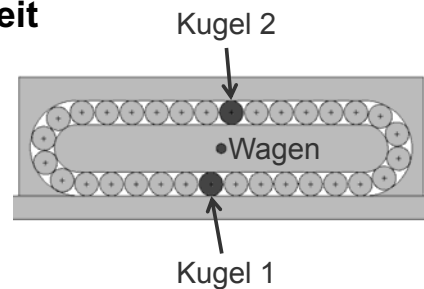
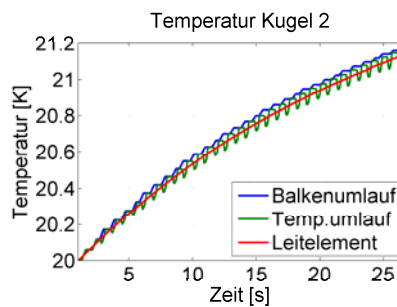
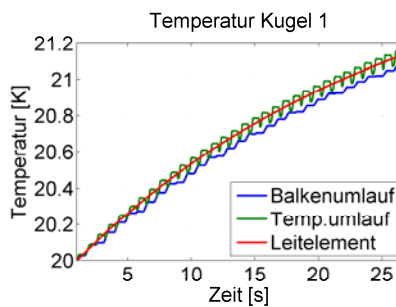


Leitelemente:



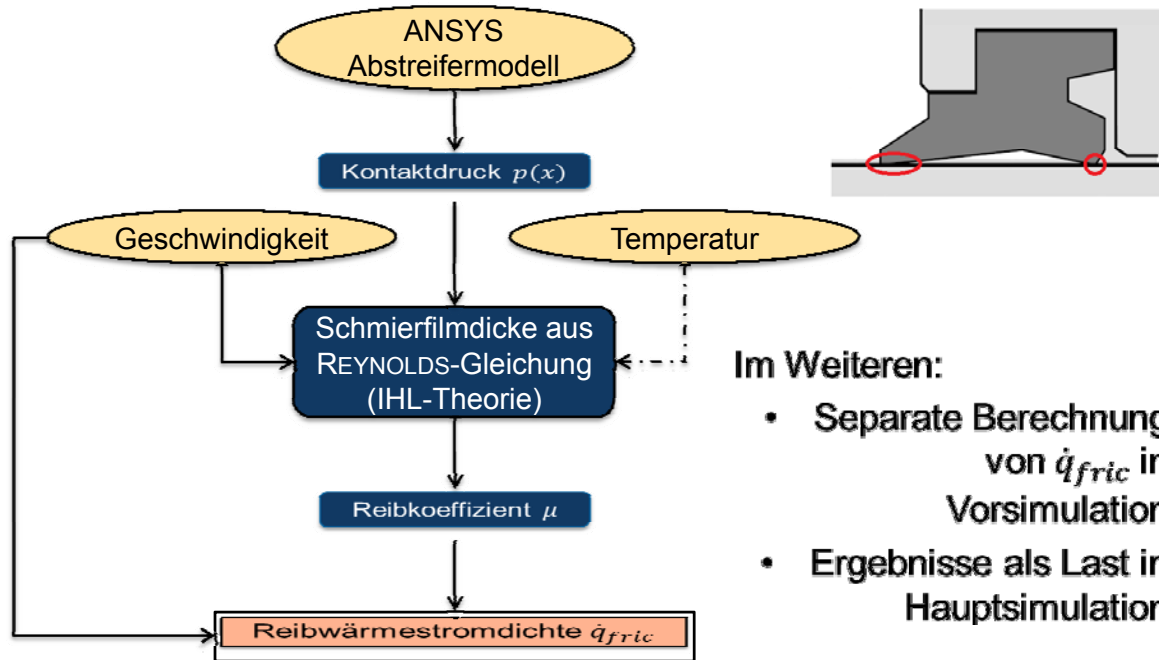
DA: BEISITZER – Analyse der Führungswagen an 2D-Modell

Ergebnisse - Temperaturverlauf und Rechenzeit



Variante	relativer Aufwand
Balkenumlauf	≈ 1505
Temp.-umlauf	≈ 159
Leitelement	≈ 46

