TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

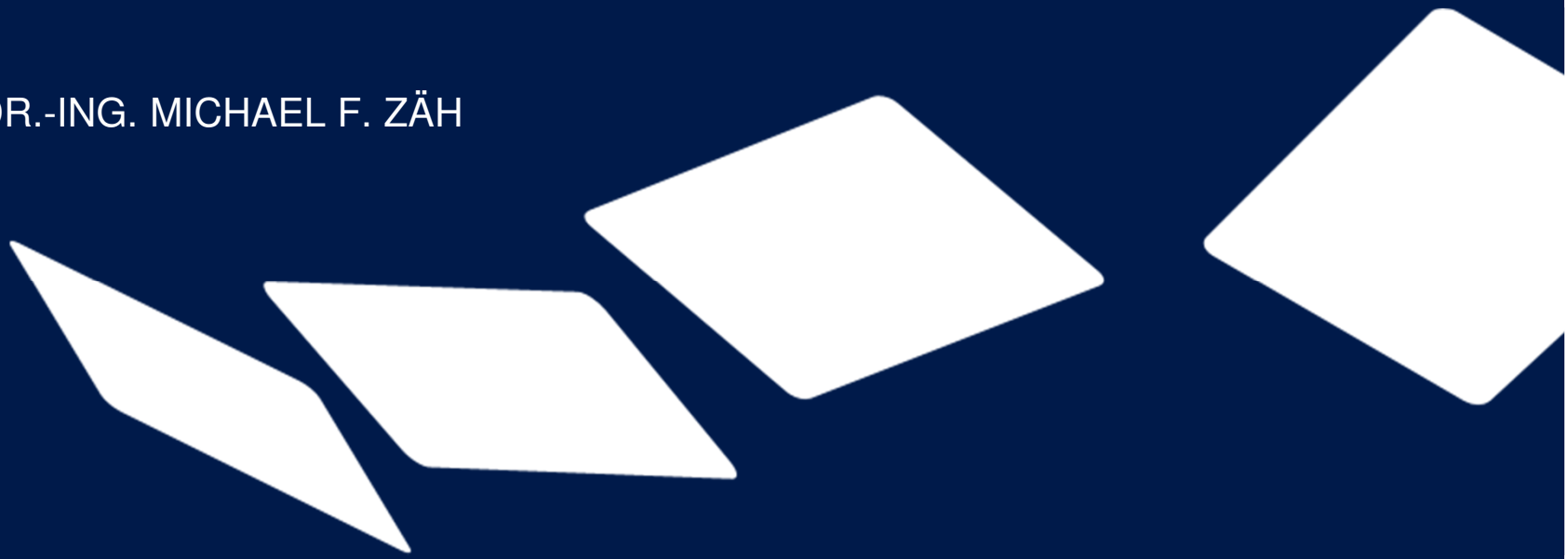
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

iwb

DIE WERKZEUGMASCHINE DER ZUKUNFT

EXPERTENFORUM
AUTOMATISIERUNG VON WERKZEUGMASCHINEN
GERSTHOFEN, 28.6.2013

PROF. DR.-ING. MICHAEL F. ZÄH



Gliederung

1. Das *iwb* und unsere Forschungsbiete an der TU München
2. Die Werkzeugmaschine der Zukunft
3. Zusammenfassung

Gliederung

1. Das *iwb* und unsere Forschungsbiete an der TU München
2. Die Werkzeugmaschine der Zukunft
3. Zusammenfassung

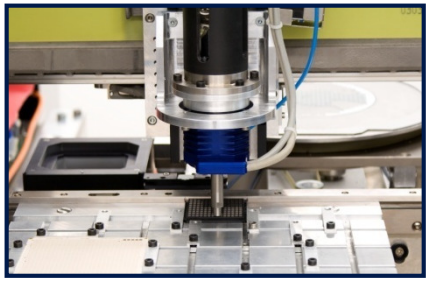
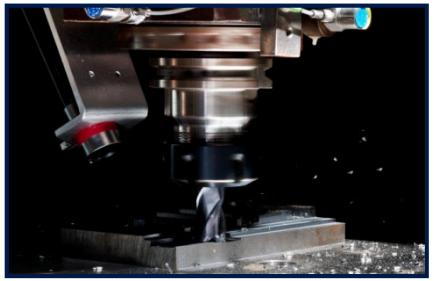
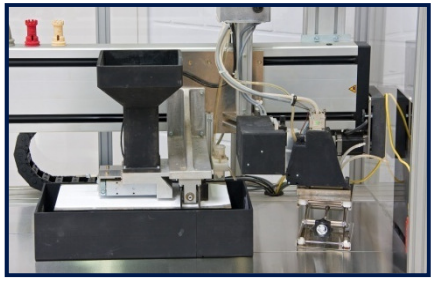
Forschungsgelände Garching

Forschungsgebiete

Unternehmensplanung
und -organisation

Maschinen und
Anlagen

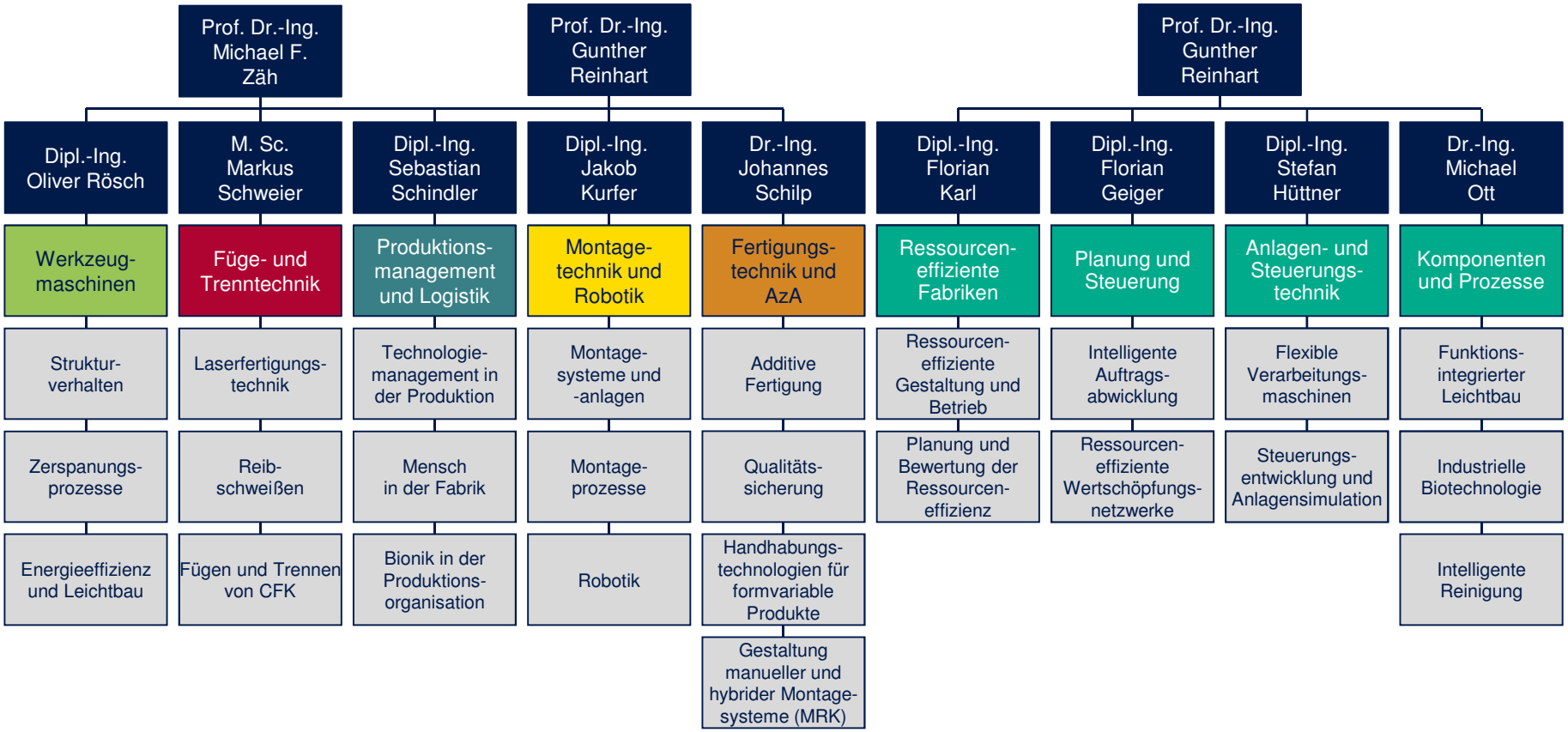
Fertigungs- und
Montagetechnologie

Organisation des iwb

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Forschungsstruktur des *iwb*



© *iwb* 2011

Versuchshalle

Gliederung

1. Das *iwb* und unsere Forschungsbiete an der TU München
2. **Die Werkzeugmaschine der Zukunft**
3. Zusammenfassung

**Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften**
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

… sieht äußerlich nicht anders aus als heute, …

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

… sieht äußerlich nicht anders aus als heute, jedoch …

… sie ermöglicht Hybridprozesse,
… sie verkürzt Prozessketten,
… sie ist dynamisch ausgereift und stark bedämpft,
… sie ist mit adaptronischen Funktionen ausgestattet,
… sie ist unempfindlich gegenüber thermischer Last,
… sie ist multitechnologiefähig und
… sie wird unter Zuhilfenahme von Simulation entwickelt.

Diesen Punkten widmen sich konsequent die Arbeiten des *iwb* innerhalb der Themengruppe „Werkzeugmaschinen“.

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

… sieht äußerlich nicht anders aus als heute, jedoch …

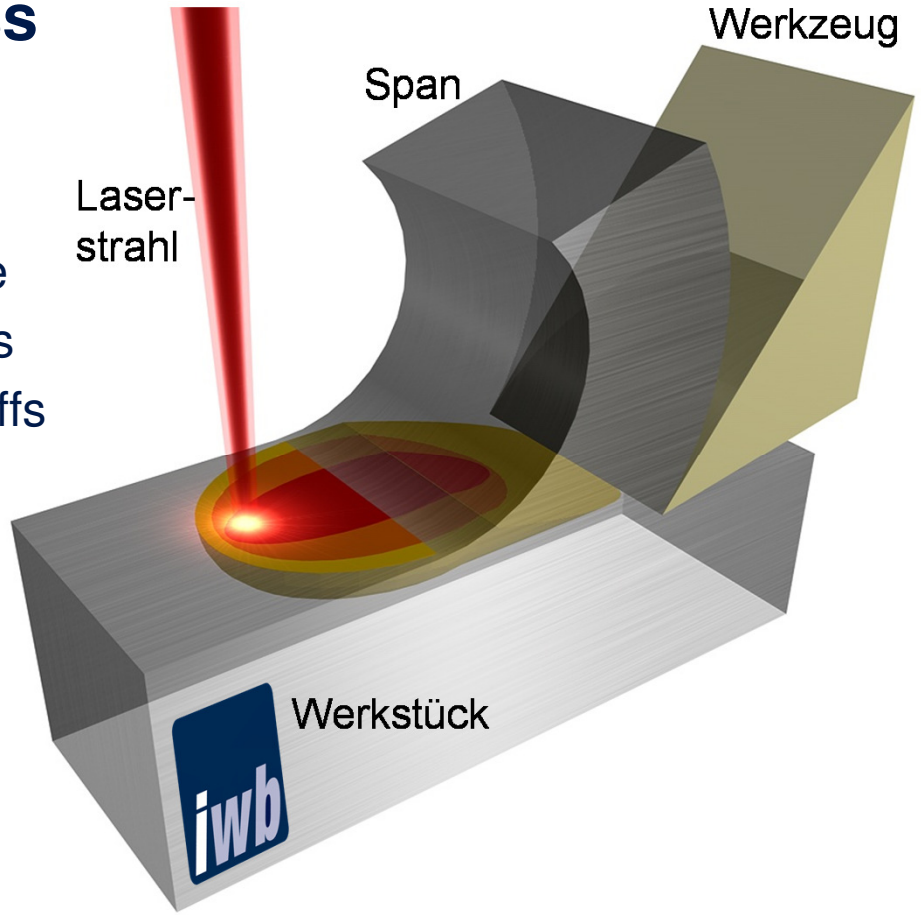
… sie ermöglicht Hybridprozesse,
… sie verkürzt Prozessketten,
… sie ist dynamisch ausgereift und stark bedämpft,
… sie ist mit adaptronischen Funktionen ausgestattet,
… sie ist unempfindlich gegenüber thermischer Last,
… sie ist multitechnologiefähig und
… sie wird unter Zuhilfenahme von Simulation entwickelt.

Diesen Punkten widmen sich konsequent die Arbeiten des *iwb* innerhalb der Themengruppe „Werkzeugmaschinen“.

