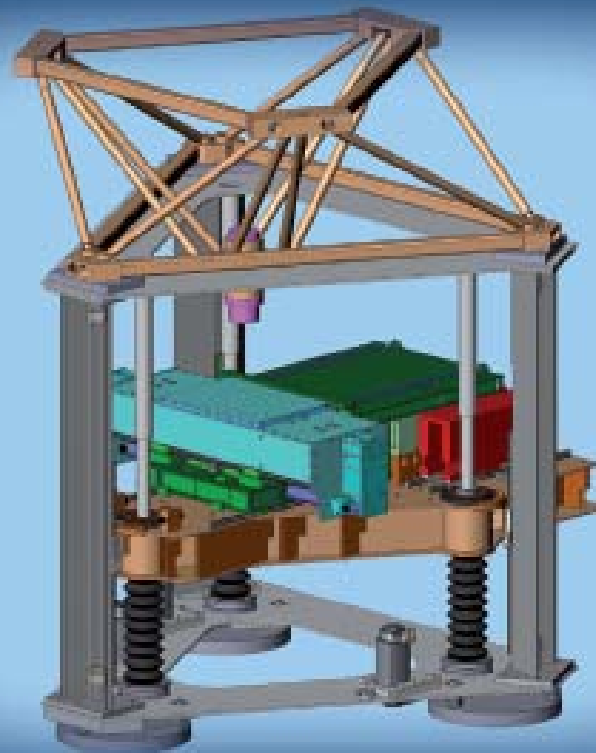




**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

Fakultät Maschinenwesen

Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik



**LEHRE · FORSCHUNG · PRAXIS**

**TÄTIGKEITSBERICHT**

**DES LEHRSTUHL FÜR WERKZEUGMASCHINEN  
2009/2010**



Herausgeber:  
Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann  
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen



Lehre • Forschung • Praxis

---

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen

---

**Tätigkeitsbericht**  
des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen  
**2009 / 2010**

Herausgegeben von  
Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann  
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen  
der Technischen Universität Dresden  
Dresden, 2011

Technische Universität Dresden

Fakultät Maschinenwesen

Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik

Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung

Kutzbach-Bau

Helmholtzstraße 7 a

01069 Dresden

Telefon: +49/351/46 33 43 58

Fax: +49/351/46 33 70 73

Email: [mailbox@iwm.mw.tu-dresden.de](mailto:mailbox@iwm.mw.tu-dresden.de)

Internet: [iwm.mw.tu-dresden.de](http://iwm.mw.tu-dresden.de)

Autorenteam:

Tätigkeitsbericht 2009 / 2010

Redaktion:

G. Brzezinski

Herstellung:

addprint® AG, Possendorf

Selbstverlag

ISBN 978-3-86780-190-4

© Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen 2011



---

## Vorwort



Wir können, trotz weltweiter Finanz- und Wirtschaftskrise, auf zwei sehr erfolgreiche Jahre in Lehre und Forschung zurückblicken und mit dem im vorliegenden Tätigkeitsbericht Niedergelegten davon berichten.

In der Lehre haben wir für die neuen, Bologna-konform modularisierten *Diplomstudiengänge* "Maschinenbau" und "Mechatronik" Grundlagen- und Vertiefungsmodule der Werkzeugmaschinenentwicklung für die Studienrichtung "Produktionstechnik" und für das Profil "Mechatronik im Maschinen-

bau" erarbeitet und freuen uns über die wachsende Zahl Studierender.

In der Forschung verzeichnen wir eine gestiegene Anzahl interessanter Projekte und ein erhöhtes Drittmittelaufkommen, wobei insbesondere eine weitere Zunahme der grundlagennahen Vorhaben erreicht wurde, welche dankenswerter Weise durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert wurden. In diesem Zusammenhang haben wir uns in Gemeinschaftsprojekten weiter erfolgreich im Rahmen der Fakultät und der Universität, mit führenden Instituten in Deutschland sowie mit der regionalen und überregionalen Industrie vernetzt.

Beispiele hierfür sind, neben vielen Einzelprojekten bei DFG und AiF, die Weiterführung unserer Arbeiten im Sonderforschungsbereich "Textilverstärkte Verbundkomponenten für funktionsintegrierende Mischbauweisen bei komplexen Leichtbauanwendungen", der Start der gemeinsam mit dem WZL Aachen und dem iwB München initiierten Forschergruppe "Dämpfungseffekte in Werkzeugmaschinen" sowie eine Vielzahl größerer Verbundprojekte, wie "ECEMP BioComp", "ToHoP", "EFFEKT", "LEVITA" oder "DELIZ".

Damit wurde es möglich, die Anzahl der Mitarbeiter deutlich aufzustocken und unsere gerätetechnische Ausrüstung umfangreich zu erweitern.

Für das gemeinsam Geleistete möchte ich allen Beteiligten Dank sagen. Dazu zählen die Vertreter der mit uns zusammenarbeitenden Unternehmen, die Damen und Herren der Projektförderung bei der DFG, dem BMBF und BMWi, der AiF und deren Mitgliedsvereinigungen sowie die vielen Kollegen, vor allem aus dem Kreis der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik.

Natürlich – und das ganz besonders – gilt mein Dank allen meinen engagierten Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen am Institut, ohne die die hier vorgelegten Ergebnisse nicht möglich gewesen wären.



Dresden, Januar 2011

# Inhaltsübersicht

1	Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik.....	1
1.1	Standort.....	2
1.2	Fakultät Maschinenwesen .....	5
1.3	ProZeD Produktionstechnisches Zentrum Dresden .....	7
1.4	Geschichte .....	12
1.5	Struktur.....	16
2	Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen .....	17
2.1	Mitarbeiter.....	18
2.2	Ausstattung .....	31
2.2.1	Messtechnische Ausstattung.....	31
2.2.2	Rechentechnische Ausstattung .....	33
2.2.3	Labor- und Versuchsfeldverbund.....	34
2.2.4	Werkzeugmaschinen-Versuchsfeld .....	35
2.2.4.1	Vorschubachse mit linearem Direktantrieb.....	36
2.2.4.2	Impulskompensation und -entkopplung .....	38
2.2.4.3	Vorschubachse mit Kugelgewindetrieb .....	40
2.2.4.4	Laufeigenschaften von Hauptspindeln .....	42
2.2.4.5	Motorspindel mit aktiver Magnetlagerung .....	44
2.2.4.6	Kupplungsprüfstand.....	46
2.2.4.7	Prüfstand für Profilschienenführungen nach dem Prinzip "bewegte Wagen" .....	48
2.2.4.8	Prüfstand für Profilschienenführungen nach dem Prinzip "bewegte Schienen".....	50
2.2.4.9	Hexapod 1 .....	52
2.2.4.10	Hexapod 2 .....	54
2.2.4.11	Hexapod 3 .....	56
2.2.4.12	Versuchsträger MAX .....	58
2.2.4.13	Programmierung der Funktionssteuerung von Fertigungssystemen (SPS).....	61
2.2.4.14	Geräuschuntersuchungen an Werkzeugmaschinen.....	63
2.2.4.15	Positioniergenauigkeit von Werkzeugmaschinen .....	65

2.2.4.16	Kalibrierung von Stabachsen .....	67
3	Lehre .....	69
3.1	Entwicklungsstapen der vom Institut getragenen Lehre.....	70
3.2	Lehrangebot.....	75
3.2.1	Übersicht.....	75
3.2.2	Modul Werkzeugmaschinen-Grundlagen .....	79
3.2.2.1	Bewegungsgeführte Maschinensysteme - Systemcharakter und Komponenten bewegungsgeführter Prozesse und Systeme	79
3.2.2.2	Konzeptioneller Entwurf einer Werkzeugmaschine .....	83
3.2.2.3	Vorrichtungskonstruktion .....	86
3.2.3	Modul Werkzeugmaschinen-Entwicklung.....	89
3.2.3.1	Bewegungsgeführte Maschinensysteme - Funktionell relevantes Systemverhalten und Beispiele mechatronischer Anwendungen .....	89
3.2.3.2	Baugruppengestaltung .....	94
3.2.4	Modul Werkzeugmaschinen-Steuerung.....	98
3.2.4.1	Funktionssteuerung .....	98
3.2.4.2	Bewegungssteuerung.....	102
3.2.5	Modul Bewegungsgeführte Maschinensysteme..	105
3.2.5.1	Systemcharakter und Komponenten bewegungsgeführter Prozesse und Systeme .....	105
3.2.5.2	Funktionell relevantes Systemverhalten und Beispiele mechatronischer Anwendungen...	105
3.2.6	Werkzeugmaschinen-Seminar .....	106
3.2.7	Unterstützung der Lehre an anderen Bildungseinrichtungen .....	106
3.3	Studien- und Diplomarbeiten .....	107
3.3.1	Interdisziplinäre Projektarbeit.....	107
3.3.2	Großer Beleg.....	107
3.3.3	Diplomarbeit.....	109
3.4	Exkursionen .....	111

4	Forschung .....	119
4.1	Entwicklung der Forschung am IWM .....	120
4.2	Die aktuellen Forschungsschwerpunkte .....	123
4.3	AG Struktur- und Prozessanalyse .....	127
4.3.1	Voraussetzungen zur reproduzierbaren Fertigung von textilen Preforms .....	127
4.3.2	Thermische Simulation des Konsolidierungsprozesses für Spacer Fabrics .....	131
4.3.3	Untersuchungen zu den Grenzwerten des Einsatzes adaptronischer Komponenten zur Impulskopplung von linearmotorgetriebenen Werkzeugmaschinenachsen unter veränderlichen strukturmechanischen Umgebungsbedingungen..	134
4.3.4	Grundlagenuntersuchungen für die Impulskompensation an Vorschubachsen mit Lineardirektantrieb .....	138
4.3.5	Synthese von Ratterkarten mit hochtourig drehenden Spindel-Lager-Systemen unter Berücksichtigung gyroskopischer Effekte .....	142
4.3.6	Strukturbasierte Modellierung des für die Stabilität des Zerspanprozesses relevanten drehzahlabhängigen Übertragungsverhaltens eines Spindel/Werkzeug-Systems .....	145
4.3.7	Grundlagenuntersuchungen zur effizienten Dämpfungsbeschreibung und -parametrierung für die modellgestützte dynamische Strukturanalyse von Werkzeugmaschinen .....	149
4.3.8	Grundlagenuntersuchungen zur effizienten Dämpfungsbeschreibung und -parametrierung für elementare werkzeugmaschinentypische Körper und Kopplungselemente .....	152
4.3.9	Entwicklung, Anwendung und Bewertung von Simulationstechnologien für die aktive virtuelle Werkzeugmaschine .....	156
4.3.10	Dynamische Maschinenuntersuchung mittels Experimenteller Modalanalyse .....	158