DA: LEICHSENRING – Analyse des Abstreifers



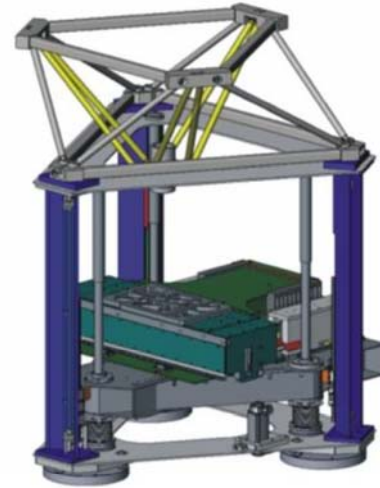
Inhalt



1. Thermische Analyse mithilfe der FEM
2. Detailuntersuchungen
3. Ausblick

Weitere geplante Untersuchungen

- **Numerik:**
 - Abhängigkeiten der Raum- und Zeitdiskretisierung von:
 - Lösungsverfahren
(generalisierte Trapezmethoden)
 - Modellparameter
 - Verfahrensgeschwindigkeit
 - etc...
 - Thermische Analysen mit Struktur-DOF's
 - Kopplung der unterschiedlichen Felder
- **Allgemein:**
 - Parametrierung/Abgleich/Validierung der Teilmodelle
 - Gesamtmodell des Versuchsträgers



16/17

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Haben Sie noch Fragen oder Anregungen?

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

17/17

MODULARISIERUNG DER DATENFLÜSSE UND ALGORITHMEN FÜR DIE STEUERUNGSINTEGRIERTE KORREKTUR THERMISCH BEDINGTER VERLAGERUNGEN IN WERKZEUGMASCHINEN

K. Großmann, Ch. Städel, A. Mühl; Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, TU Dresden

Im Vortrag wird aufbauend auf der thermo-elastischen Wirkungskette einer WZM das Verfahren zur strukturmodellbasierten Korrektur thermischer Fehler eingeführt und zunächst grob in folgende Blöcke strukturiert:

- Erfassung mechanisches Lastprofil
- Wärmestromberechnung
- ordnungsreduzierte FE-Temperaturfeldberechnung
- Verformungsfeldberechnung
- Positionsakutelle Fehlerkorrektur

Auf Basis dieser groben Strukturierung werden erforderliche Taktraten der Strukturblöcke abgeleitet. Hierauf erfolgt eine Zuordnung der als Tasks interpretierbaren Strukturblöcke in hochpriorisierte (NC-Kernnahe) sowie niedriger priorisierte Blöcke (Bild 1).

Anhand des Beispiels einer linear geführten Bett-Schlitten-Konfiguration wird eine Vorgehensweise zur Verknüpfung der Blöcke Lastprofil erfassung, Wärmestromberechnung und innerhalb des Blockes FE-Temperaturfeldberechnung der Lastbeaufschlagung abgeleitet. Schwerpunkte sind:

- Algorithmen zur thermisch äquivalenten Lastverteilung zur ersetzenden Abbildung der Strukturvariabilität relativ zueinander bewegter Baugruppen (Bild 2) und
- Ableitung und Darstellung einer Objektstruktur der o.g. Verknüpfung mit dem Ziel, Konventionen zu definieren, die eine Passfähigkeit der Lastprofil erfassung mit den ordnungsreduzierten thermischen FE-Modellen sicherstellen.