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Hybrider Warmzerspanungsprozess

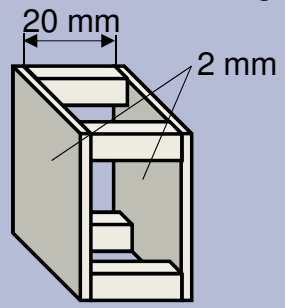
- Laserbestrahlung der Zerspanzone
- Lokale Entfestigung des Werkstoffs
- Abheben des entfestigten Werkstoffs



Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

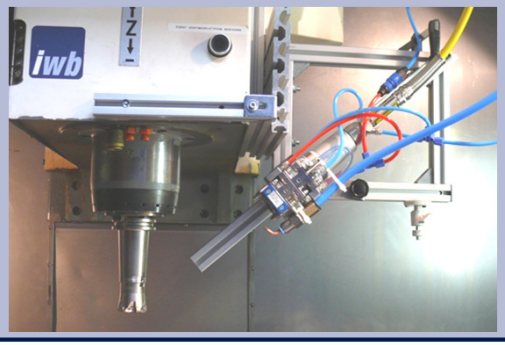
Entwicklung der Systemtechnik

Lasersicherheit
- Belastungsanalyse
- Standzeituntersuchungen



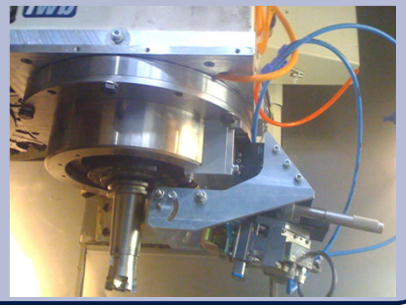
Voraussetzung

Einfache Integration
- Bearbeitungsoptik



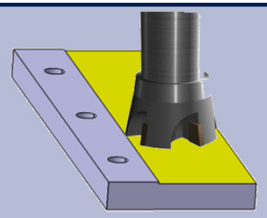
Weiterentwicklung

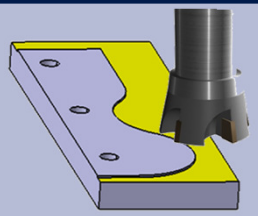
Lasernachführung
- Bearbeitungsoptik
- Torque-Motor
- Umlenkspiegel



Fräsparameter **Laserparameter**

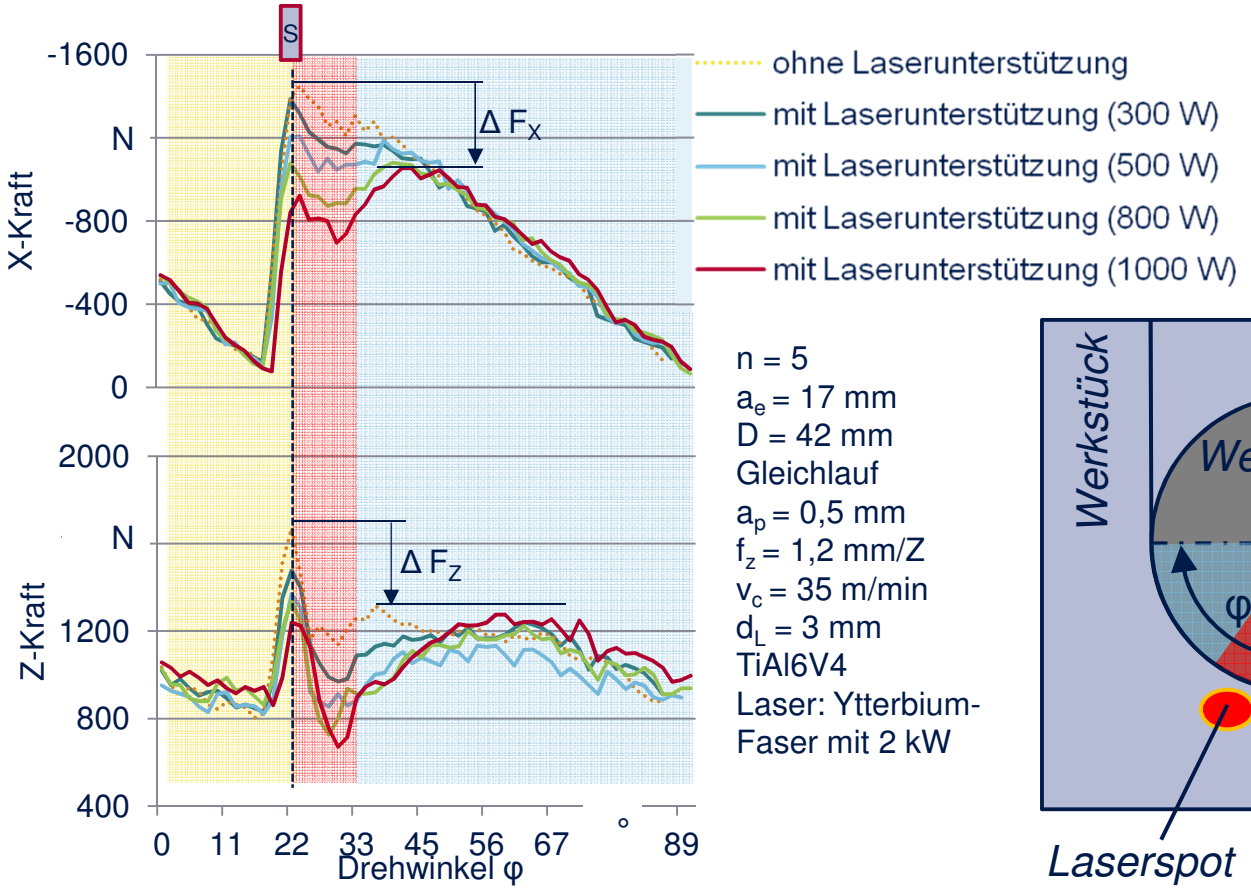
Laserunterstützte Fräsbearbeitung
- Fräsen von geraden Bahnen (2-dimensional)
- Fräsen von komplexen Bahnen (3-dimensional)



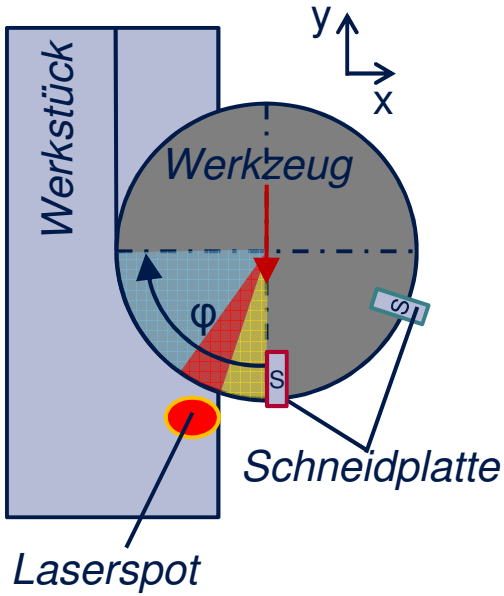


Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Kraftmessungen beim laserunterstützten Fräsen



n = 5
a_e = 17 mm
D = 42 mm
Gleichlauf
a_p = 0,5 mm
f_z = 1,2 mm/Z
v_c = 35 m/min
d_L = 3 mm
TiAl6V4
Laser: Ytterbium-Faser mit 2 kW



Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

… sieht äußerlich nicht anders aus als heute, jedoch …

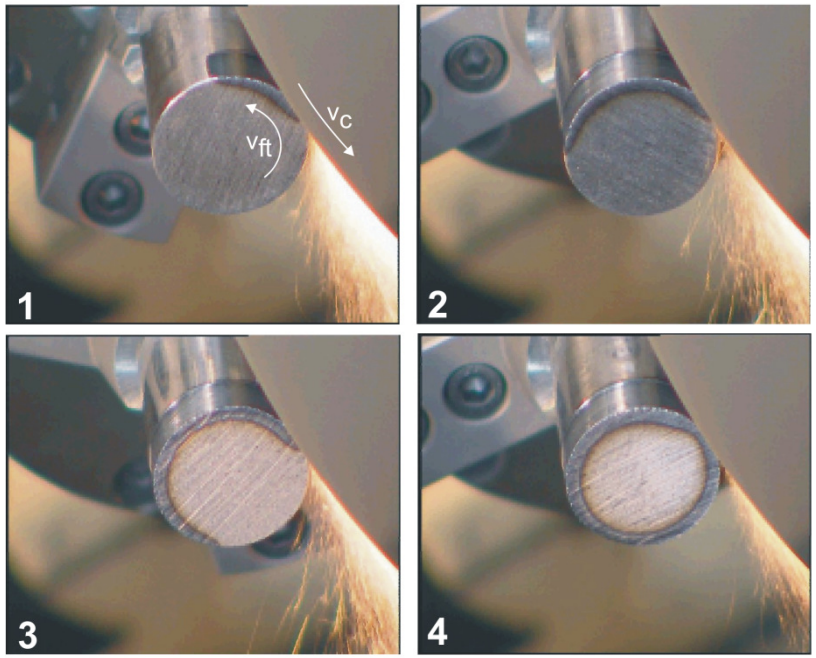
… sie ermöglicht Hybridprozesse,
… sie verkürzt Prozessketten,
… sie ist dynamisch ausgereift und stark bedämpft,
… sie ist mit adaptronischen Funktionen ausgestattet,
… sie ist unempfindlich gegenüber thermischer Last,
… sie ist multitechnologiefähig und
… sie wird unter Zuhilfenahme von Simulation entwickelt.

Diesen Punkten widmen sich konsequent die Arbeiten des *iwb* innerhalb der Themengruppe „Werkzeugmaschinen“.

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Schleifhärteprozess – Prozessenergie effizient nutzen

Außenrund-Schleifhärteprozess



Prozessvorteile

- Randschichthärtung durch die spanende Bearbeitung

- Eliminierung zeitintensiver Härteverfahren

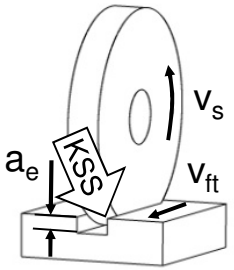
- Geringere Stückkosten

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Verknüpfung der System-/Stell- mit den Ergebnisgrößen

Systemgrößen

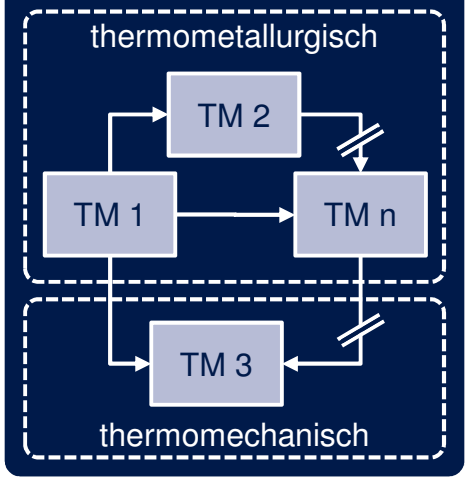
- Kühlschmierstoff
- Schleifscheibe
- Werkstück
- Werkstoff
- (Maschine)