4.3.11	Abbildung des Umgebungseinflusses in der thermischen Simulation und für die Kompensation thermisch bedingter Wirkungspunktabweichungen an Werkzeugmaschinen.....	160
4.3.12	Experimenteller Abgleich und Verifizierung des simulativ ermittelten Aufteilungsverhältnisses der Zerspanungsleistung in Span, Werkstück und Werkzeug .....	163
4.3.13	Kondensation und Freiheitsgrad-Reduktion für thermo-elastische Modelle von Gestellstrukturbauteilen an Werkzeugmaschinen.	165
4.3.14	Thermo-elastisches FE-Modell eines 5-Achs-Bearbeitungszentrums .....	168
4.3.15	Entwicklung eines prozessaktiven Werkzeugsystems für die Formgebung komplexer Topologie-Hohlprofile aus textilverstärkten Verbundwerkstoffen mittels Heißpressen (ToHoP) .....	170
4.3.16	Entwicklung der Grundlagen für die simulationsgestützte Analyse von Profilschienenführungen .....	173
4.3.17	Objektivierung der Verfahrensgrundlagen für die experimentelle Ermittlung der dynamischen Tragzahl von Profilschienenführungen .....	178
4.3.18	FEM-Analyse der Vergleichsspannung im Querschnitt von Profilschienenführungen der Bauarten X und O bei mittiger Belastung.....	181
4.3.19	Konstruktion, Fertigung und Montage eines Prüfstandes für Profilschienenführungen nach dem Prinzip bewegte Schienen.....	184
4.4	AG Steuerungstechnik .....	186
4.4.1	Grundlagen für den Einsatz exzentrischer Gelenke in parallelkinematischen Werkzeugmaschinen .....	186
4.4.2	Grundlagen für den effizienten Einsatz mehrachsiger interpolierender Servoantriebe in Verarbeitungsmaschinen.....	193

---

4.4.3	Wirtschaftliche Posemessung an Werkzeugmaschinen mit einem photogrammetrischen Messsystem .....	198
4.4.4	Entwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Konzeption eines neuen Verfahrens und dessen Umsetzung in ein Schleifzentrum.....	201
4.5	AG Umformtechnik .....	207
4.5.1	Entwicklung und Bewertung von Simulationstechnologien für die Blechumformung unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Maschine/ Werkzeug und Prozess/Werkstück.....	207
4.5.2	Untersuchung von Berechnungsmodellen und des Deformationsverhaltens für das inkrementelle Umformverfahren Axialprofilrohrwalzen (APRW) ..	211
4.5.3	CAE-Methoden in der Einarbeitungsphase der Blechumformung.....	215
4.5.4	Simulation von Ziehkisseneinflüssen im FEM-Prozessmodell .....	220
4.5.5	Modellverarbeitungsprozess für eine effektive endkonturnahe Fertigung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen - EFFEKT Teilprojekt Preformhandling .....	224
4.5.6	Produktionstechnisches Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen - DeLIZ .....	228
4.5.7	Simulationsgestützte Konstruktion und Einarbeitung eines Tiefziehwerkzeuges zur Herstellung von Blechbauteilen - LEVITA .....	231
4.6	AG Prozessketten.....	233
4.6.1	Datenbankgestützte Modellierung und Simulation der Prozessketten zur gezielten Einstellung vordefinierter Eigenschaften sowie zur Absicherung der reproduzierbaren Fertigung von thermoplastischen Textil-Verbundbauteilen .....	233
4.6.2	Methodik zur Wissensgenerierung für die reproduzierbare Herstellung biogener Verbundbauteile - ECEMP BioComp .....	238

5	Dissertationen .....	243
5.1	Vergleichende Untersuchung von Methoden zur Verringerung der Gestellanregung durch linearmotorgetriebene Werkzeugmaschinenachsen	244
5.2	Der Produktprozess im Computerzeitalter - Methodische Grundsätze zur Informationsbehandlung im Produktprozess und deren Anwendung auf die Entwicklung eines Steuerungskonzeptes.....	247
5.3	Entwicklung und Bewertung eines erweiterten Blechumformprozessmodells unter besonderer Berücksichtigung der elasto-statischen Wechselwirkungen zwischen Maschine und Prozess .....	257
6	Öffentlichkeitsarbeit .....	263
6.1	Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminare .....	264
6.2	Veröffentlichungen.....	270
6.2.1	Bücher.....	270
6.2.2	Fachaufsätze .....	271
6.2.3	Vorträge .....	273
6.2.4	Forschungsberichte .....	277
6.3	Gewinnung von Ingenieur-Nachwuchs .....	278
6.4	Mitarbeit in Gremien .....	282
6.5	Förderverein DWM e. V.....	283
6.6	Schriftenreihe Lehre • Forschung • Praxis .....	286



---

# 1      Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik

---



## 1.1 Standort

Das Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik gehört zur Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden.

Die TU Dresden hat ihre Wurzeln in der 1828 gegründeten *Technischen Bildungsanstalt Dresden*, welche 1851 die Bezeichnung *Königlich Sächsische Polytechnische Schule* und 1890 den Namen *Königlich Sächsische Technische Hochschule* erhielt. Sie gehört damit zu den ältesten technisch-akademischen Bildungsanstalten Deutschlands.

1961 wurde der Status einer *Technischen Universität* verliehen.

Nachdem bereits 1929 die Forstliche Hochschule Tharandt eingegliedert worden war, erfolgte im Laufe der letzten Jahre durch die Einbeziehung der Ingenieurhochschule Dresden, der Pädagogischen Hochschule, der Medizinischen Akademie und eines Teils der Verkehrshochschule Dresden eine wesentliche territoriale und fachliche Erweiterung der Technischen Universität Dresden. Sie zählt heute zu den forschungstärksten Hochschulen in Deutschland.

An den 14 Fakultäten der TU Dresden werden in mehr als 150 Studiengängen 36.000 Studenten ausgebildet, davon etwa 5.700 im Maschinenwesen. Die ingenieurwissenschaftlichen Studiengänge wurden im Rahmen des Bologna-Prozesses modularisiert und inhaltlich modernisiert. Sie haben auch zukünftig den Diplomabschluss zum Ziel.

Die TU Dresden ist Arbeitsstelle für etwa 420 Professoren und ca. 6.750 haushalt- und drittmittelfinanzierte Beschäftigte (ohne Medizinische Fakultät). Das Gesamtbudget der Universität beträgt ca. 500 Mio. EUR, davon eingeworbene Drittmittel rund 160 Mio. EUR (2009). Damit stellt die TU Dresden einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor im Raum Dresden dar.

Die Technische Universität Dresden wird geleitet vom Rektoratskollegium. Dieses besteht aus dem Rektor als Vorsitzenden, drei Prorektoren und dem Kanzler als Leiter der Verwaltung.

Rektor:	Prof. Dr. Dr.-Ing. habil. <b>H. Müller-Steinhagen</b>
Prorektor f. Univ.-planung:	Prof. Dr. phil. habil. <b>K. Lenz</b>
Prorektor f. Forschung:	Prof. Dr. rer. nat. habil. <b>G. Rödel</b>
Prorektorin f. Bildung u. Internationales:	Prof. Dr. phil. habil. <b>U. Schaefer</b>
Kanzler:	<b>W.-E. Wormser</b>

Umfassende Informationen zur TU Dresden unter:  
**[www.tu-dresden.de](http://www.tu-dresden.de)**

Der Maschinenbau besitzt an der TU Dresden eine lange Tradition, die verknüpft ist mit Namen wie Johann Andreas Schubert (1808-1870), Gustav Zeuner (1829-1907), Franz Karl Kutzbach (1875-1942), Ewald Sachsenberg (1877-1946) und Georg Berndt (1880-1972).

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde der Lehrbetrieb auf dem stark zerstörten Kerngelände der TU Dresden wieder aufgenommen. Es entstand eine Reihe neuer Institute und Institutsgebäude.

In dem von 1958 bis 1961 erbauten Kutzbach-Bau ist das *Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik* ansässig.

Die Zufahrt zum Institutsgebäude und zum angrenzenden Werkzeugmaschinen-Versuchsfeld erfolgt über die Helmholtzstraße.