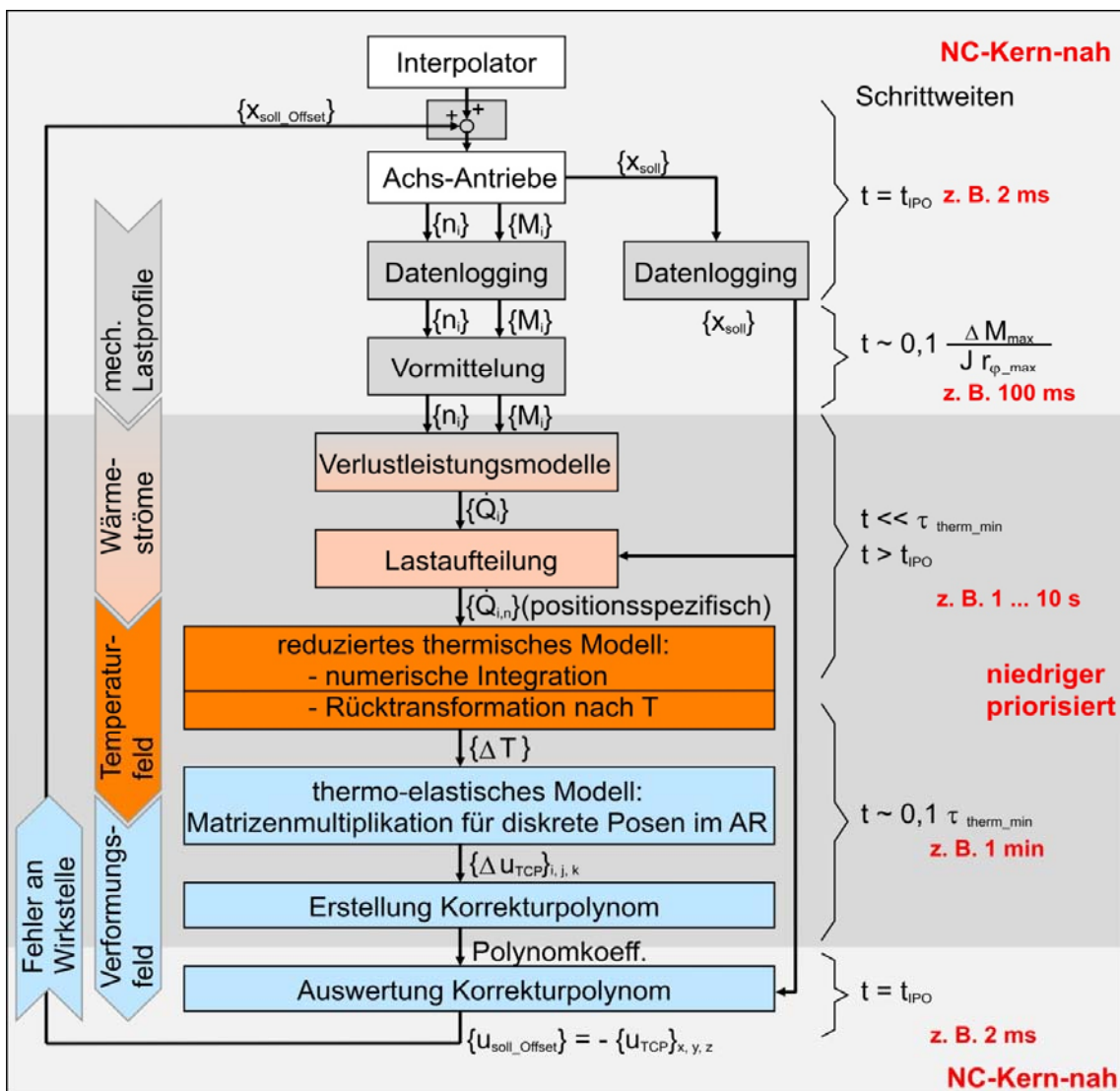


Bild 1: Grobstruktur Modularisierung mit Zeitanforderungen

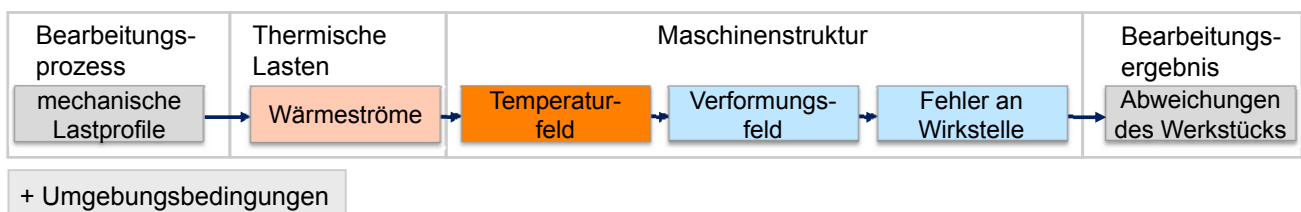
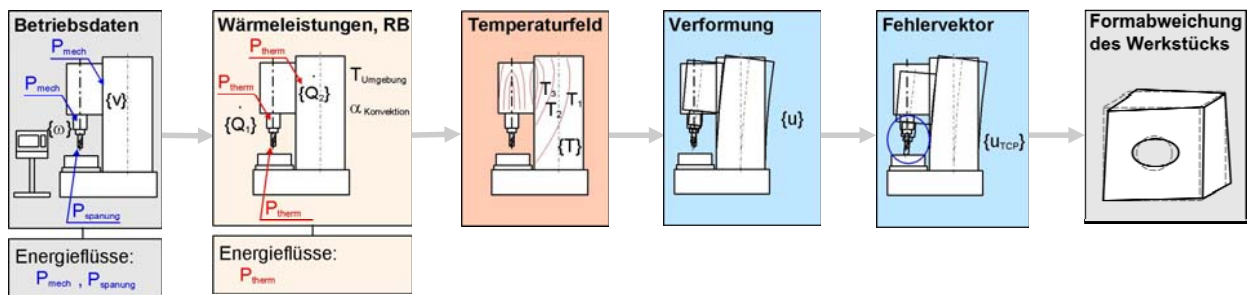
Modularisierung der Datenflüsse und Algorithmen für die
steuerungsintegrierte Korrektur thermisch bedingter Verlagerungen
in Werkzeugmaschinen