Stellgrößen

- Schnittparameter
- KSS-Volumenstrom

Teilmodelle

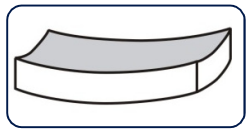


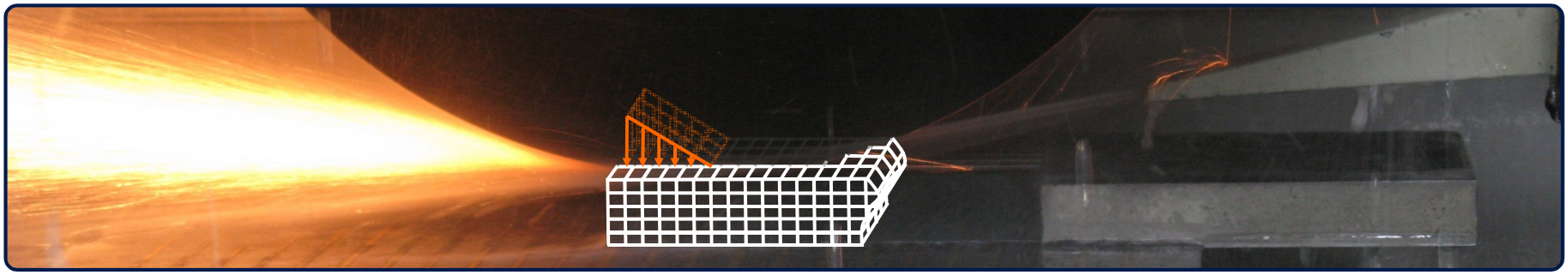
Ergebnisgrößen

Werkstück

Einhärtung

Verzug

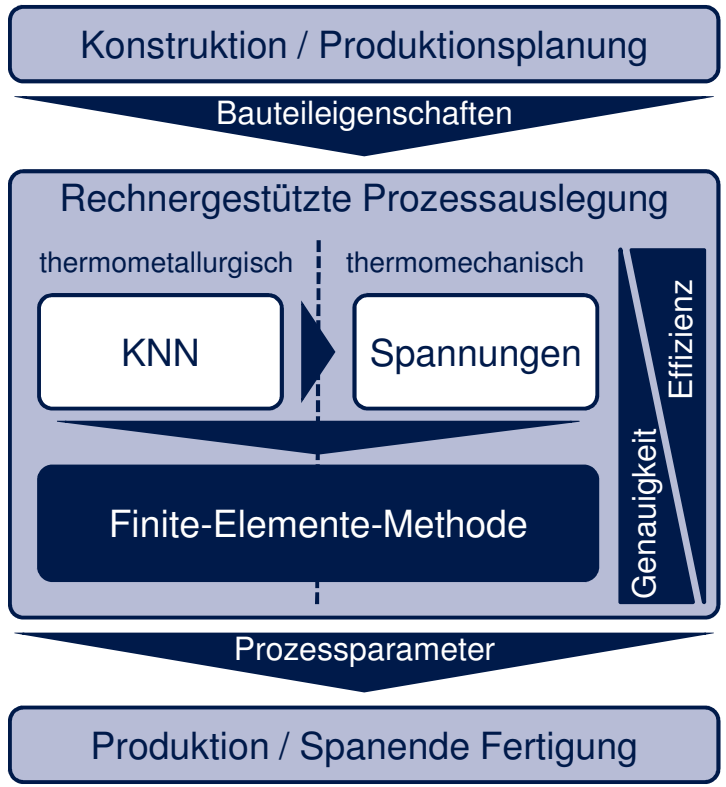




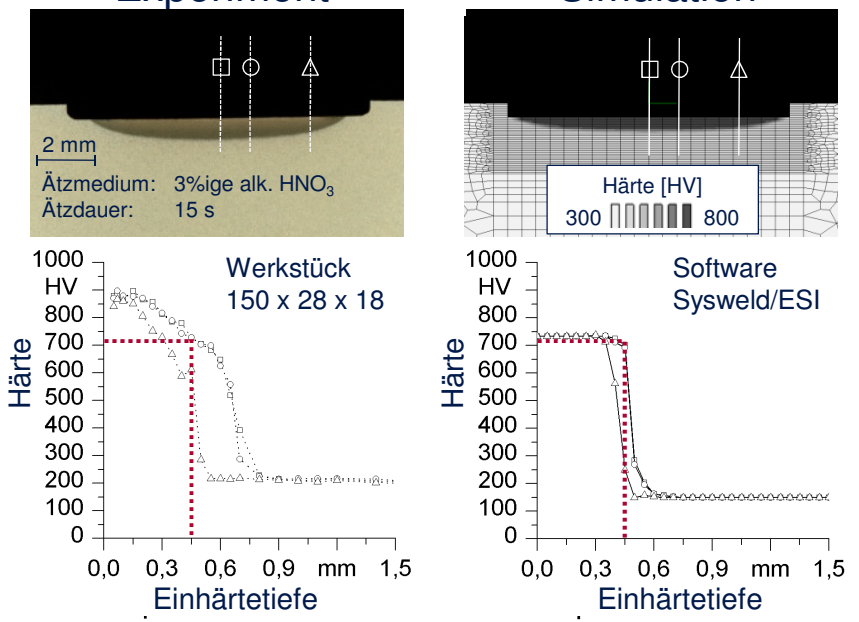
Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Finite-Elemente-Methode zur genauen Prozessauslegung

Simulationsmethode



Einhärtetiefe



Parameter:
Werkstoff 100Cr6
v_{ft} = 0,6 m/min
Q'_w = 5 mm³/mm·s
v_s = 35 m/s
a_e = 0,5 mm

Schleifscheibe:
Korundscheibe
b_s = 10 mm
d_s = 400 mm

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

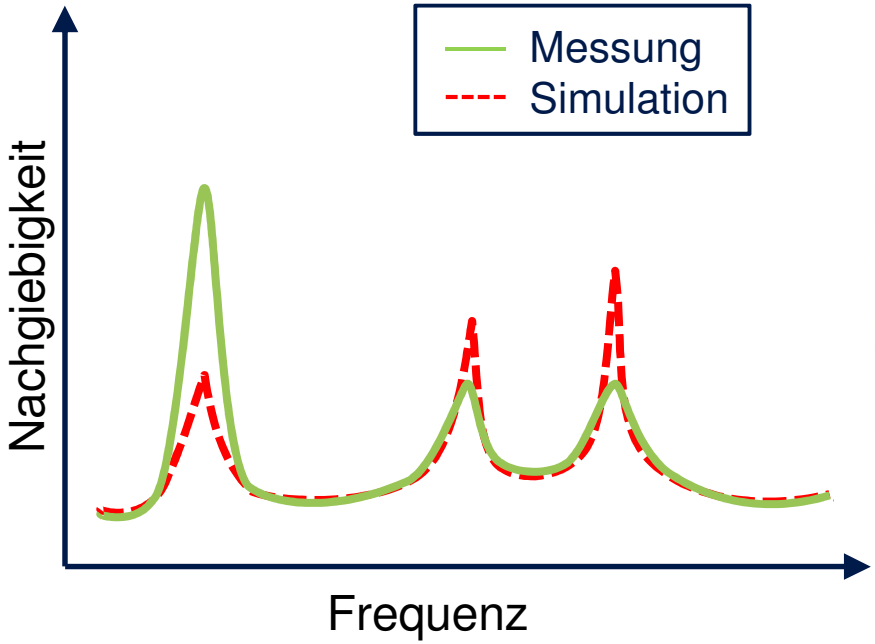
… sieht äußerlich nicht anders aus als heute, jedoch …

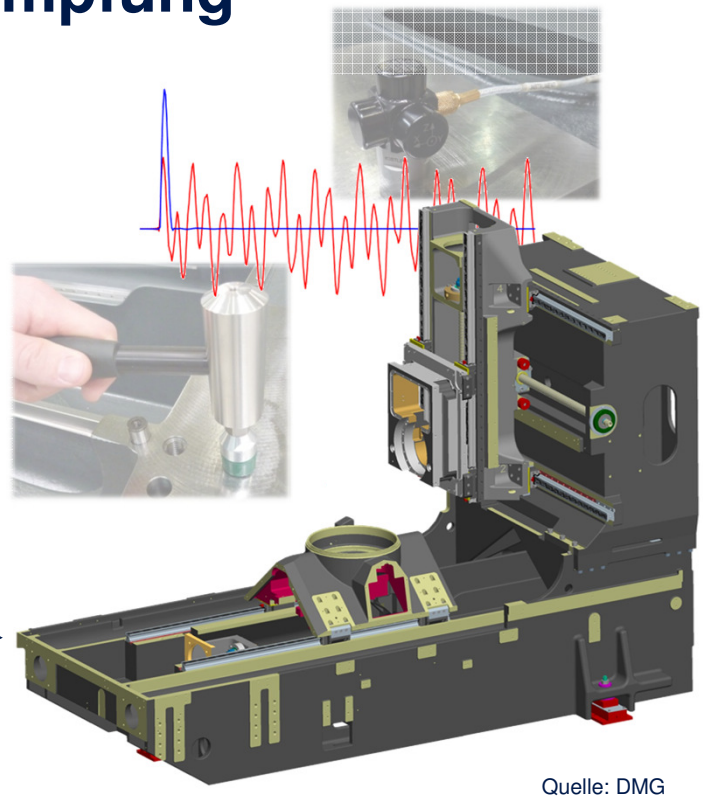
… sie ermöglicht Hybridprozesse,
… sie verkürzt Prozessketten,
… sie ist dynamisch ausgereift und stark bedämpft,
… sie ist mit adaptronischen Funktionen ausgestattet,
… sie ist unempfindlich gegenüber thermischer Last,
… sie ist multitechnologiefähig und
… sie wird unter Zuhilfenahme von Simulation entwickelt.

Diesen Punkten widmen sich konsequent die Arbeiten des *iwb* innerhalb der Themengruppe „Werkzeugmaschinen“.

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Hohe Unsicherheiten bzgl. Dämpfung



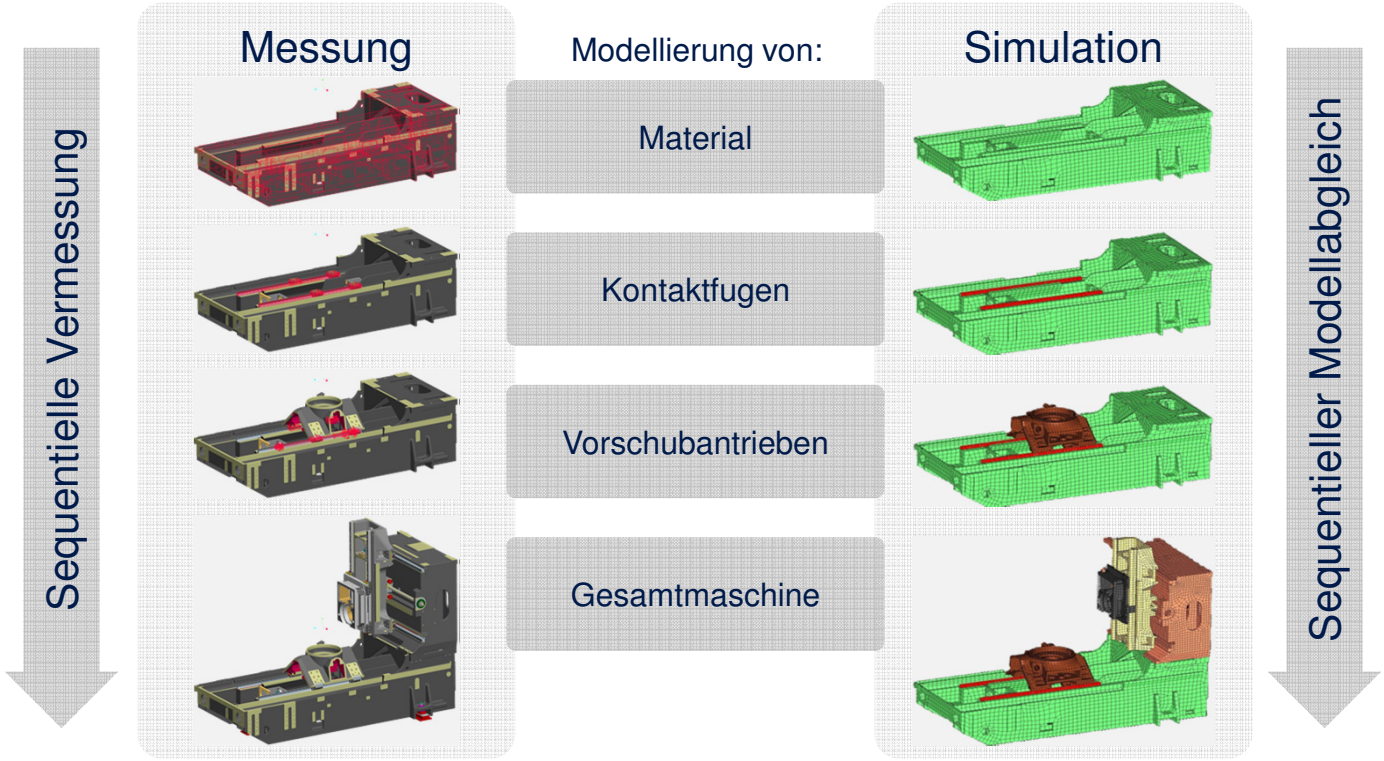


Quelle: DMG

Ziel: Systematische Berücksichtigung der Dämpfung in der konstruktionsbegleitenden Berechnung der dynamischen Eigenschaften

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Aufbau von Messobjekt und Simulationsmodell



Ansatz zur Ermittlung und Abbildung lokaler Dämpfungsanteile

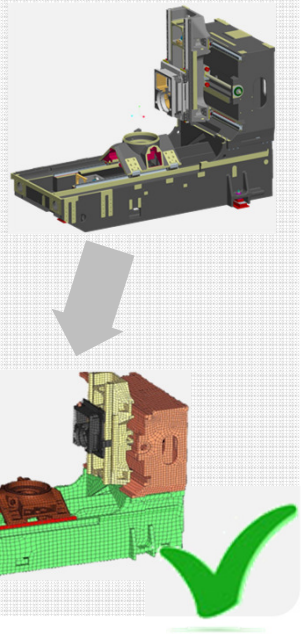
Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Bisherige Ergebnisse und weitere Schritte

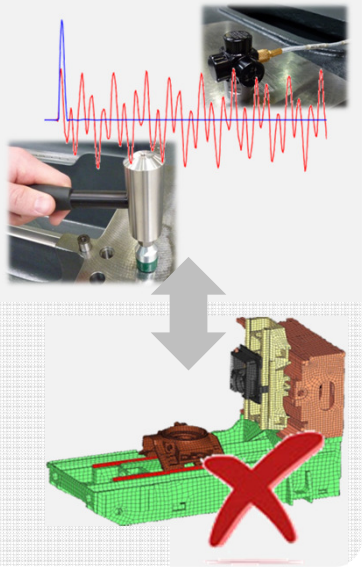
Auswahl und Beschaffung eines geeigneten Versuchsträgers

Erarbeitung einer Methodik zur korrekten Messung von Dämpfung

Aufbau der Simulationsmodelle mit Hilfe der FEM



Durchführung von Messungen und Abgleich mit der Simulation



Erledigte und noch offene Arbeiten

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

… sieht äußerlich nicht anders aus als heute, jedoch …

… sie ermöglicht Hybridprozesse,
… sie verkürzt Prozessketten,
… sie ist dynamisch ausgereift und stark bedämpft,
… sie ist mit adaptronischen Funktionen ausgestattet,
… sie ist unempfindlich gegenüber thermischer Last,
… sie ist multitechnologiefähig und
… sie wird unter Zuhilfenahme von Simulation entwickelt.