(Lageplan auf der nächsten Seite)



## 1.2 Fakultät Maschinenwesen

### Leitung

#### Dekan

Prof. Dr.-Ing. habil. E. Beyer

#### Prodekane

Prof. Dr. rer. nat. habil. Dr. h.c. K.-H. Modler

Prof. Dr.-Ing. Chr. Leyens

#### Studiendekan Studiengang Maschinenbau

Prof. Dr.-Ing. habil. H. Rödel

#### Studiendekan Studiengang Verfahrenstechnik

Studiengang Werkstoffwissenschaft

Studiengang Chemie-Ingenieurwesen

Prof. Dr.-Ing. habil. W. Klöden

### Institute

#### Institut für Energietechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. A. Hurtado, Direktor

#### Institut für Festkörpermechanik

Prof. Dr.-Ing. habil. V. Ulbricht, Direktor

#### Institut für Fluidtechnik

Prof. Dr.-Ing. J. Weber, Direktor

#### Institut für Formgebende Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. V. Thoms, Geschäftsführender Direktor

#### Institut für Holz- und Papiertechnik

Prof. Dr.-Ing. A. Wagenführ, Geschäftsführender Direktor

#### Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik

Prof. Dipl.-Ing. Dr. rer. nat. techn. habil. H. Rohm, Direktor

#### Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. W. Hufenbach, Direktor

**Institut für Luft- und Raumfahrttechnik**

Prof. Dr.-Ing. K. Wolf, Direktor

**Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion**

Prof. Dr.-Ing. B. Schlecht, Direktor

**Institut für Oberflächen- und Fertigungstechnik**

Prof. Dr.-Ing. habil. E. Beyer, Direktor

**Institut für Strömungsmechanik**

Prof. Dr.-Ing. habil. J. Fröhlich, Geschäftsführender Direktor

**Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme**

Prof. Dr.-Ing. M. Schmauder, Direktor

**Institut für Textimaschinen und Textile****Hochleistungswerkstofftechnik**

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Ch. Cherif, Direktor

**Institut für Verarbeitungsmaschinen und Mobile****Arbeitsmaschinen**

Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Herlitzius, Geschäftsführender Direktor

**Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik**

Prof. Dr.-Ing. habil. R. Lange, Geschäftsführender Direktor

**Institut für Werkstoffwissenschaft**

Prof. Dr.-Ing. B. Kieback, Direktor

**Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann, Direktor

**Zentrum für Produktionstechnik und Organisation (CIMTT)**

Prof. Dr.-Ing. M. Schmauder, Direktor

## 1.3 ProZeD Produktionstechnisches Zentrum Dresden

# ProZeD

Am 15.11.2006 wurde mit der konstituierenden Sitzung das **Produktionstechnische Zentrum Dresden (ProZeD)** gegründet.

Das Produktionstechnische Zentrum Dresden ist ein Kompetenzzentrum der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden. Es generiert, bündelt, koordiniert und präsentiert produktionstechnische Aktivitäten seiner Mitglieder in Lehre, Forschung und Transfer. Mitglieder sind:

- Institut für Formgebende Fertigungstechnik (IFF)
- Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK)
- Institut für Oberflächen- und Fertigungstechnik (IOF)
- Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
- Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik (IWM)
- Professur für Holz- und Faserwerkstofftechnik (HFT)
- Professur für Textiltechnik (TT)
- Professur für Verarbeitungsmaschinen/Verarbeitungstechnik (VMVAT)
- Zentrum für Produktionstechnik und Organisation (CIMTT)

Beschlüsse fasst der Koordinierungsrat, dem die Leiter der ProZeD-Mitgliedseinrichtungen und der Leiter der Studienrichtung Produktionstechnik angehören.

Als Sprecher des Produktionstechnischen Zentrums Dresden wurde Prof. Dr.-Ing. habil. Knut Großmann, Direktor des Instituts für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, am 17.12.2008 für einen Zeitraum von zwei Jahren wiedergewählt.

## **IFF - Institut für Formgebende Fertigungstechnik**

Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr.-Ing. V. Thoms

### **Professur für Umform- und Urformtechnik**

Prof. Dr.-Ing. V. Thoms

Telefon: 0351/463 37616

Umform- und Urformtechnik, Modellierung und Simulation der Umformprozesse, Automatisierung in der Umformtechnik, Umformwerkzeuge

### **Arbeitsgruppe Produktionsautomatisierung, Zerspan- und Abtragtechnik**

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. A. Nestler

Telefon: 0351/463 37088

Programmierung, Steuern/Regeln/Überwachen von Fertigungsprozessen, Fertigungsinformatik, Abtrenntechnik, Fein- und Präzisionsbearbeitung, Abtragtechnik und Lasermaterialbearbeitung, Werkzeugwesen, Zerspanwerkzeuge

## **ILK - Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik**

Direktor: Prof. Dr.-Ing. habil. W. Hufenbach

### **Professur für Leichtbau und Kunststofftechnik**

Prof. Dr.-Ing. habil. W. Hufenbach

Telefon: 0351/463 38142

Gesamte Entwicklungskette beanspruchungsgerechter Leichtbaustrukturen: Werkstoff-Konstruktion-Simulation-Fertigung-Prototyp-Qualitätssicherung-Kosten

## **IOF - Institut für Oberflächen- und Fertigungstechnik**

Direktor: Prof. Dr.-Ing. habil. E. Beyer

### **Professur für Laser- und Oberflächentechnik**

Prof. Dr.-Ing. habil. E. Beyer

Telefon: 0351/463 31993

Fügeverfahren: Schweißen, Löten, Kleben, Hybrid;

Trennverfahren: Schneiden, Drehen, Sägen, Hybrid

Abtragverfahren: Bohren, Verdampfen, Fräsen, Reinigen

Oberflächenbehandlung: Härten, Legieren, Umschmelzen, Strukturieren

Beschichten: Spritzen, PVD, CVD, Sol-Gel, Pulver

### **Professur für Fügetechnik und Montage**

Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Telefon: 0351/463 37615

Kombinierte Fügeverbindungen, Kleb- und Beschichtungstechnik, Schweiß- und Löttechnik, Montageprozess-Planung/



---

-projektierung, Montage- und Demontagetechnik, Roboter-  
technik, Recycling

### **Professur für Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung**

Prof. Dr.-Ing. habil. H. Weise                      Telefon: 0351/463 34355

Messtechnik

Fertigungsplanung: Qualitätssicherung

Systemtechnik

### **Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme**

Direktor: Prof. Dr.-Ing. M. Schmauder

#### **Professur für Arbeitswissenschaft**

Prof. Dr.-Ing. M. Schmauder                      Telefon: 0351/463 32538

Arbeitsgestaltung

Arbeitswirtschaft

Ergonomie

Arbeits- und Gesundheitsschutz

#### **Professur für Technische Logistik**

Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Schmidt                      Telefon: 0351/463 32538

Materialflusstechnik

Modellierung und Simulation

Fabrikplanung

### **IWM - Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik**

Direktor: Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann

#### **Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann                      Telefon: 0351/463 34358

Entwicklungsmanagement

Virtuelle Werkzeugmaschine

Komponenten- und Maschinenentwicklung

Verhaltensanalyse (rechnergestützt, experimentell)

Steuerungsentwicklung

Maschinennahe, intelligente Korrektur- u. Regelungskonzepte

#### **Professur für Holz- und Faserwerkstofftechnik**

Prof. Dr.-Ing. A. Wagenführ                      Telefon: 0351/463 38101

Analysieren, Messen, Modellieren und Verändern der Eigenschaften und des Verhaltens von Holz und Holzwerkstoffen,  
Entwicklung, Herstellung und Vergütung neuartiger Partikel- und Verbundwerkstoffe,  
Grundlagen des Be- und Verarbeitens von Holz- und Faserwerkstoffen

### **Professur für Textiltechnik**

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Ch. Cherif

Telefon: 0351/463 39300

Auslegung und Konstruktion von Textilmaschinen  
Verfahrensentwicklung  
Produktinnovationen  
Material- sowie Prozessmodellierung  
Entwicklung Technischer Textilien

### **Professur für Verarbeitungsmaschinen/Verarbeitungstechnik**

Prof. Dr.-Ing. J.-P. Majschak

Telefon: 0351/463 34746

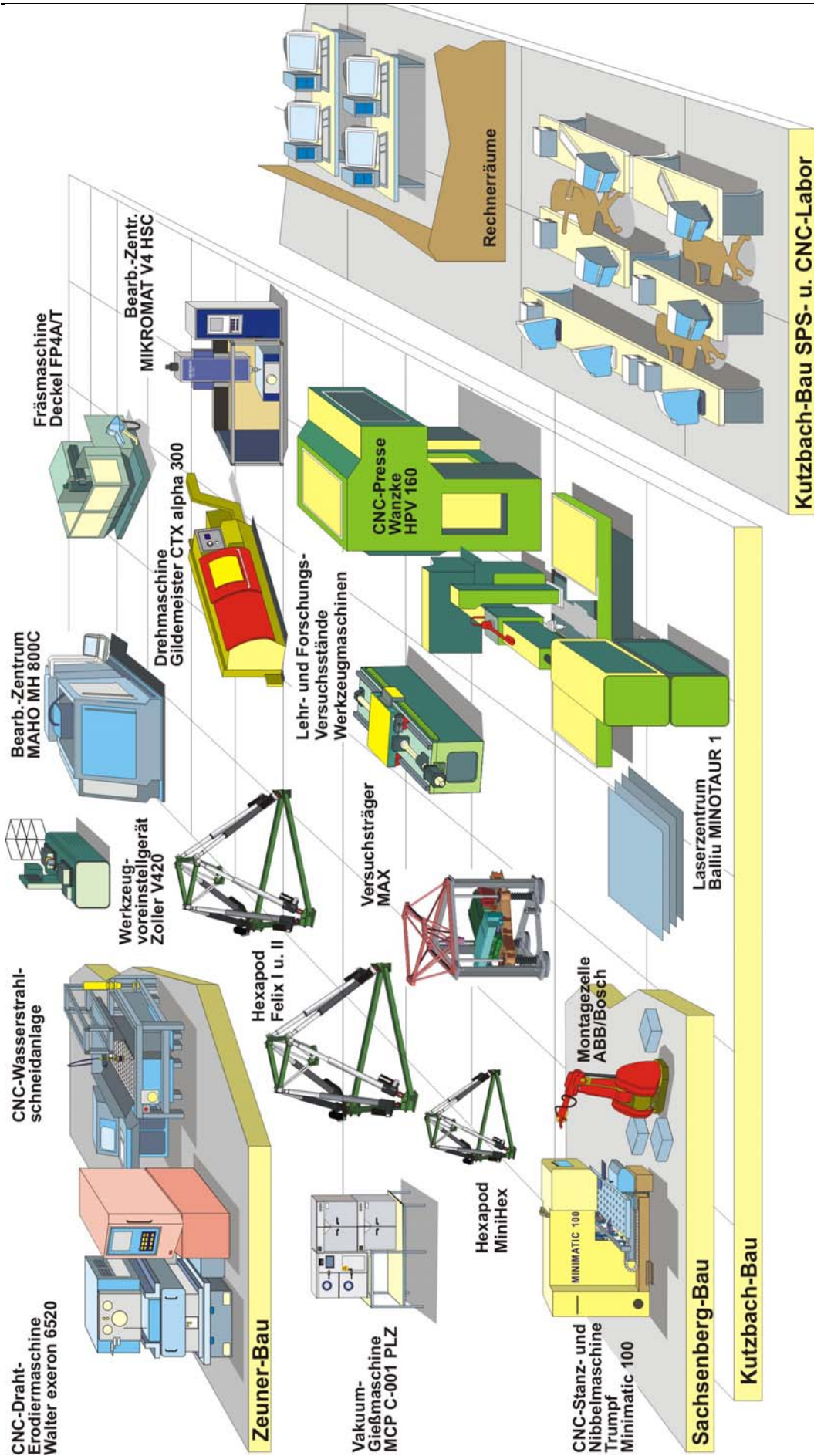
Untersuchung und Weiterentwicklung von Umformprozessen für Flachformgut durch Prozessmodelle,  
Optimierung von Bewegungssystemen in Verarbeitungs-  
maschinen mit durchgängiger Betrachtung von der Wirk-  
paarung bis zum Antrieb,  
Hygienegerechte Gestaltung von Verarbeitungsprozessen und  
-maschinen,  
Optimierung von Schweiß- und Siegelprozessen für  
Kunststoffe