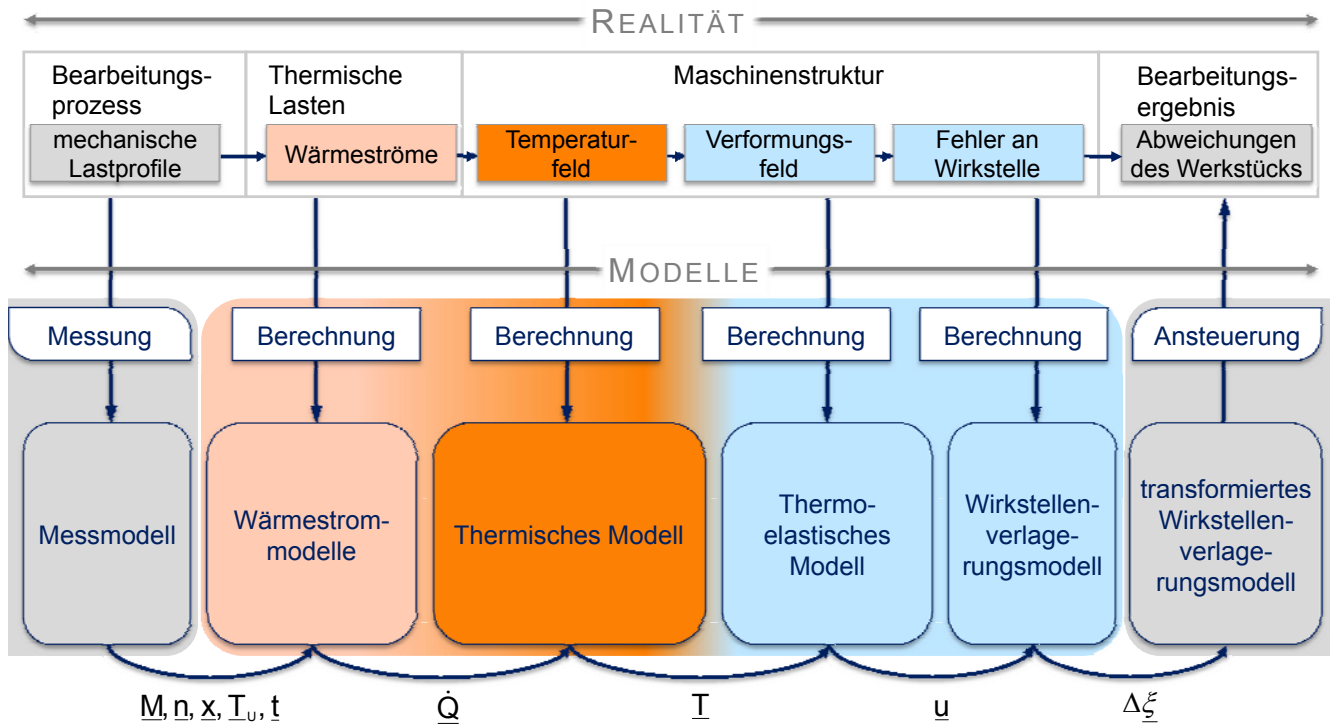
K. Großmann, A. Mühl, C. Stadel

(IWM, TU Dresden)

- 1. Thermische Wirkungskette und Konzept der Informationsverarbeitung der strukturmodellbasierten Korrektur**
 - 2. Anforderungen an die Teilmodelle der strukturmodellbasierten Korrektur**
 - 3. Zusammenfassende Strukturierung der Informationsverarbeitung**
-

1. **Thermische Wirkungskette und Konzept der Informationsverarbeitung der strukturmodellbasierten Korrektur**
2. *Anforderungen an die Teilmodelle der strukturmodellbasierten Korrektur*
3. *Zusammenfassende Strukturierung der Informationsverarbeitung*