Diesen Punkten widmen sich konsequent die Arbeiten des *iwb* innerhalb der Themengruppe „Werkzeugmaschinen“.

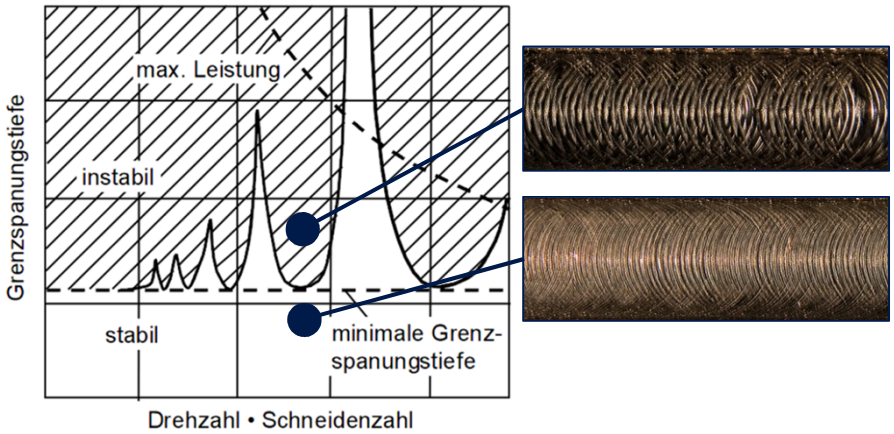
Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Marktanforderungen

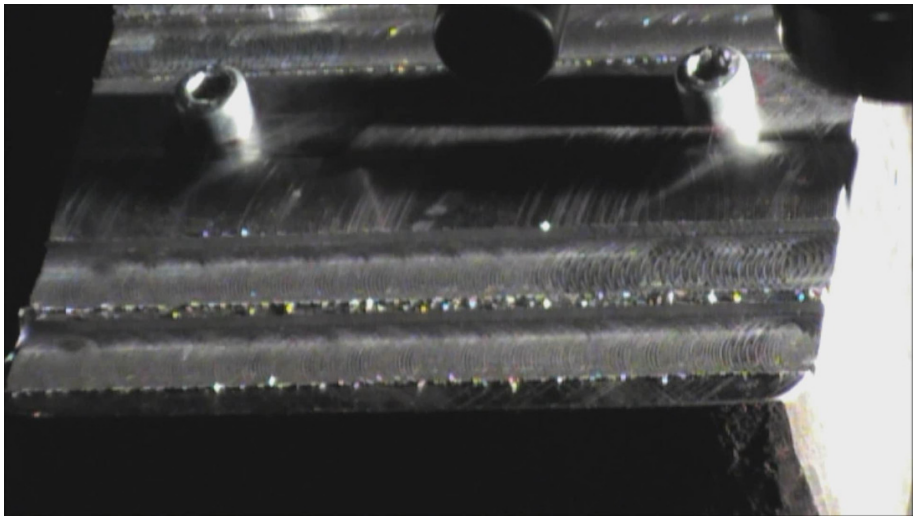
- Größere Zerspanleistungen und Zeitspanvolumina
- Bearbeitung innovativer, schwer zerspanbarer Werkstoffe

Leistungsbeschränkung von Werkzeugmaschinen

Stabilitätskarte einer Werkzeugmaschine



Zerspanversuch an einer Portalfräsmaschine



Ziel: Erhöhung der dynamischen Stabilitätsgrenze

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Offene Fragestellungen

Fragestellung 1

Wo ist sind Aktoren in die Struktur zu integrieren, um mit möglichst wenig Hilfsenergie möglichst viel zu bewirken?

Fragestellung 2

Wie können Aktoren bei varianten Einflussgrößen optimal betrieben werden?

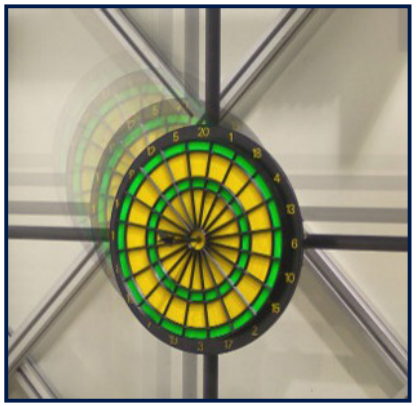
Zielsetzung

Zielsetzung 1

Systematik zur Auslegung aktiver Zusatzsysteme
(Berechnungsmethode zur Ermittlung günstiger **Aktor-Positionen**)

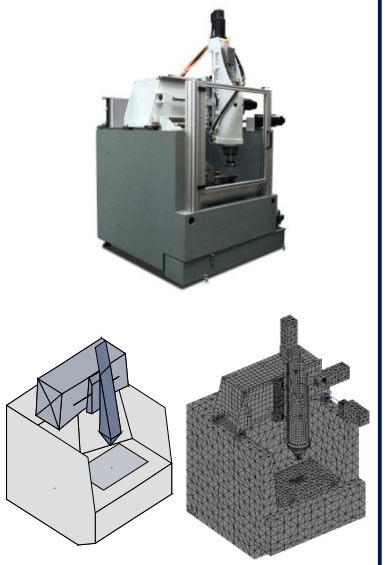
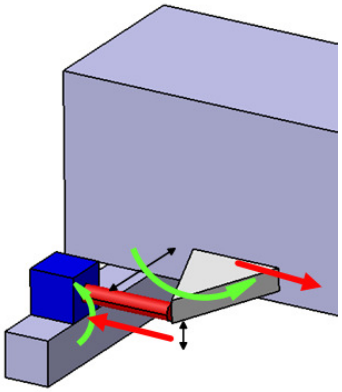
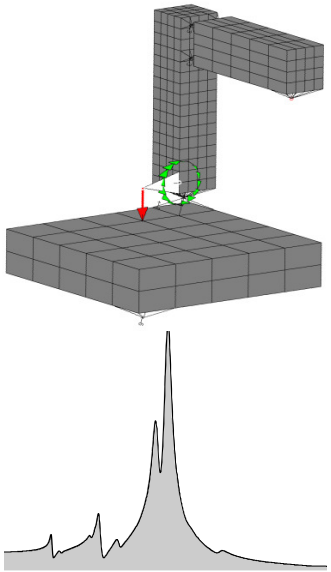
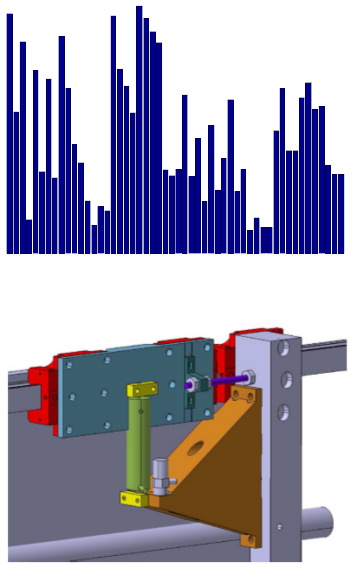
Zielsetzung 2

Entwicklung einer **adaptiven Regelung**



Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Systematische Vorgehensweise

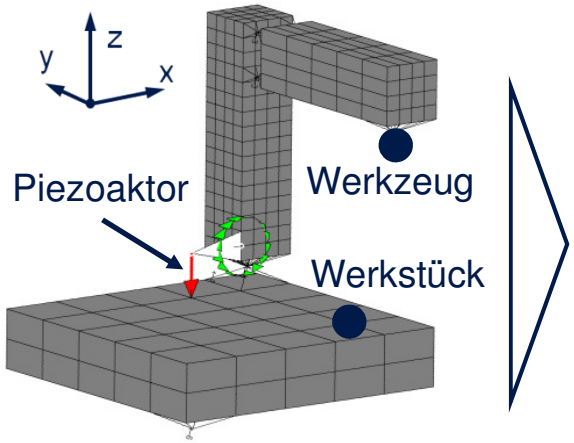
Abstraktion der realen Maschinenstruktur	Definition der Rand-bedingungen	Berechnung aller Konfigurationen	Lösungs-auswahl und Umsetzung
	 • Geometrische Randbedingungen (Freiheitsgrade, Abmessungen) • Führungen		

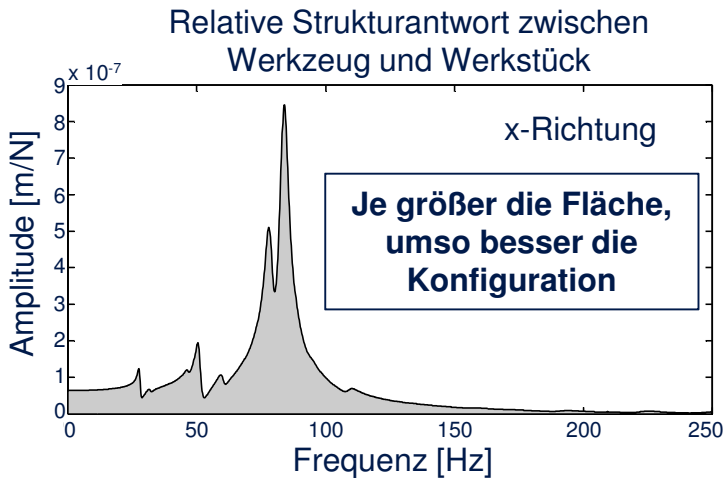
Das Vorgehen ist Basis für die Struktur des implementierten Softwaretools.

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Berechnung aller Konfigurationen

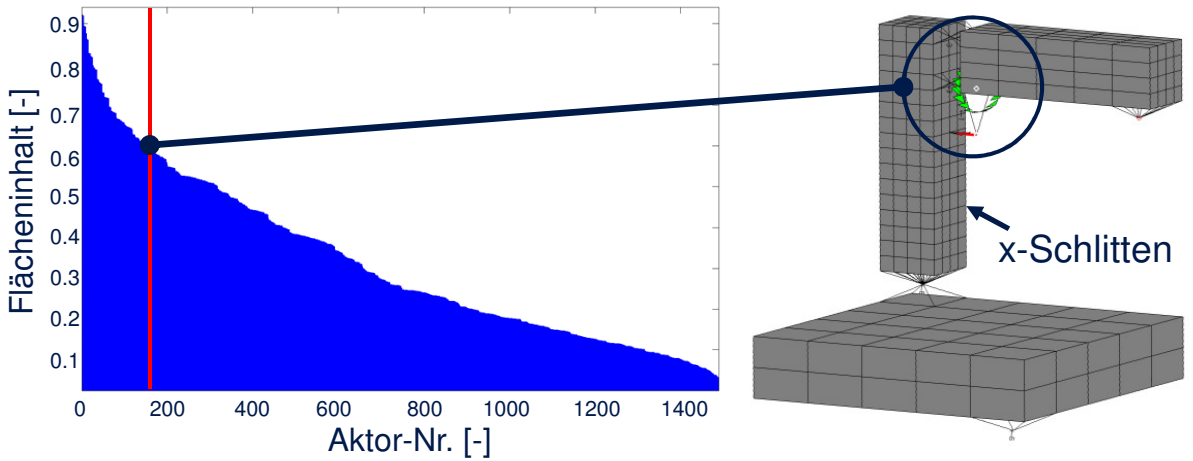
- **Anregung**:
  Kraft des Aktors auf die Struktur
- **Antwort**:
  Relative Verlagerung zwischen Werkzeug und Werkstück