### **CIMTT - Zentrum für Produktionstechnik und Organisation**

Direktor: Prof. Dr.-Ing. M. Schmauder

Telefon: 0351/463 37518

Unterstützung sächsischer Firmen bei der Erarbeitung komplexer Lösungen zur Kopplung technischer Komponenten und der organisatorischen Einbindung der Mitarbeiter,  
Information und Kontaktvermittlung, Schulung und Weiterbildung, Analysen zur Beurteilung betrieblicher Organisationsstrukturen, Erarbeitung und Erprobung technischer und organisatorischer Lösungen



Ausgewählte Ausrüstungen des Produktionstechnischen Zentrums Dresden (ProZeD)

## 1.4 Geschichte

### Wurzeln des Instituts

- 1921 Berufung von Prof. Ewald Sachsenberg (1877-1946) an die TH Dresden auf den ersten deutschen Lehrstuhl Betriebswissenschaften, Fabrikorganisation und Werkzeugmaschinen (bis 1939)
- 1946 Berufung von Prof. Kurt Koloc (1904-1967) an die TH Dresden auf den Lehrstuhl für Allgemeine Gewerbelehre und Normung
- 1949 Gründung des Instituts für Betriebswissenschaften und Normung unter Prof. Dr. Kurt Koloc
- 1951 Lehrbeauftragter für Werkzeugmaschinen/Konstruktion:  
Dipl.-Ing. Horst Berthold  
Lehrbeauftragter für Werkzeugmaschinen/Fertigung:  
Dipl.-Ing. Alfred Richter  
am Institut für Betriebswissenschaften und Normung
- 1952 Professur mit Lehrauftrag Werkzeugmaschinen und Hydrostatik am Institut für Betriebswissenschaften und Normung:  
Dipl.-Ing. Horst Berthold

### Institut für Werkzeugmaschinen

- 1.1.1954 Gründung des Instituts für Werkzeugmaschinen der TH Dresden  
Berufung von Dr.-Ing. Horst Berthold zum kommissarischen Institutsdirektor und Professor mit vollem Lehrauftrag
- 1.3.1958 Berufung von Dr.-Ing. habil. Horst Berthold zum Institutsdirektor und Professor mit Lehrstuhl
- 1961 Einweihung des neuen Institutsgebäudes mit der Maschinen-/Versuchshalle und Verleihung des Namens Kutzbach-Bau

## **Wissenschaftsbereich Fertigungsmittel**

- 1968 Eingliederung des Instituts als Wissenschaftsbereich Fertigungsmittel in die neu gegründete Sektion Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Bereichsleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. H. Berthold
- 1978 Bereichsleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. G. Kretzschmar
- 1990 Bereichsleiter: Doz. Dr.-Ing. R. Neugebauer

### **Berufungen:**

- 1970 Dr.-Ing. D. Will  
zum Dozenten für Hydraulik und Pneumatik
- 1971 Dr.-Ing. G. Kretzschmar  
zum Professor für Werkzeugmaschinen
- 1979 Dr.-Ing. W. Bahmann  
zum Honorarprofessor für Werkzeugmaschinen
- Dr.-Ing. W. Frank  
zum Dozenten für spanende Werkzeugmaschinen
- 1980 Doz. Dr.-Ing. D. Will  
zum Professor für Automatisierungstechnik und Hydraulik
- Doz. Dr.-Ing. W. Frank  
zum Professor für spanende Werkzeugmaschinen
- 1983 Dr.-Ing. H. Stollberg  
zum Dozenten für Automatisierung der Werkzeugmaschinen

## **Institut für Werkzeugmaschinen**

- 1.1.1991 Wiedergründung des Instituts  
Geschäftsführender Leiter:  
Doz. Dr.-Ing. habil. R. Neugebauer
- 1.1.1992 Kommissarischer Leiter:  
Doz. Dr.-Ing. O. Wasner

**Berufungen:**

- 1989 Dr.-Ing. habil. R. Neugebauer  
zum Dozenten für Werkzeugmaschinen- und Rationalisierungsmittelkonstruktion
- 1992 Dr.-Ing. O. Wasner  
zum Dozenten für Fertigungssysteme und Betriebsmittel

**Institut für Werkzeugmaschinen und Fluidtechnik**

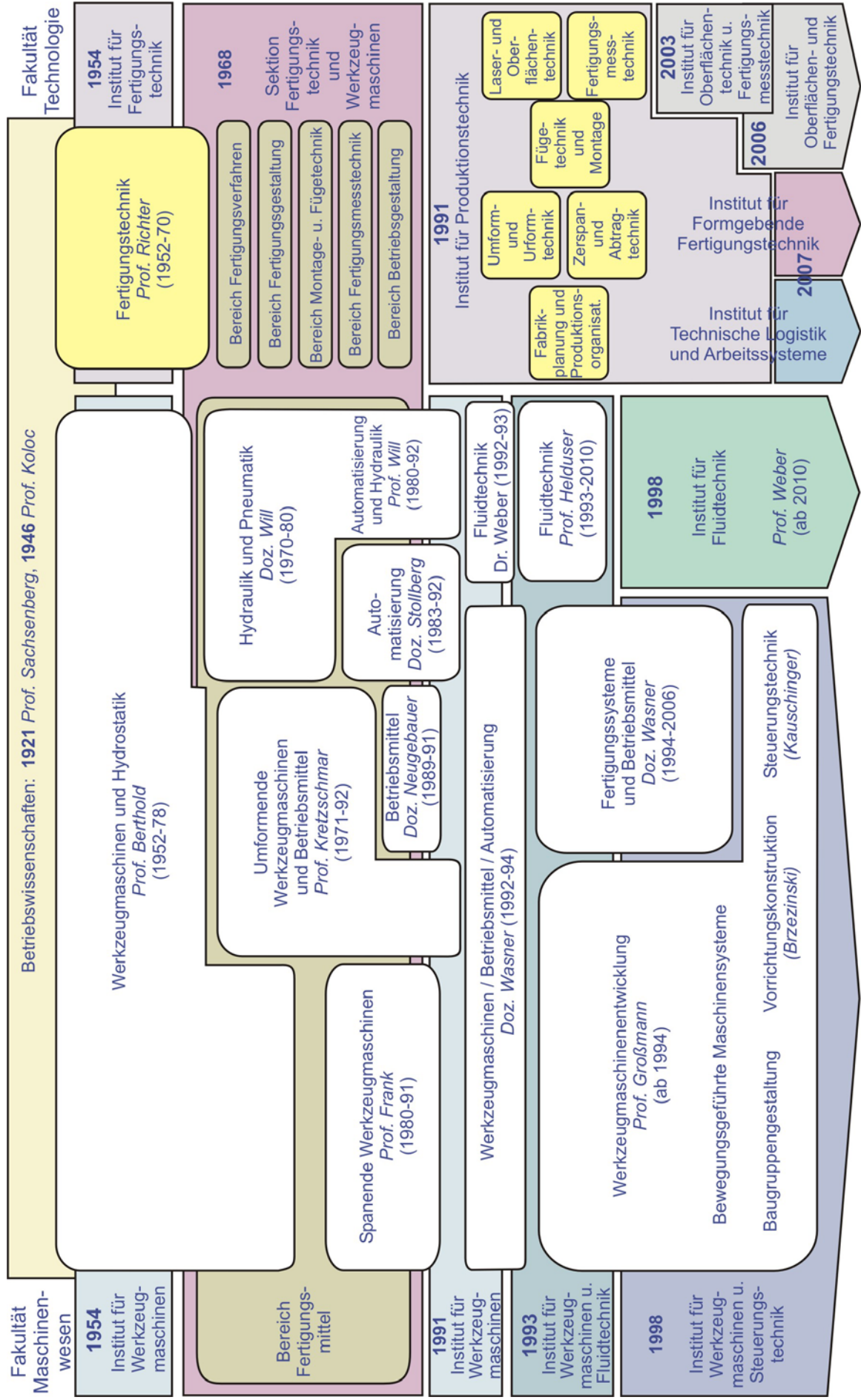
- 1.8.1993 Kommissarischer Leiter:  
Doz. Dr.-Ing. O. Wasner
- 1.8.1994 Geschäftsführender Direktor und Leiter des Lehrstuhls  
für Werkzeugmaschinen:  
Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann

**Berufungen:**

- 1993 Dr.-Ing. S. Helduser  
zum Professor für Hydraulik und Pneumatik
- 1994 Dr.-Ing. habil. K. Großmann  
zum Professor für Werkzeugmaschinenkonstruktion  
  
(mit Wirkung vom 1.4.2006 Umwidmung in  
Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung)

**Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik**

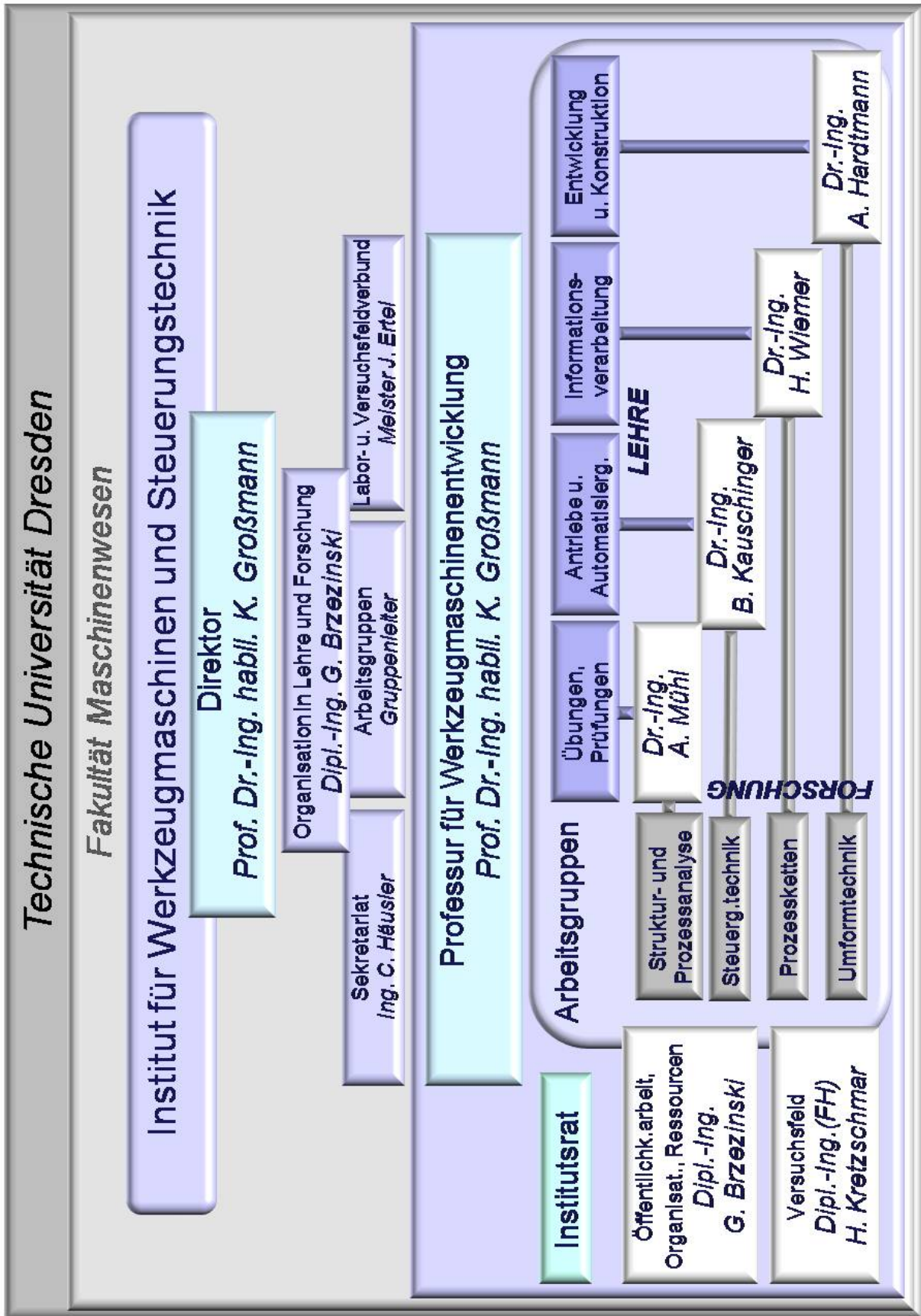
- 1.12.97 Direktor:  
Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann
- Die Professur für Hydraulik und Pneumatik wird als  
Institut für Fluidtechnik ausgegründet.



Entwicklung der Produktionstechnik in Dresden



# 1.5 Struktur





---

## 2 Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

---



## 2.1 Mitarbeiter



### **Prof. Dr.-Ing. habil. Knut Großmann**

- geb. 1949 in Ottendorf-Okrilla
- 1967 - 1971 Studium Maschinenbau / WZM-Konstruktion an der TUD
- 1978 - 1990 Forschung und Entwicklung MIKROMAT Dresden
- 1990 - 2000 Geschäftsführer ITI GmbH
- seit 1994 Inhaber des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinenentwicklung, Direktor des Instituts für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik (IWM) der TU Dresden



### **Ing. Christine Häusler**

- geb. 1955 in Leipzig
- 1972 - 1974 Berufsausbildung zum Maschinenbauzeichner
- 1975 - 1978 Studium Allgemeiner Maschinenbau / Hydraulik u. Getriebe-technik an der Fachschule für Maschinenbau Leipzig
- seit 1991 Sekretärin am IWM



### **Dipl.-Ing. Gunter Brzezinski**

- geb. 1949 in Herwigsdorf b. Löbau
- 1968 - 1972 Studium Maschinenbau / WZM-Konstruktion an der TUD
- 1981 - 1990 Leiter Rationalisierungsmittel Kupplungswerk Dresden
- 1991 - 2000 Prokurist/Geschäftsführer ITI GmbH
- seit 2001 Wiss. Mitarbeiter am IWM
- Leiter Organisation Lehre u. Forschung



### **Dipl.-Ing. Christian Friedrich**

- geb. 1984 in Werdau
- 2003 - 2008 Studium Mechatronik an der TU Dresden
- seit 2009 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dipl.-Math. Alexander Galant**

- geb. 1981 in St. Petersburg
- 1999 - 2000 Studium Mathematik an der TU St. Petersburg
- 2001 - 2007 Studium Angewandte Mathematik an der TU Dresden
- 2007 - 2010 Wiss. Mitarbeiter am Inst. f. Wiss. Rechnen der TU Dresden
- seit 2010 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dipl.-Inf. Kay K. Großmann**

- geb. 1975 in Dresden
- 1994 - 1996 Berufsausbildung als Bankkaufmann
- 2000 - 2007 Informatik-Studium an der TU Dresden
- seit 2007 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dr.-Ing. André Hardtmann**

- geb. 1967 in Dresden
- 1989 - 1994 Studium Produktionstechnik / Umformtechnik an der TUD
- 1994 - 1999 Wiss. Mitarbeiter am Lehrstuhl Ur- u. Umformtechnik d. TUD
- 2000 Forschungsingenieur bei Dr. Mirtsch GmbH Teltow
- 2000 - 2005 Wiss. Mitarbeiter am Lehrstuhl Ur- und Umformtechnik der TUD
- seit 2005 Wiss. Mitarbeiter am IWM
- Leiter d. Arbeitsgruppe Umformtechnik



### **Dipl.-Wirt.-Inf. Michaela Helbig**

- geb. 1983 in Bautzen
- 2002 - 2009 Studium Wirtschaftsinformatik an der TU Dresden
- seit 2009 Wiss. Mitarbeiterin am IWM



### **Dipl.-Ing. Hubert Höfer**

- geb. 1983 in Bautzen
- 2003 - 2008 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 2009 Wiss. Mitarbeiter am IWM





### **Dipl.-Ing. Olaf Holowenko**

- geb. 1981 in Gera
- 2001 - 2006 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 2006 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dr.-Ing. Bernd Kauschinger**

- geb. 1968 in Schkeuditz
- 1990 - 1995 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 1995 Wiss. Mitarbeiter am IWM
- Leiter der Arbeitsgruppe Steuerungstechnik



### **Dipl.-Ing.(FH) Holger Kretzschmar**

- geb. 1972 in Dresden
- 1994 - 1998 Studium Automatisierungstechnik an der HTW Dresden
- seit 1998 Technischer Mitarbeiter am IWM
- Leiter des Werkzeugmaschinen-Versuchsfeldes



### **Dipl.-Ing. Sebastian Kriechenbauer**

- geb. 1983 in Neustadt a. d. Waldnaab
- 2004 - 2009 Studium Maschinenbau / Allgemeiner u. konstruktiver Maschinenbau an der TU Dresden
- seit 2010 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dipl.-Ing. Sven Krihning**

- geb. 1973 in Dresden
- 1994 - 1999 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenkonstruktion an der TU Dresden
- 1999 - 2009 Konstrukteur bei Koenig & Bauer AG Radebeul
- seit 2009 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dipl.-Ing. Michael Löser**

- geb. 1976 in Marienberg
- 1997 - 2003 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 2003 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dr.-Ing. Volker Möbius**

- geb. 1944 in Herzogswalde
- 1963 - 1969 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenkonstruktion an der TU Dresden
- 1969 - 1992 Forschung und Entwicklung bei MIKROMAT Dresden
- 1993 - 2010 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dr.-Ing. Andreas Mühl**

- geb. 1964 in Olbernhau
- 1986 - 1991 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 1991 Wiss. Mitarbeiter am IWM
- Leiter der Arbeitsgruppe Struktur- und Prozessanalyse



### **Dr.-Ing. Jens Müller**

- geb. 1972 in Rodewisch
- 1994 - 1999 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 1999 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dipl.-Ing. Lars Penter**

- geb. 1982 in Löbau
- 2001 - 2006 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 2007 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dipl.-Ing. Steffen Rehn**

- geb. 1973 in Dohna
- 1998 - 2003 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenkonstruktion an der TU Dresden
- seit 2004 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dipl.-Ing. (BA) Andreas Richter**

- geb. 1978 in Bautzen
- 1997 - 2000 Studium Technische Informatik an der Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Dresden
- seit 2001 Techn. Mitarbeiter am IWM
- IT-Administrator





### **Dipl.-Ing. Mirko Riedel**

- geb. 1977 in Burgstädt
- 1997 - 2004 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 2004 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dipl.-Ing. Holger Rudolph**

- geb. 1968 in Jena
- 1990 - 1995 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 1995 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dipl.-Ing. Christer-Clifford Schenke**

- geb. 1983 in Saalfeld
- 2002 - 2009 Studium Mechatronik an der TU Dresden
- seit 2010 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dipl.-Ing. Christian Städel**

- geb. 1983 in Cottbus
- 2003 - 2009 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 2009 Wiss. Mitarbeiter am IWM



### **Dipl.-Ing.(FH) Kerstin Wanstrath**

- geb. 1963 in Dresden
- 1983 - 1988 Studium Informationsverarbeitung an der IHS Görlitz
- seit 1993 Techn. Mitarbeiterin am IWM