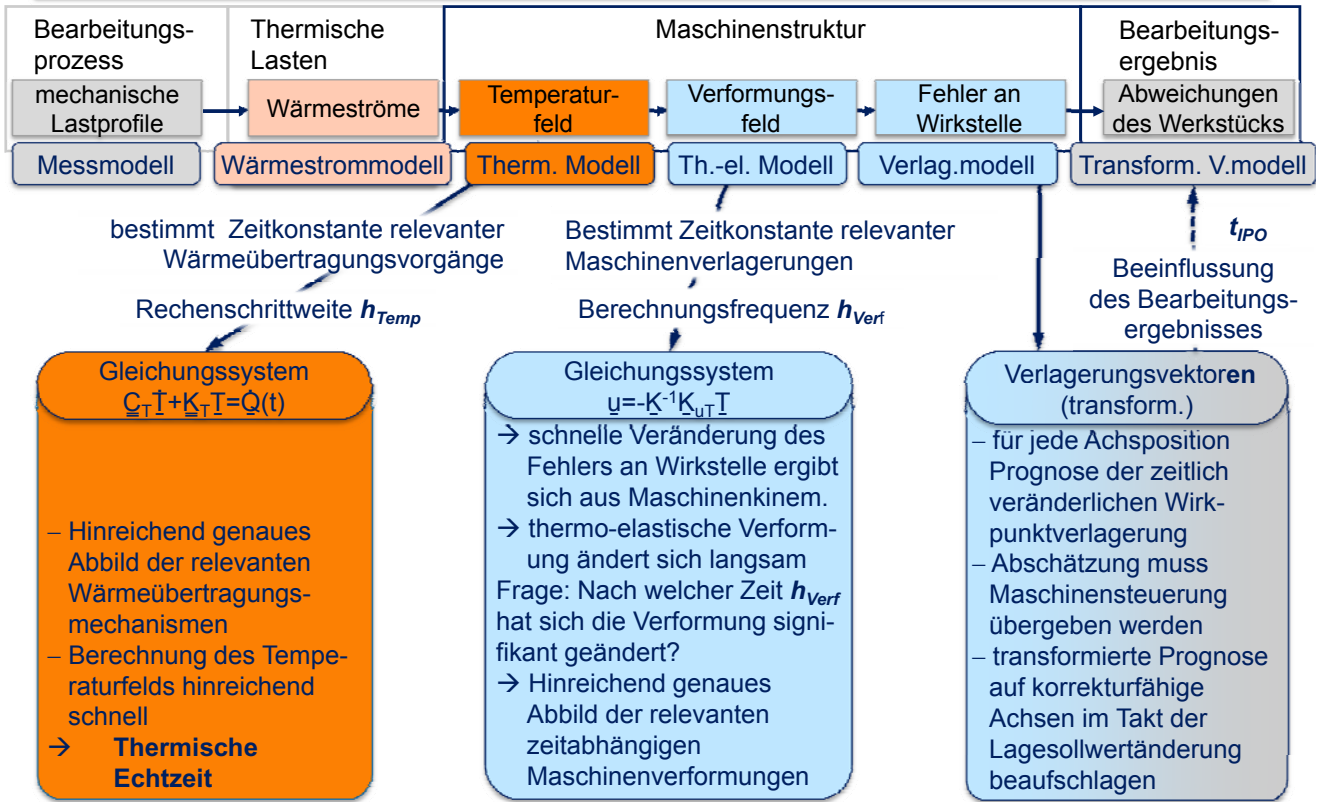




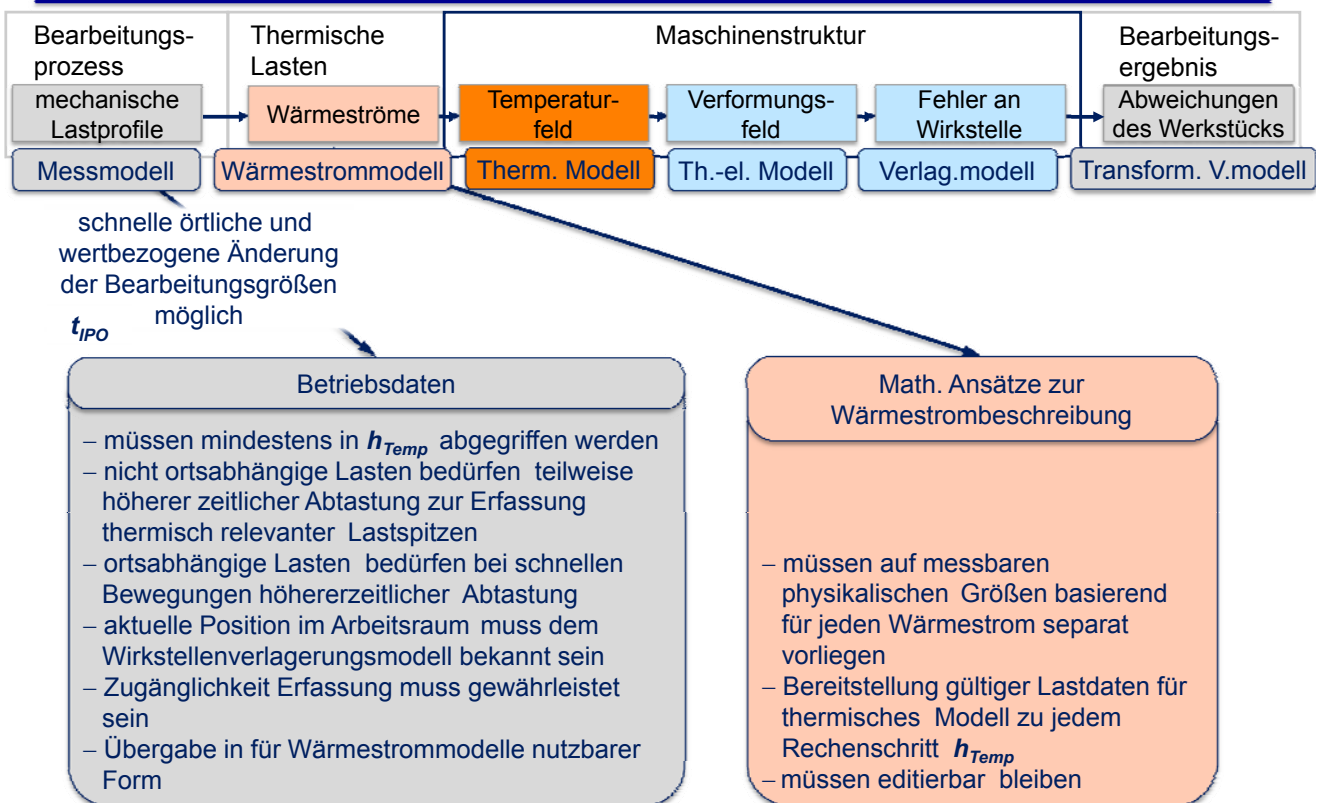
Numerische und mathematische Beschreibung der realen Vorgänge