Lösungsauswahl

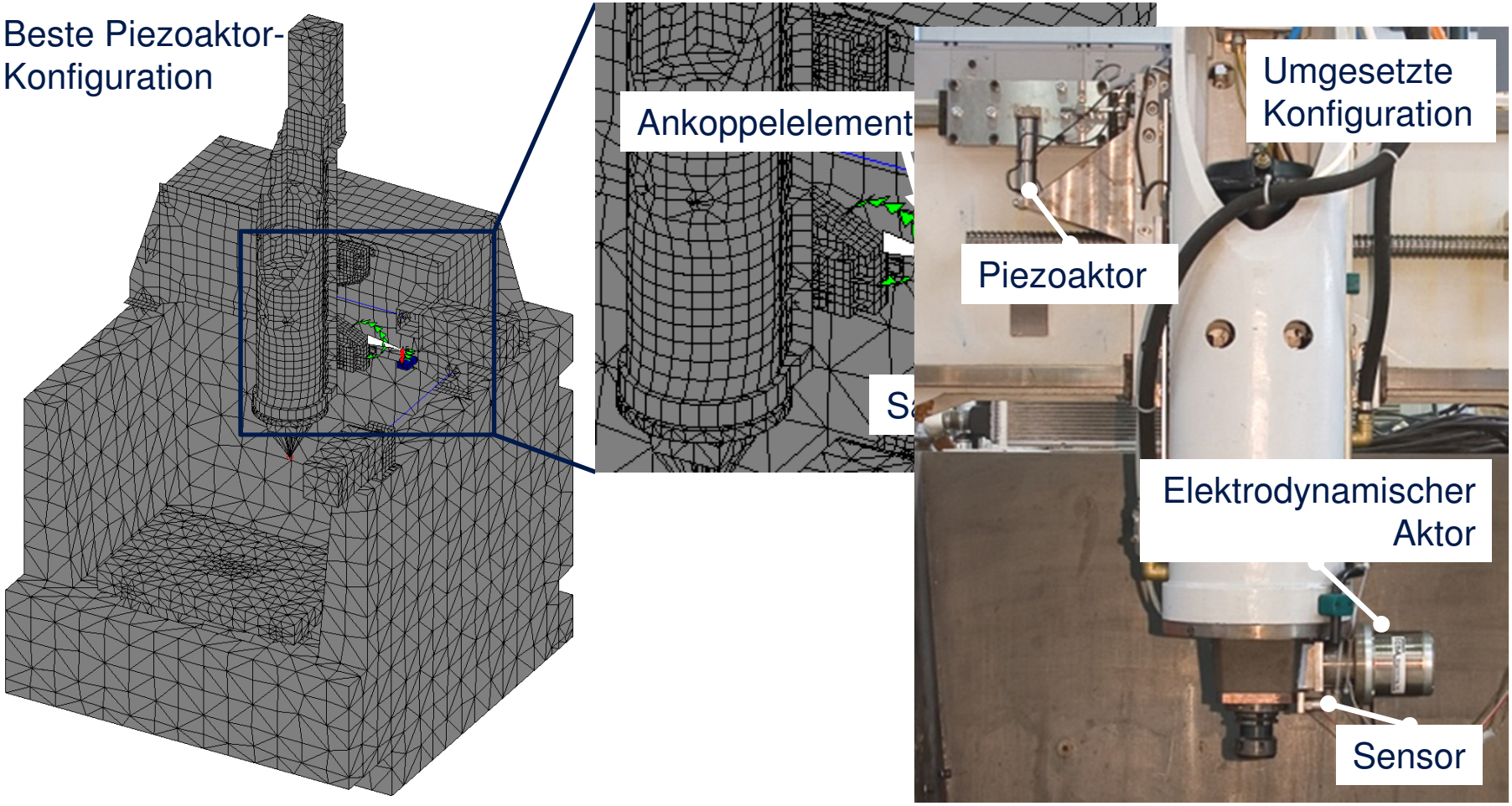
- Quantifizierung der Flächeninhalte
- Sortierung der Lösungen unter Berücksichtigung definierter Randbedingungen
- Auswahl durch den Anwender



Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Anwendungsbeispiel Portalfräsmaschine

Beste Piezoaktor-Konfiguration



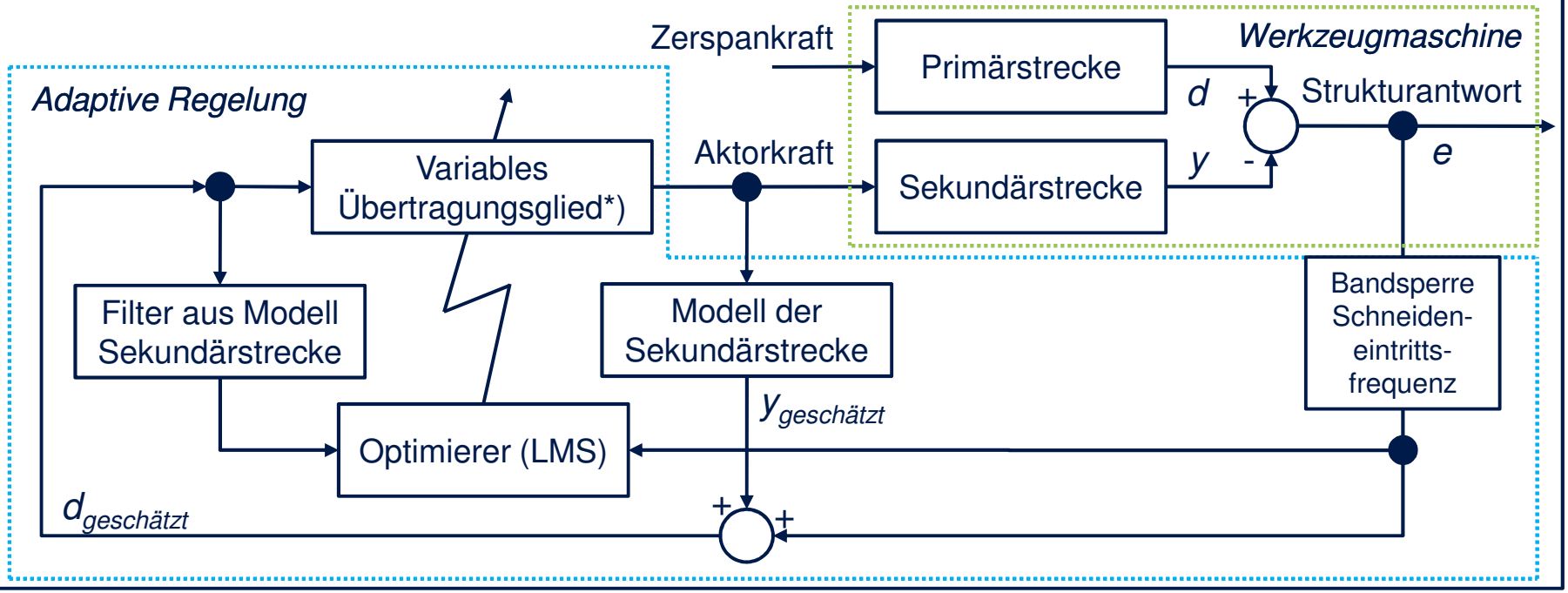
Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Entwicklung einer adaptiven Regelstrategie

Anforderungen

- Selbstständige Anpassung des Reglers an die aktuelle Störung
- Berücksichtigung veränderlicher Maschineneigenschaften

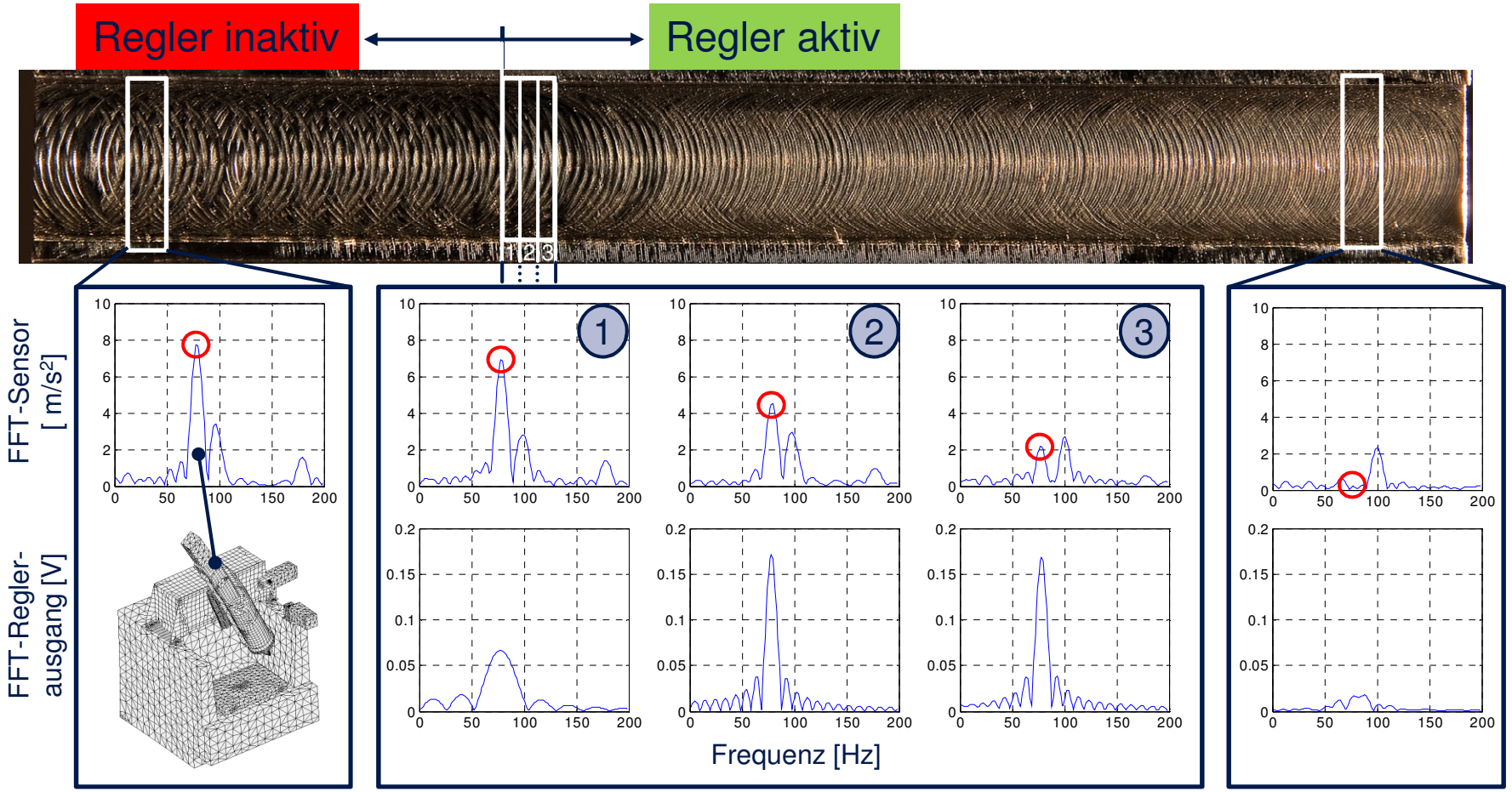
Umsetzung



*) repliziert inv. Sekundärstrecke nur an relevanten Frequenzstützstellen

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Versuchsergebnisse mit adaptiver Regelung



Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

… sieht äußerlich nicht anders aus als heute, jedoch …

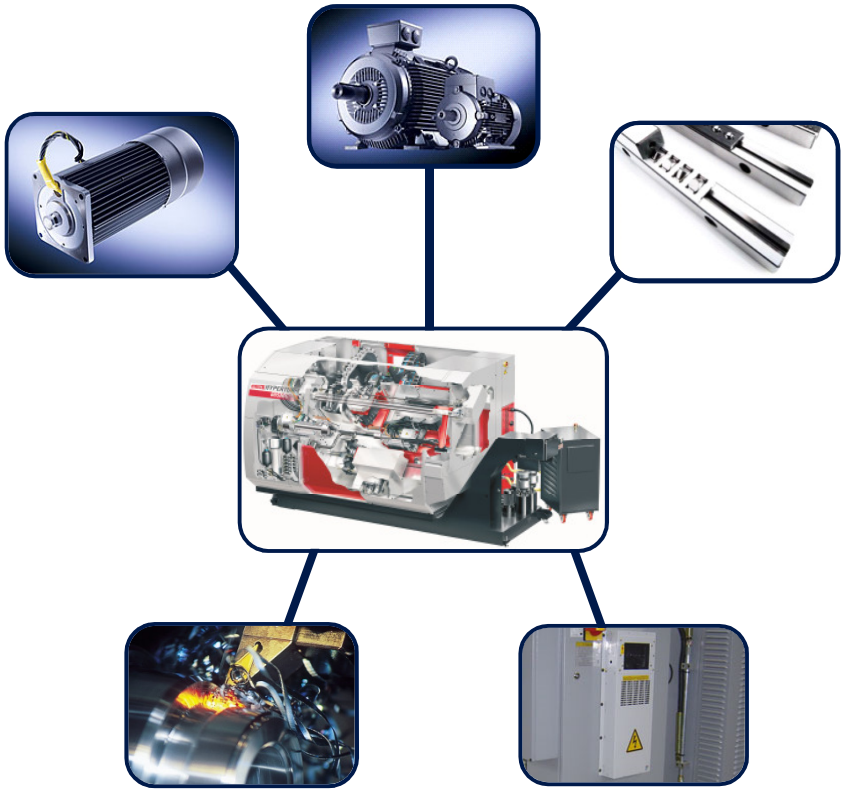
… sie ermöglicht Hybridprozesse,
… sie verkürzt Prozessketten,
… sie ist dynamisch ausgereift und stark bedämpft,
… sie ist mit adaptronischen Funktionen ausgestattet,
… sie ist unempfindlich gegenüber thermischer Last,
… sie ist multitechnologiefähig und
… sie wird unter Zuhilfenahme von Simulation entwickelt.