### **Dr. rer. nat. Hannes Weishart**

- geb. 1963 in Nürnberg
- 1983 - 1988 Studium Physik an der Universität Erlangen
- 1993 - 1998 Postdoktorand am Forschungszentrum Rossendorf
- 1998 - 1999 IT Consultant bei Platinum Technology München
- 1999 - 2007 TUD/IWM, FZ Rossendorf
- 2007 - 2009 Qualitätsmanagement bei QIMONDA Dresden
- seit 2009 Wiss. Mitarbeiter am IWM

**Dr. rer. pol. Jens Weller**

- geb. 1976 in Dresden
- 1996 - 2001 Studium Wirtschaftsinformatik an der TU Dresden
- 2001 - 2003 selbstständiger Softwareentwickler
- 2003 - 2009 Wiss. Mitarbeiter am Lehrstuhl f. Wirtschaftsinformatik der TUD, Systementwicklung
- seit 2010 Wiss. Mitarbeiter am IWM

**Dr.-Ing. Hajo Wiemer**

- geb. 1966 in Dresden
- 1988 - 1993 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 1996 Wiss. Mitarbeiter am IWM
- Leiter der Arbeitsgruppe Prozessketten

**Dipl.-Ing. Sebastian Kalisch**

- geb. 1983 in Eisenhüttenstadt
- 2003 - 2010 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 2010 Wiss. Hilfskraft am IWM



### **Dipl.-Ing. Marcel Merx**

- geb. 1985 in Nordhausen
- 2005 - 2010 Studium Maschinenbau / Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 2010 Wiss. Hilfskraft am IWM



### **Jens Ertel**

- geb. 1961 in Leipzig
- 1977 - 1979 Berufsausbildung als Maschinenbauer
- 1986 - 1988 Meisterausbildung
- 1984 - 2006 Facharbeiter/Meister am IWM der TU Dresden
- seit 2006 Leiter des Labor- und Versuchsfeldverbundes Kutzbach-Bau der TU Dresden



### **Jochen Loose**

- geb. 1959 in Cottbus
- 1975 - 1977 Berufsausbildung als Elektromechaniker
- seit 1977 Facharbeiter im Labor- und Versuchsfeldverbund Kutzbach-Bau der TU Dresden



## **Jens Schober**

- geb. 1967 in Dresden
- 1983 - 1985 Berufsausbildung als Zerspanungsfacharbeiter
- seit 1985 Facharbeiter im Labor- und Versuchsfeldverbund Kutzbach-Bau der TU Dresden



## **Stefan Scholz**

- geb. 1968 in Dresden
- Berufsausbildung als Elektromechaniker
- seit 2005 Facharbeiter im Labor- und Versuchsfeldverbund Kutzbach-Bau der TU Dresden
- 2006 - 2008 Ausbildung zum Industriemeister Elektrotechnik
- seit 2006 stellvertretender Leiter des Labor- und Versuchsfeldverbundes Kutzbach-Bau



## **Martin Schwabe**

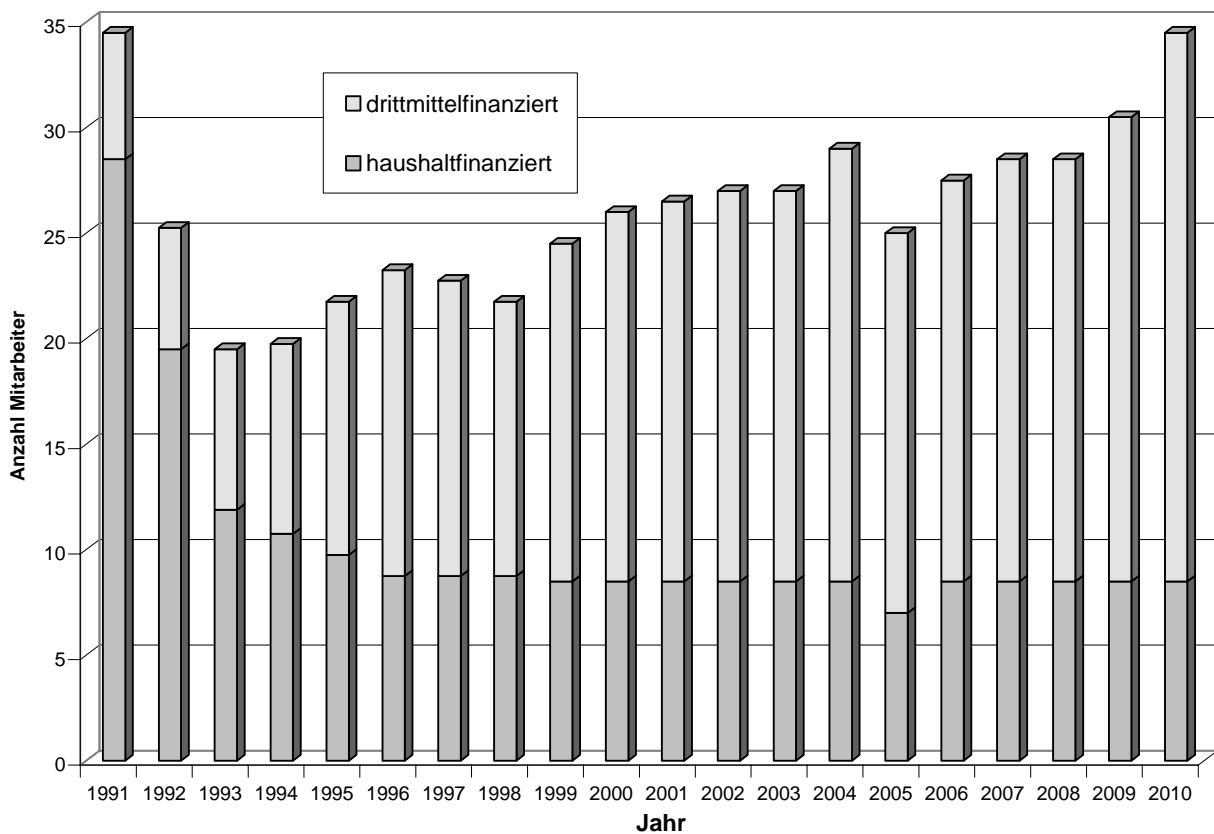
- geb. 1987 in Dippoldiswalde
- 2004 - 2008 Berufsausbildung als Industriemechaniker
- seit 2008 Facharbeiter im Labor- und Versuchsfeldverbund Kutzbach-Bau der TU Dresden





## André Thasler

- geb. 1985 in Dresden
- Berufsausbildung als Industriemechaniker
- seit 2006 Facharbeiter im Labor- und Versuchsfeldverbund Kutzbach-Bau der TU Dresden



Entwicklung der Mitarbeiterzahl am IWM

## 2.2 Ausstattung

### 2.2.1 Messtechnische Ausstattung

#### Messplatz für geometrische Prüfungen und Maschinenabnahmen

- Ausrüstung
- Laser-Interferometer-System (RENISHAW ML 10/EC 10)
  - Teleskop-Kugelstab (RENISHAW QC10)
  - Elektronisches Neigungsmessgerät (WYLER Minilevel NT)
- Messumfang
- Geometrische Genauigkeit nach DIN ISO 230-1 (Geradheit, Rechtwinkligkeit, Neigung, Ebenheit)
  - Geometrisch-kinematische Genauigkeit (Geradheit, Rechtwinkligkeit, Neigung, Ebenheit)
  - Positionierunsicherheit und Wiederholpräzision d. Positionierung numerisch gesteuerter Achsen nach DIN ISO 230-1 (VDI/DGQ 3441 u. a.)
  - Kreisformprüfung für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen nach DIN ISO 230-4
  - Dynamische Messungen (Weg, Geschwindigkeit)

#### Messplatz zur statischen Maschinenuntersuchung

- Ausrüstung
- Mechanische und hydraulische Belastungseinrichtungen
  - Sensoren und Messverstärker für Weg und Kraft
  - Systeme zur allgemeinen Messwerterfassung und -verarbeitung
- Messumfang
- Verformungsanalyse
  - Belastungsanalyse

#### Messplatz zur dynamischen Maschinenuntersuchung

- Ausrüstung
- Elfkanal-Schwingungsanalysesystem
  - Vierkanal-Echtzeit-Frequenzanalysator (FFT)
  - Zweikanal-Echtzeit-Frequenzanalysator (Ortskurvenmessplatz)

- 6-Komponenten-Kraftmesstechnik
- Systeme zur allgemeinen Messwerterfassung und -verarbeitung
- Schwingungserreger (elektrodynamisch, Impulshammer)
- Sensoren, insbesondere für Weg, Beschleunigung und Kraft
- Messverstärker
- Speicheroszilloskop

- Messumfang
- Signalanalyse im Zeit- und Frequenzbereich
  - Schwingungsformanalyse
  - Modalanalyse
  - Prozesskraftanalyse

### **Messplatz für thermische Maschinenuntersuchungen**

- Ausrüstung
- Vielstellenmesseinrichtung (64 Kanäle), rechnerbedienbar mit Messwertverarbeitungsmöglichkeit
  - Temperatursensoren
  - Wegsensoren

- Messumfang
- Temperaturen
  - Verlagerungen
  - Wärmebilanzen

### **Messplatz zur Geräuschuntersuchung von Maschinen**

- Ausrüstung
- Zweikanal-Echtzeit-Frequenzanalysator
  - Präzisionsimpulsschallpegelmesser
  - Messmikrofon
  - Schallintensitätsmesssonde

- Messumfang
- Geräuschmessungen an Maschinen nach DIN 45635 (E DIN ISO 230-5)
  - Lärmquellenanalyse



## 2.2.2 Rechentechnische Ausstattung

### Hardware

PC Intel Pentium      PC AMD Athlon      WS Silicon Graphics

### Betriebssysteme

MS Windows NT 4 / 2000 / XP      IRIX  
Linux      Mac OS

### Netzwerk

Server (Linux) / Client (MS Netzwerk, TCP-IP)  
Internet 100 Mbit/s  
WLAN für Anbindung von Versuchsständen

### Anwendungssoftware

MS Office 2000	MS Visual C++	SolidWorks
Adobe Acrobat 7	Borland C++	Matlab/Simulink
Adobe Photoshop	Borland Delphi	ITI-SIM
CorelDRAW 12	MathCAD 2001	SimulationX
Studio 3	DIAdem	LS-DYNA
Designer	ANSYS	HyperWorks



*Bei der Ausbildung im Computer-Pool*

### 2.2.3 Labor- und Versuchsfeldverbund

Das Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik nutzt gemeinsam mit anderen Instituten den Labor- und Versuchsfeldverbund (LVV) Kutzbach-Bau.