5

1. *Thermische Wirkungskette und Konzept der Informationsverarbeitung der strukturmodellbasierten Korrektur*
2. **Anforderungen an die Teilmodelle der strukturmodellbasierten Korrektur**
3. *Zusammenfassende Strukturierung der Informationsverarbeitung*

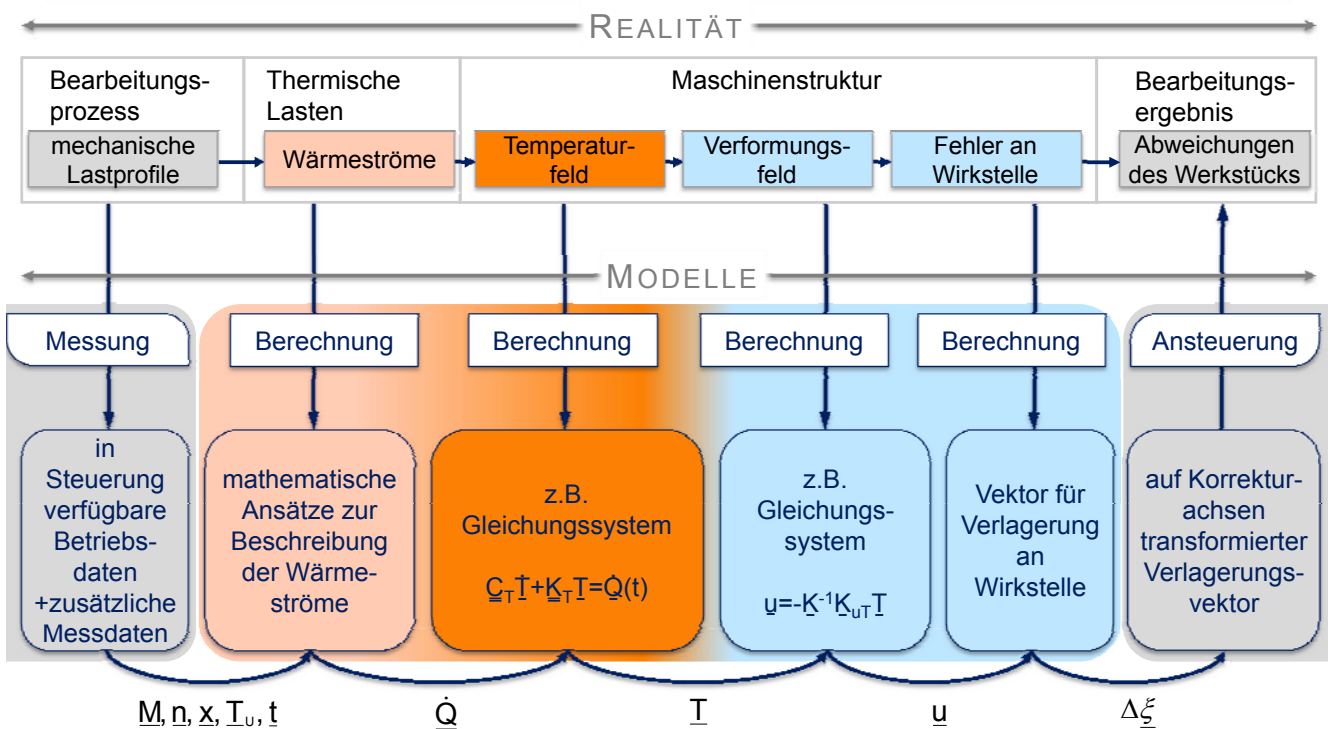


Anforderungen an und durch den Verlagerungsvektor der Wirkstelle



Anforderungen an und durch das Gleichungssystem des thermisches Modells

1. *Thermische Wirkungskette und Konzept der Informationsverarbeitung der strukturmodellbasierten Korrektur*
2. *Anforderungen an die Teilmodelle der strukturmodellbasierten Korrektur*
3. **Zusammenfassende Strukturierung der Informationsverarbeitung**



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

SFB/TR 96, Teilprojekt B07



DFG

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.