Diesen Punkten widmen sich konsequent die Arbeiten des *iwb* innerhalb der Themengruppe „Werkzeugmaschinen“.

Thermische Simulation
Ausgangssituation

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Wärmequellen



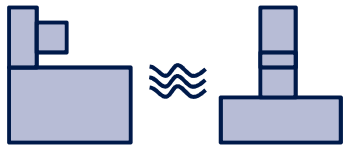
Umgebungsrandbedingungen

Jahreszeitbedingte Temperatur-schwankungen

Tag-Nacht-Zyklen

Sonneneinstrahlung, Heizkörper, Klima-anlagen

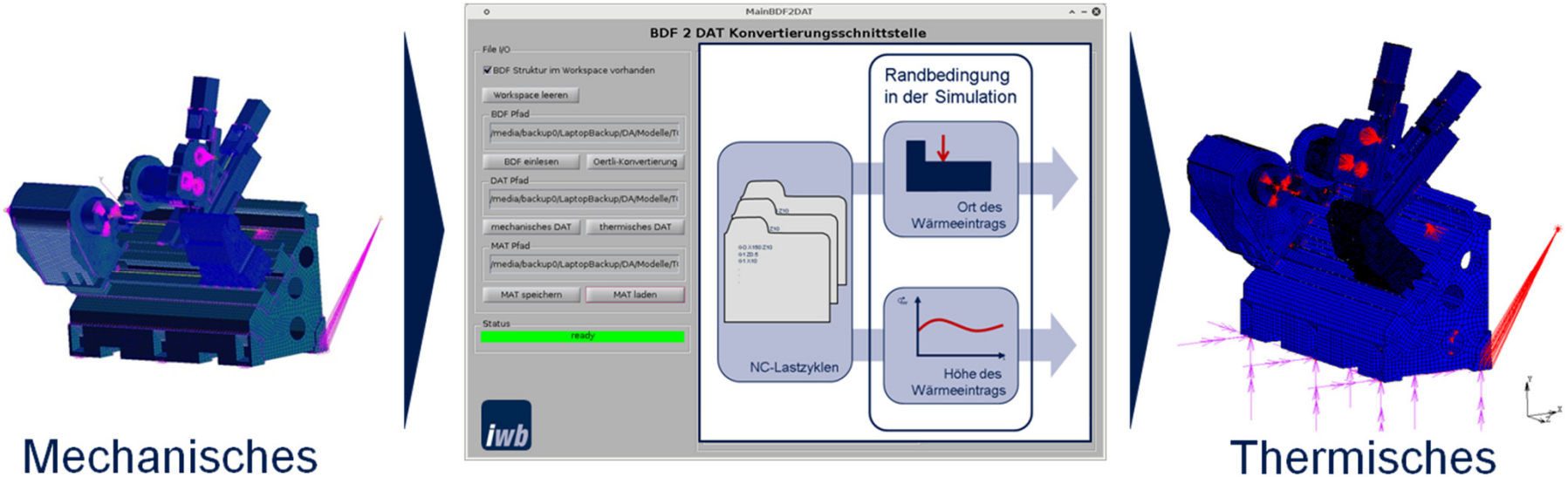
Benachbarte Anlagen und Maschinen



Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Automatisierte Modellerstellung

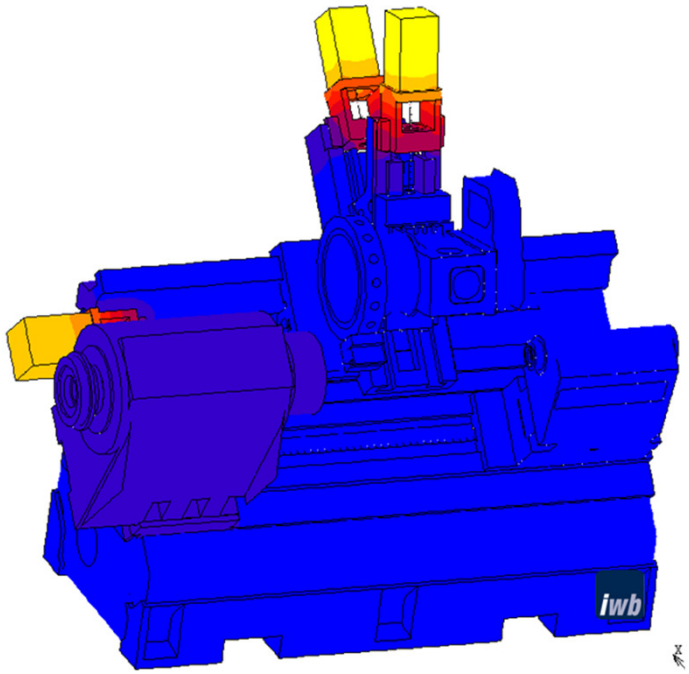
Im Sinne einer teilautomatisierten Modellerstellung wird ein Software-Tool zur Umwandlung mechanischer in thermische Modelle mit paralleler Berechnung der Randbedingungen entwickelt.



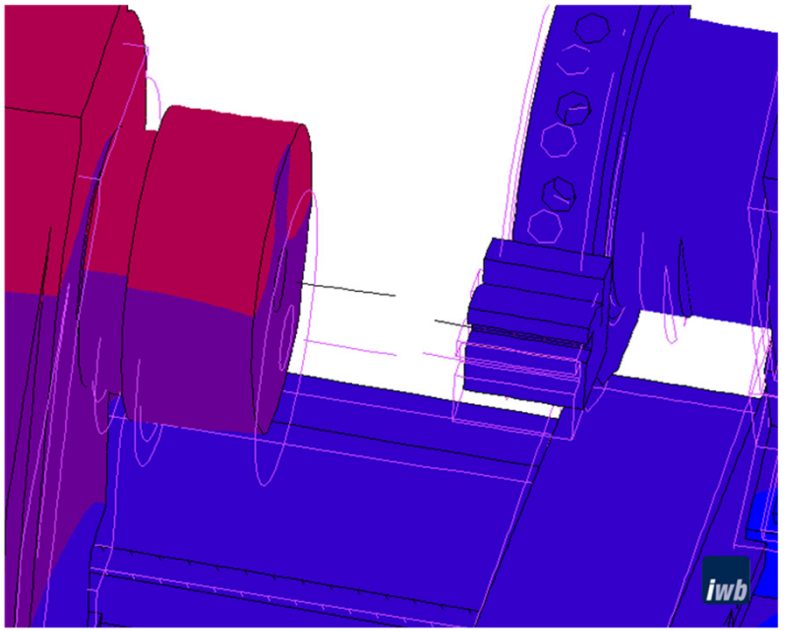
Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Exemplarische Simulationsergebnisse

Temperaturverteilung an der Maschine



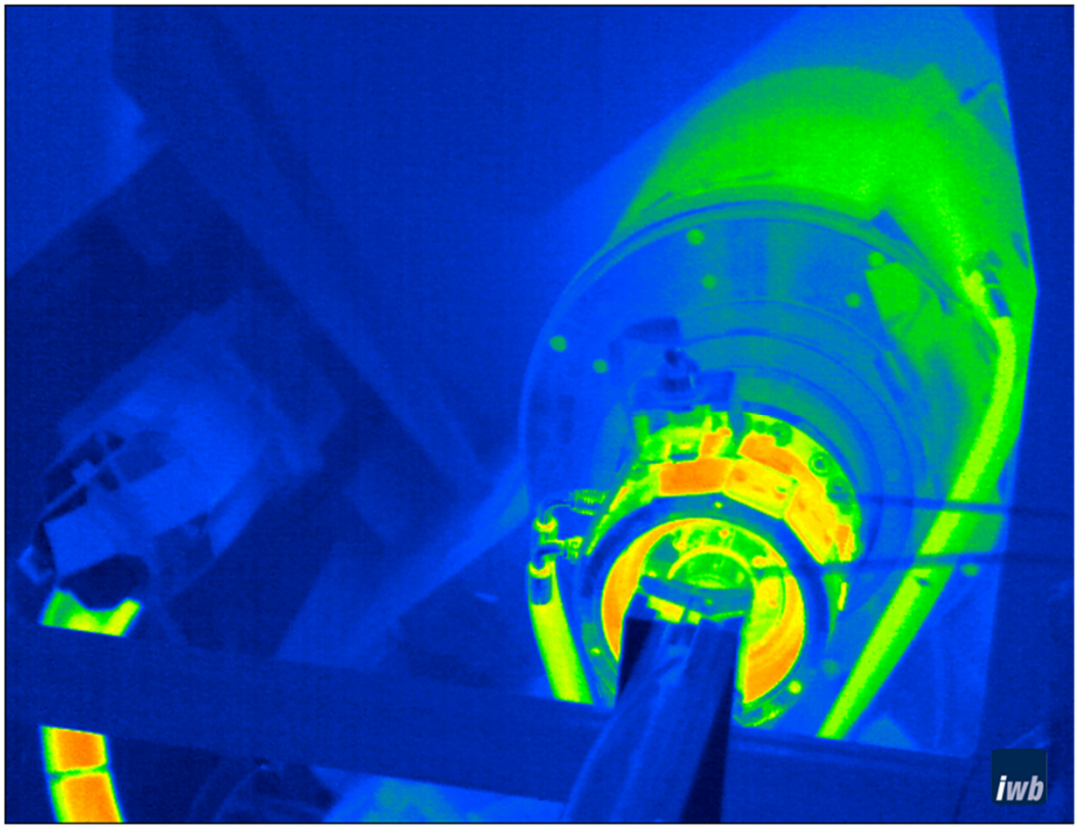
Verlagerung am Tool-Center-Point

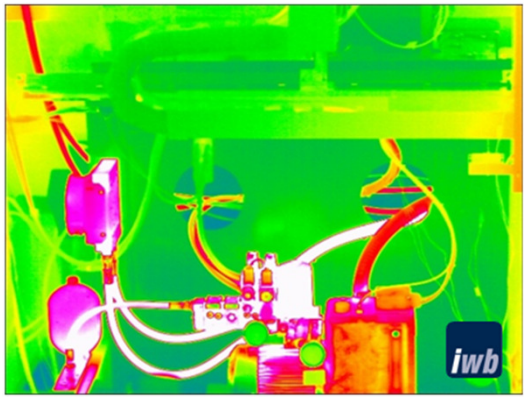


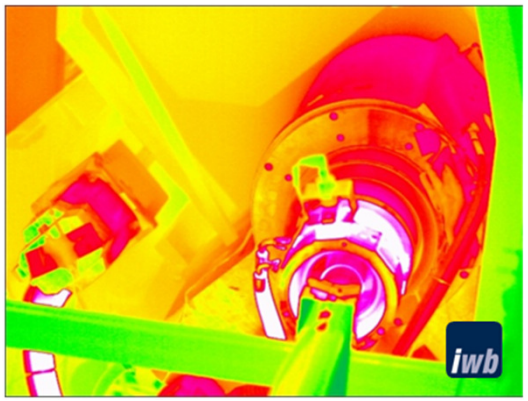
Universaldrehmaschine mit angetriebenen Werkzeugen in Schrägbettbauweise, Arbeitsraum x=275, y=90, z=700
Bearbeitungsprogramm ohne Zerspanung im Endloslauf 12 Stunden mit Werkzeugwechsel
Vorschub 0,3 mm/U, Drehzahl 220 U/min, **keine Prozesskräfte**, Wärmequellen abgeschätzt

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Thermographische Messungen an einer Drehmaschine







Universaldrehmaschine mit angetriebenen Werkzeugen in Schrägbettbauweise, Arbeitsraum x=275, y=90, z=700
Bearbeitungsprogramm ohne Zerspanung im Endloslauf 12 Stunden mit Werkzeugwechsel
Vorschub 0,3 mm/U, Drehzahl 220 U/min, **keine Prozesskräfte**

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

… sieht äußerlich nicht anders aus als heute, jedoch …

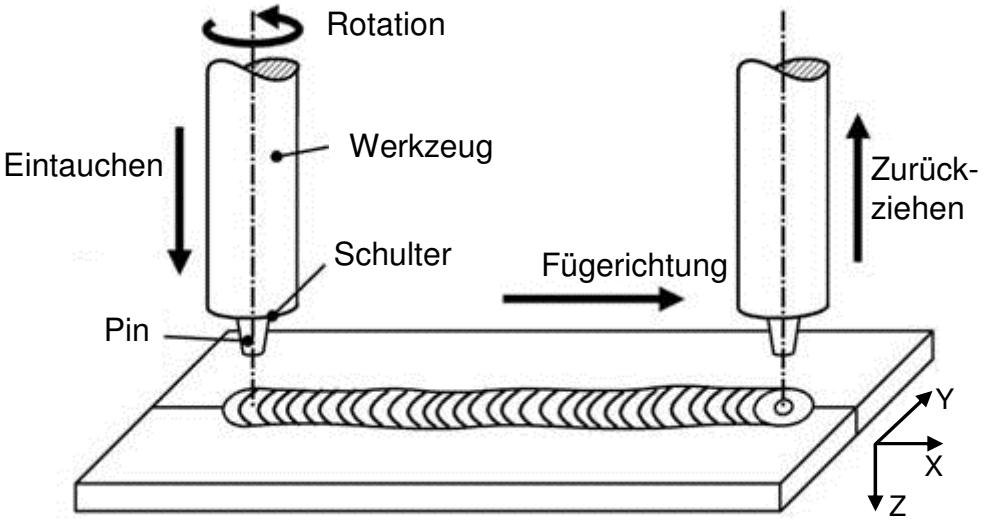
… sie ermöglicht Hybridprozesse,
… sie verkürzt Prozessketten,
… sie ist dynamisch ausgereift und stark bedämpft,
… sie ist mit adaptronischen Funktionen ausgestattet,
… sie ist unempfindlich gegenüber thermischer Last,
… sie ist multitechnologiefähig und
… sie wird unter Zuhilfenahme von Simulation entwickelt.