Auf den vorhandenen Maschinen können die wesentlichsten Zerspanungsarbeiten (einschließlich CNC-Fräsen), Schweiß-, Montage- und Elektro-/Elektronikarbeiten sowie Trenn- und Umformarbeiten ausgeführt werden.

Maschinen, die im Rahmen von Forschungsaufträgen im Versuchsfeld stehen, gestatten die Ausführung hochgenauer Koordinatenbohr- und -schleifarbeiten. Durch den möglichen Zugriff auf den Maschinenpark des CIMTT sind auch anspruchsvolle Maschinenarbeiten, wie CNC-Drehen, 5-Achs-Fräsen sowie Laser- und Wasserstrahlschneiden realisierbar.



*Fertigungsbereich des LVV Kutzbach-Bau*

## 2.2.4 Werkzeugmaschinen-Versuchsfeld

Das Versuchsfeld ist die leistungsfähige experimentelle Basis für Lehre und Forschung auf dem Gebiet der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen sowie deren Steuerungen.

Gegenstand der Arbeit im Versuchsfeld ist einerseits das Vermitteln praktischer und methodischer Kenntnisse zur experimentellen Analyse sowie zum konstruktiven Aufbau und zu den Eigenschaften typischer Werkzeugmaschinen und deren Hauptkomponenten. Andererseits dienen die modern ausgerüsteten Prüfstände der Bearbeitung aktueller Forschungsprojekte und darauf aufbauender Dienstleistungen.

Mit mobiler Messtechnik können Untersuchungen direkt an Maschinen und deren Komponenten durchgeführt werden:

- Genauigkeitsuntersuchungen,  
z. B. Maschinenabnahme nach DIN ISO 230-1, -2, -4
- Statisches und dynamisches Verhalten, Modalanalyse
- Thermisches Verhalten (DIN ISO 230-3)
- Akustisches Verhalten,  
z. B. Geräuschemessung nach DIN 45635 (E DIN ISO 230-5)



*Blick in das Werkzeugmaschinen-Versuchsfeld*

## **2.2.4.1 Vorschubachse mit linearem Direktantrieb**

### **Aufgabenstellung**

- Wechselwirkung zwischen Antriebs- und Gestelldynamik
- Ermittlung von Modellparametern zur Simulation der Impulskompensation und -entkopplung
- Vergleichsuntersuchungen an Vorschubachsen gleicher Baugröße mit unterschiedlicher Antriebsstruktur

### **Versuchsstandausrüstung**

- Lagegeregelter Vorschubachse
- Kugel-Profilschienenführungen mit integriertem Messsystem

### **Daten**

- Vorschubkraft (max.) 3.800 N
- Dauerkraft 1.500 N
- Geschwindigkeit (max.) 200 m/min
- Beschleunigung (max.) 60 m/s<sup>2</sup>
- Verfahrweg (max.) 1.334 mm
- Tischgröße 440 mm x 555 mm
- Tischbelastung (max.) 163,2 kN
- Kugel-Profilschienenführungen Größe 35

### **Messtechnik**

- Temperaturverteilung
- Positioniergenauigkeit
- Beschleunigung





*Vorschubachse mit Linear-Direktantrieb*

## 2.2.4.2 Impulskompensation und -entkopplung

### Aufgabenstellung

- Wechselwirkung zwischen Antriebs- und Gestelldynamik
- Ermittlung von Modellparametern zur Simulation der Impulskompensation und -entkopplung
- Untersuchung von Kompensationsstrategien bei veränderlicher Gestelldynamik
- Ermittlung des Einflusses von Massen- und Schwerpunktlage auf das Entkopplungs-/Kompensationsergebnis

### Versuchsstandausrüstung

- Zwei lagegeregelte Vorschubachsen
- Kugel-Profilschienenführungen
- Verstellbare Gestellsteifigkeit
- Steuerungsoberfläche zur Bewegungsvorgabe und Messdatenanalyse
- Antriebsansteuerung über SERCOS III
- Sicherheitsstoßdämpfer

### Daten

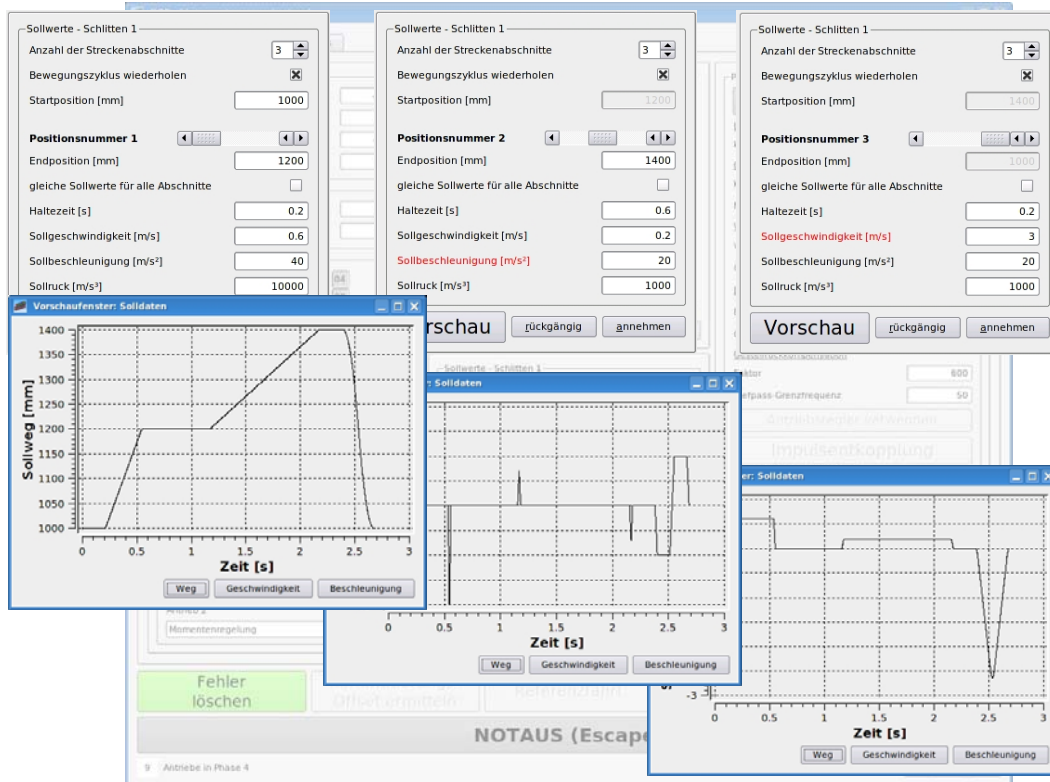
- Vorschubkraft (max.) 3.800 N
- Dauernennkraft 1.200 N
- Geschwindigkeit (max.) 290 m/min
- Beschleunigung (max.) 75 m/s<sup>2</sup>
- Verfahrweg (max.) 2.700 mm
- Tischgröße 2 x 400 mm x 520 mm
- Kugel-Profilschienenführungen Größe 35

### Messtechnik

- Weg (inkremental)
- Beschleunigung (Ferarissensor)
- Strom und Kraft am Motor
- Gestellschwingungen (Lage, Beschleunigung)



Versuchsstand Impulskompensation und -entkopplung



Steuerungsoberfläche

### **2.2.4.3 Vorschubachse mit Kugelgewindetrieb**

#### **Aufgabenstellung**

- Experimentelle Ermittlung von Reibung und Wärmeübertragung an einer Vorschubachse mit Kugelgewindetrieben verschiedener Konfigurationen
- Analyse der Wärmequellen
- Ermittlung der Rückwirkungen thermisch bedingter Form- und Lageänderungen auf Reibung und Bewegungsgenauigkeit
- Vergleich und Bewertung des Verhaltens verschiedener Messsysteme bei instationärer Erwärmung

#### **Versuchsstandausrüstung**

- Lagegeregelter Vorschubtrieb (Servoantrieb)
- Kugelgewindetrieb mit angetriebener Spindel, Doppelmutter mit einstellbarer Vorspannung, axial vorspannbarer Spindel und variabler Endenlagerung
- Lagemessung indirekt über rotatorisches Messsystem oder direkt über in eine Rollen-Profilschienenführung integriertes Messsystem

#### **Daten**

- Motor-Nenn Drehzahl  $4.000 \text{ min}^{-1}$
- Kugelgewindetrieb  $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm T5}$  (gerollt)
- Tischgröße  $470 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$
- Verfahrweg  $1.500 \text{ mm}$
- Rollen-Profilschienenführungen Größe 35

#### **Messtechnik**

- Messung von Drehmomenten und Kräften auf DMS-Basis
- Mehrstellenmesseinrichtung f. Temperaturen u. Verlagerungen
- Laser-Interferometer-System RENISHAW ML 10