Diesen Punkten widmen sich konsequent die Arbeiten des *iwb* innerhalb der Themengruppe „Werkzeugmaschinen“.

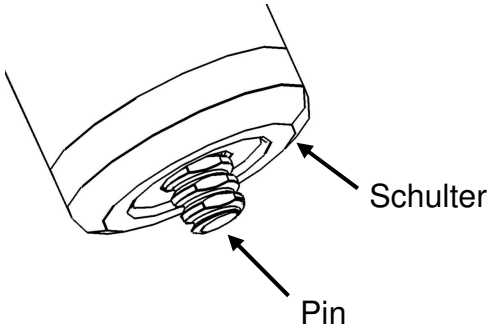
Rührreibschweißen
Wirkprinzip

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Prozess:



Werkzeug:



Parameter:

- Drehzahl
- Vorschubgeschwindigkeit
- Werkzeuggeometrie
- Werkstoffeigenschaften

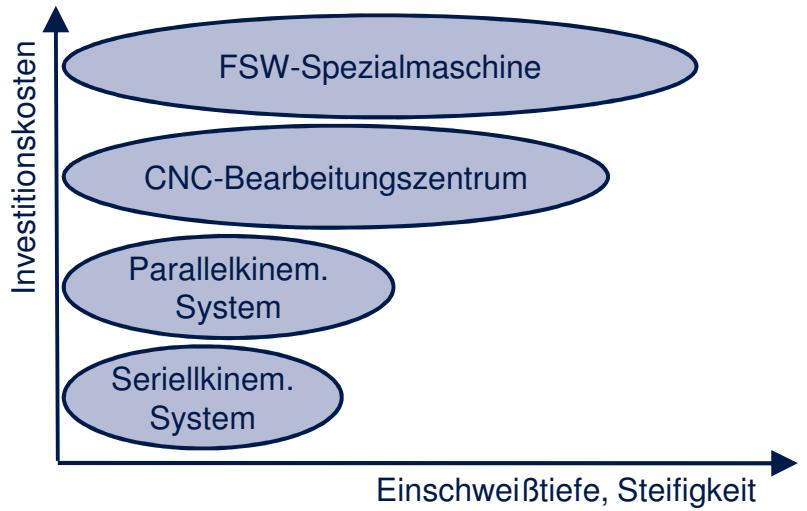
Merkmale des Prozesses:

- Hohe Nahtqualitäten
- Kein Schutzgas erforderlich
- Mischverbindungen möglich
- Hohe Prozesskräfte (5 bis 20 kN)

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Anlagentechnik

Einordnung



Vergleich

Heller MCH250

ESAB SuperStir

Kuka KR500MT

Ergebnis

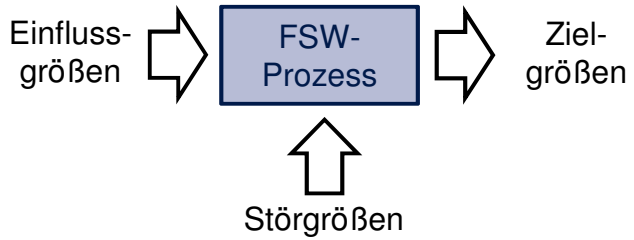
- Untersuchte Werkstoffe: EN AW-5083, EN AW-6060, AC-4600
- Dickenbereich von 2 mm bis 8 mm

➔ Hochwertige Schweißverbindungen auf allen Anlagen erreichbar

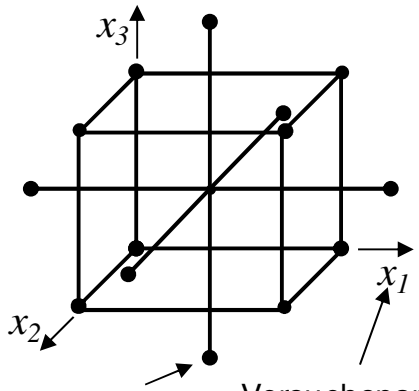
Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Empirisches Prozesskraftmodell

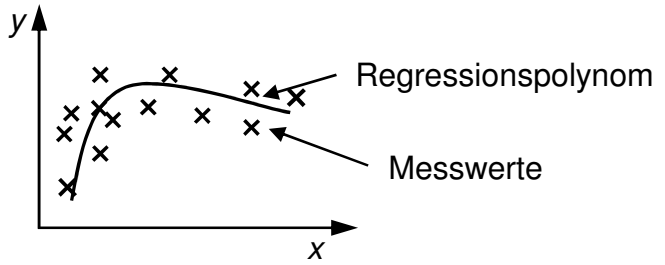
Statistische Versuchsplanung



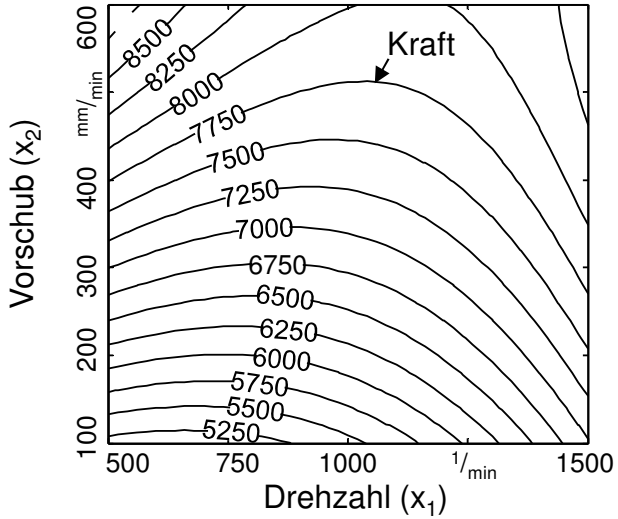
$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1+1}^{k} b_{ij} \cdot x_i x_j + \sum_{i=1}^{k} b_{ii} \cdot x_i^2$$



Regressionsanalyse



Ergebnisdarstellung



Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

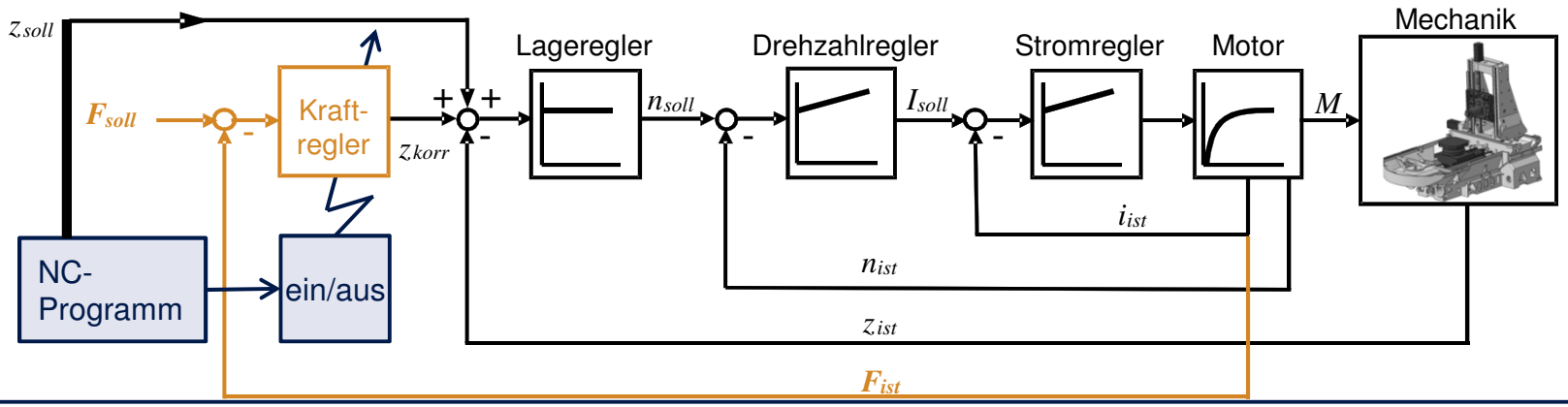
Kraftregelung

Einsatz einer konventionellen Werkzeugmaschine

Problembeschreibung:
- Hohe Kräfte sind aufzubringen
- Meist Einschränkung auf Strom-, Drehzahl- und Lageregelung
- Umrüstung auf Kraftregelung nicht flexibel

Lösungsansatz:
➔ Realisierung einer zuschaltbaren Kraftregelung
➔ dadurch Ausgleich veränderlicher Materialeigenschaften (z. B. Guss)

Kraftregelung auf der Basis von Motorströmen (in Spindelachs-Richtung)



Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

… sieht äußerlich nicht anders aus als heute, jedoch …

… sie ermöglicht Hybridprozesse,
… sie verkürzt Prozessketten,
… sie ist dynamisch ausgereift und stark bedämpft,
… sie ist mit adaptronischen Funktionen ausgestattet,
… sie ist unempfindlich gegenüber thermischer Last,
… sie ist multitechnologiefähig und
… sie wird unter Zuhilfenahme von Simulation entwickelt.

Diesen Punkten widmen sich konsequent die Arbeiten des *iwb* innerhalb der Themengruppe „Werkzeugmaschinen“.

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Situation in der Werkzeugmaschinenentwicklung

Steigende Anforderungen an Werkzeugmaschinen und deren Hersteller

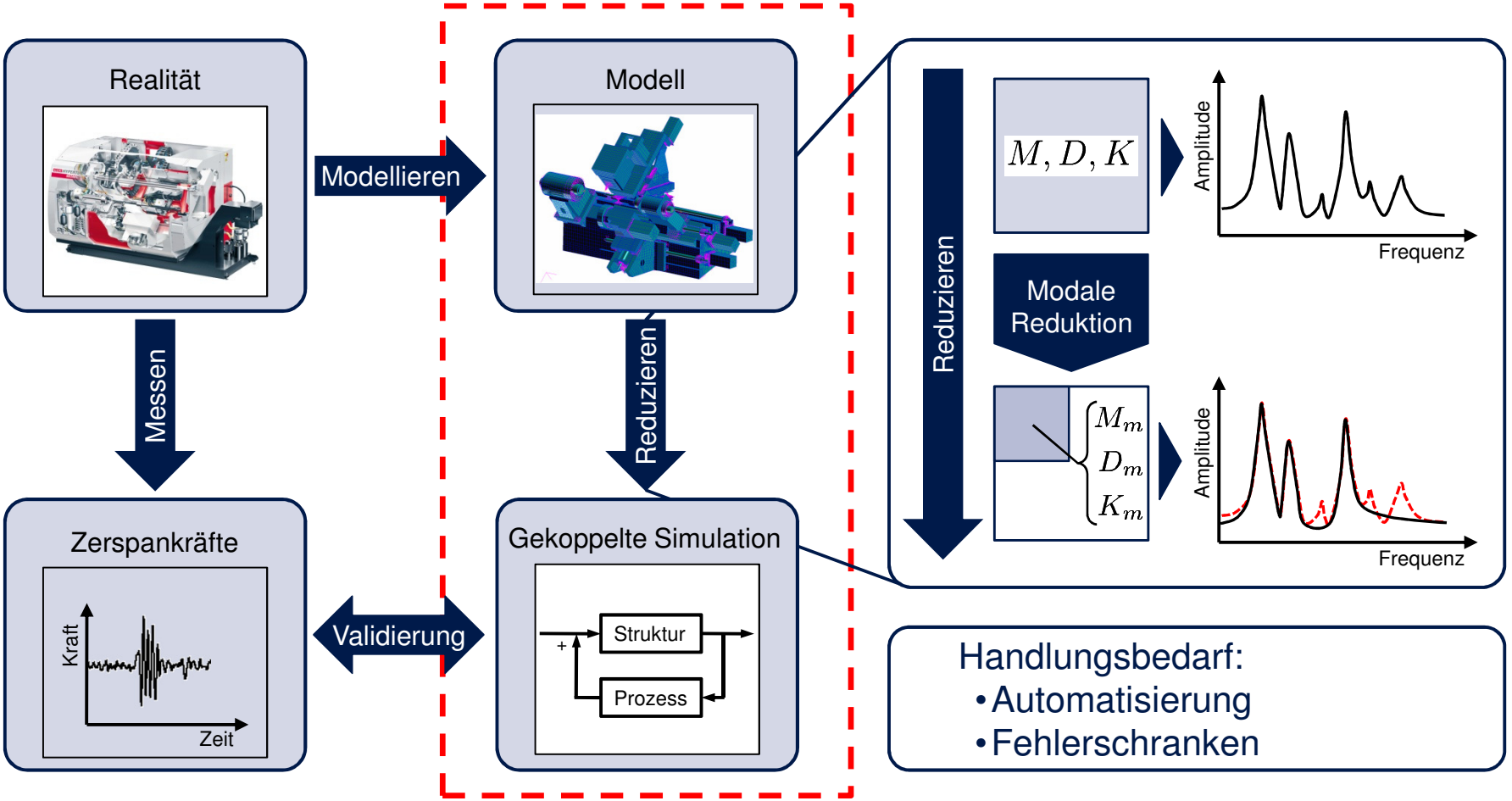
Zunehmender Einsatz der Simulationstechnologie

Nutzen

Aufwand

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen

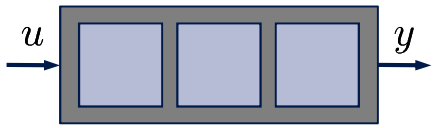


Handlungsbedarf:
- Automatisierung
- Fehlerschranken

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Grundlagen der Ordnungsreduktion

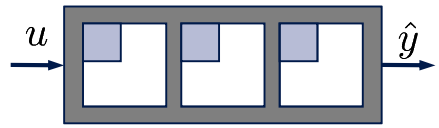
Systemmodell



Modellreduktion durch Projektion

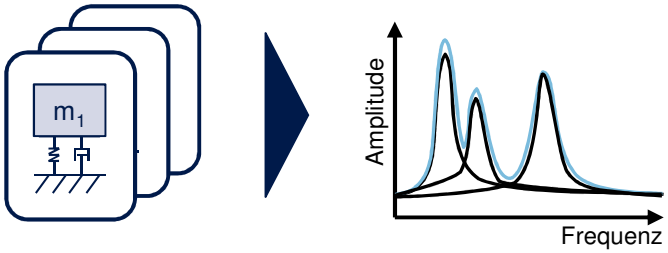
$$V^T_{q \times n} \; A_{n \times n} \; V_{n \times q} = \hat{A}_{q \times q}$$

Reduziertes Systemmodell



Modale Reduktion

Superposition einzelner Schwingungsformen



- Entkoppelte Ein-Massen-Schwinger
- Dämpfung einzelner Strukturmoden möglich
- Qualität abhängig von Modenauswahl

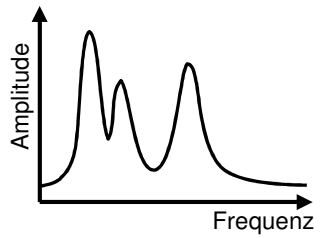
Anwendung: Strukturmechanik, Werkzeugmaschinen

Krylov-Raum-basierte Reduktion

Approximation der Übertragungsfunktion

Reihenentwicklung

$$X(s) = \sum_{j=0}^{\infty} \left[\blacksquare^{\,j} \; \blacksquare \right]$$



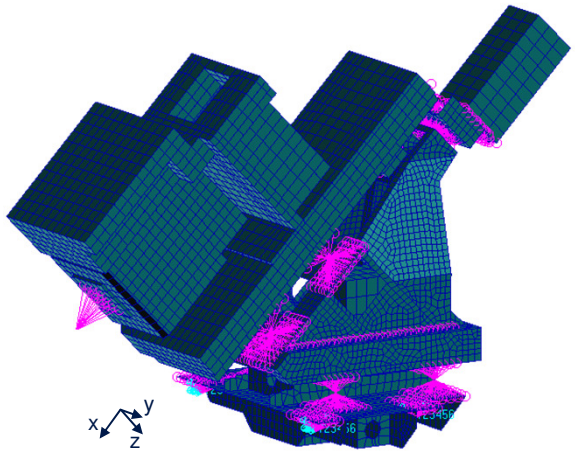
- Projektionsmatrix spiegelt Übertragungsfunktion wider
- Modellierung lokaler Dämpfungseffekte möglich
- Automatisierung durch math. Systembewertung

Anwendung bisher: Elektrotechnik, Regelungstechnik

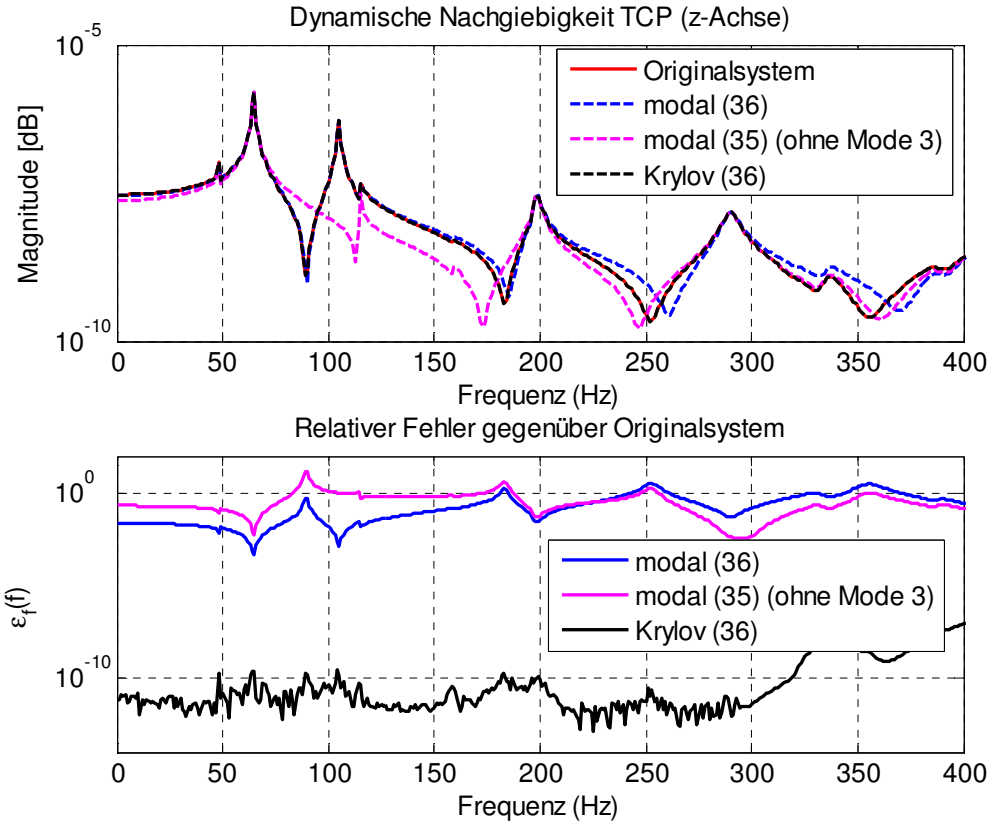
Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Automatisierung verhindert manuelle Auswahlfehler

Fräseinheit eines Bearbeitungszentrums



Originalsystem: Dimension 54885



Sehr gute Approximation durch Krylovraum-basierte Reduktion im Vergleich zu modalen Verfahren

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

… sieht äußerlich nicht anders aus als heute, jedoch …

… sie ermöglicht Hybridprozesse,
… sie verkürzt Prozessketten,
… sie ist dynamisch ausgereift und stark bedämpft,
… sie ist mit adaptronischen Funktionen ausgestattet,
… sie ist unempfindlich gegenüber thermischer Last,
… sie ist multitechnologiefähig und
… sie wird unter Zuhilfenahme von Simulation entwickelt.

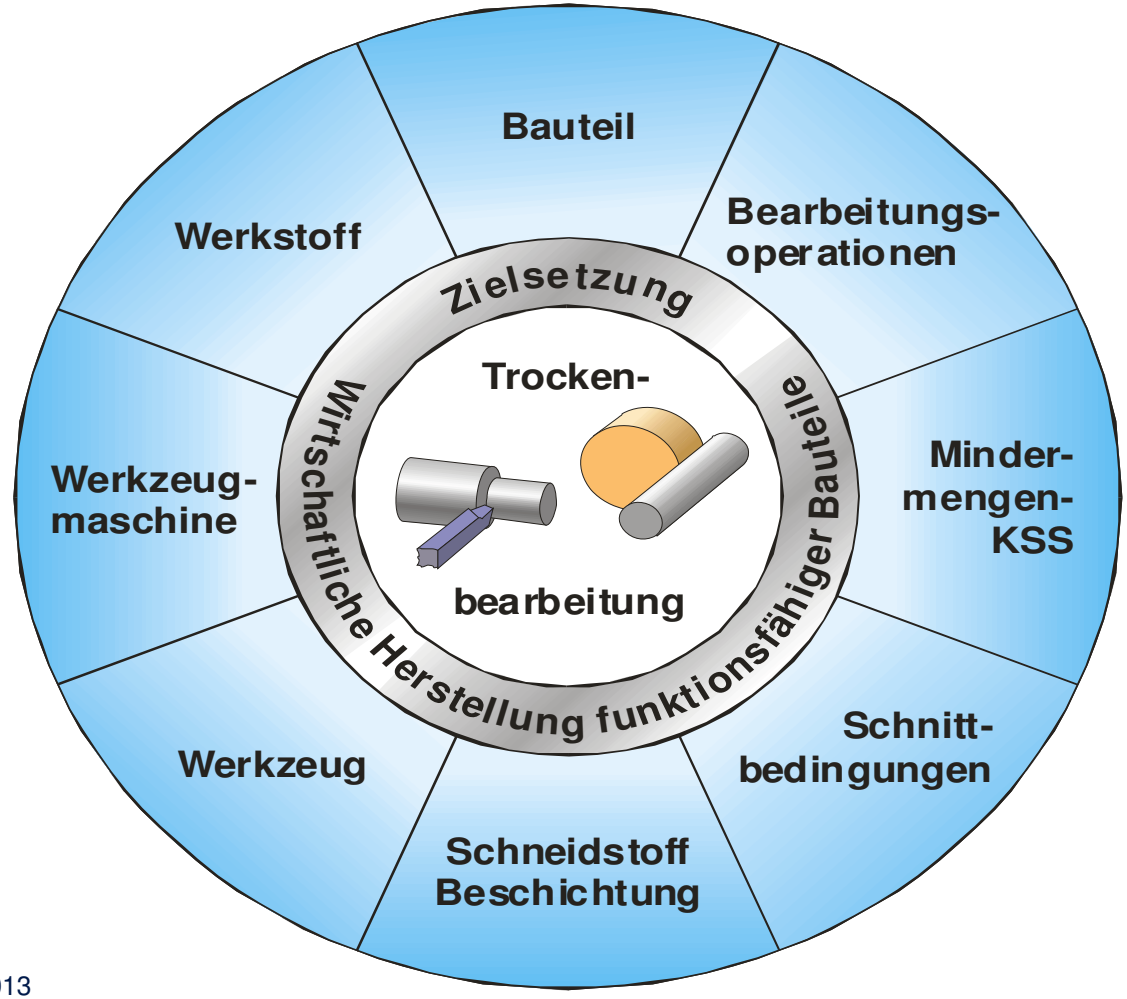
Diesen Punkten widmen sich konsequent die Arbeiten des *iwb* innerhalb der Themengruppe „Werkzeugmaschinen“.

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

… ist all dies und sie ist zudem noch ressourcenschonend …

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

… ist all dies und sie ist zudem noch umweltfreundlich.



Gliederung

1. Das *iwb* und unsere Forschungsbiete an der TU München
2. Die Werkzeugmaschine der Zukunft
3. **Zusammenfassung**

**Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften**
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

… sieht äußerlich nicht anders aus als heute, …

Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

… sieht äußerlich nicht anders aus als heute, …

… aber sie verfügt über bessere innere Werte.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

iwb

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Raum 2329
Tel +49 89 / 289 - 155 02
Fax +49 89 / 289 - 155 55
E-Mail: michael.zaeh@iwb.tum.de

Adresse
iwb - Technische Universität München
Boltzmannstraße 15
85748 Garching
www.iwb.tum.de