*Vorschubachse mit Kugelgewindetrieb*

## 2.2.4.4 Laufeigenschaften von Hauptspindeln

### Aufgabenstellung

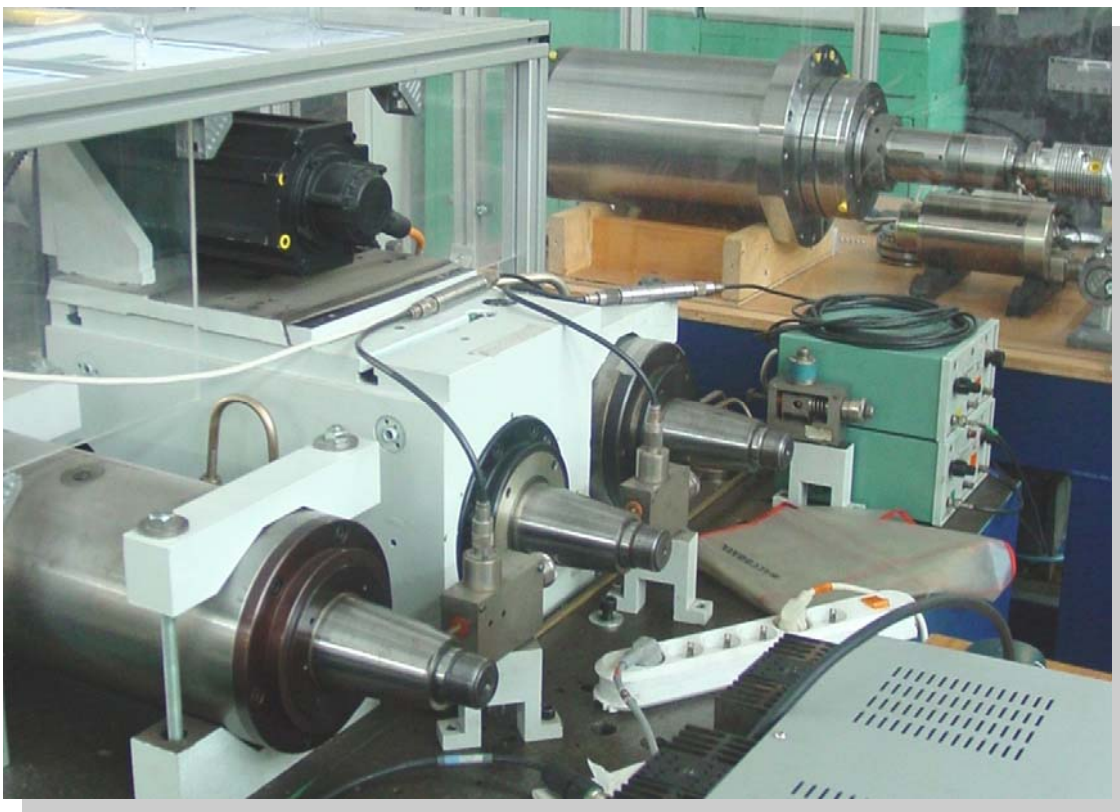
- Analyse und Vergleich der Laufeigenschaften von unterschiedlich gelagerten Genauigkeits-Spindeln
- Signalanalyse zur Ermittlung von Quellen wälzlagerbedingter Störbewegungen
- Ermittlung von Reibmoment und Verlustleistung an einer hydrostatischen Schleifspindel

### Versuchsstandausrüstung

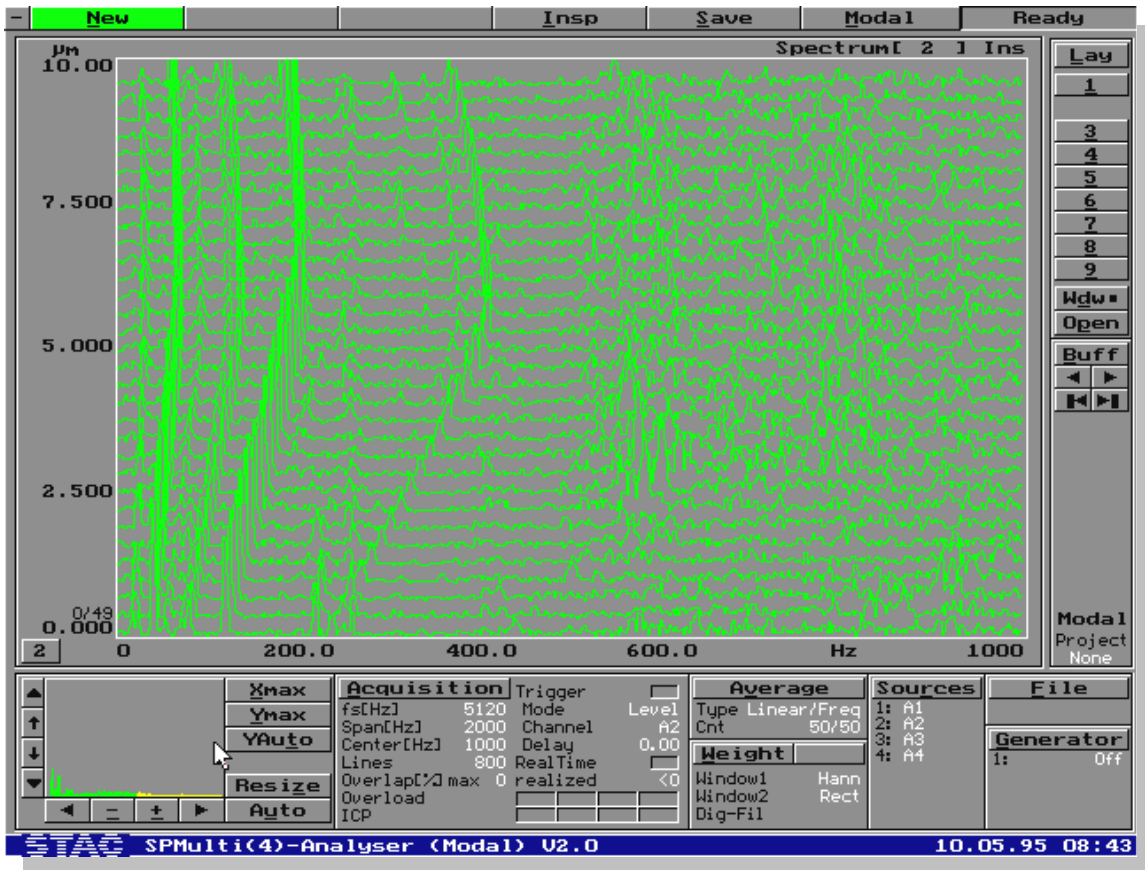
- hydrodynamisch, hydrostatisch und wälzgelagerte Spindeln für das Außenrundschleifen
- Bohrspindeleinheit
- Motor-Spindeln zum Bohrungsschleifen

### Messtechnik

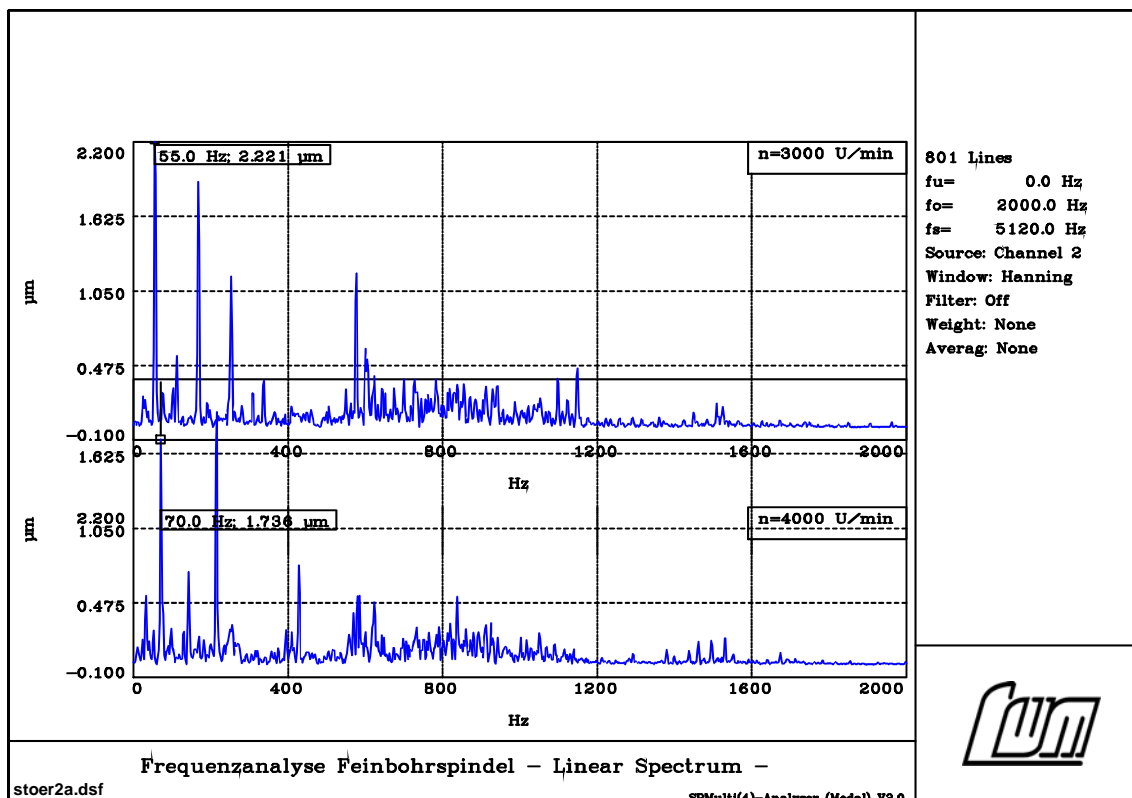
- kapazitive Wegmesseinrichtung
- PC-gestützter Echtzeit-FFT-Analysator



*Hauptspindelprüfstand*



Frequenzanalyse einer Feinbohrspindel bei verschiedenen Drehzahlen



## 2.2.4.5 Motorspindel mit aktiver Magnetlagerung

### Aufgabenstellung

- Einsatz der aktiven magnetischen Spindellagerung zur definierten radialen und axialen Auslenkung sowie Neigung des Spindelkörpers während der Bearbeitung
- Nutzung dieser Möglichkeiten für die Unrundbearbeitung und für die Kompensation von statisch und thermisch verursachten Wirkstellenverlagerungen
- Studentische Ausbildung: Praktikum in den Lehrveranstaltungen der Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung sowie im Fach Bewegungsgeführte Maschinensysteme des Studiengangs Mechatronik

### Versuchsstandausrüstung

- Motorspindel mit aktiver Magnetlagerung, AXOMAT GmbH
- Einbindung mit paralleler Anordnung zu einer Linearvorschubachse in einen Versuchsstand zum Ausbohren

### Daten

- 10 kW (S1)
- $n_{\max} = 30.000 \text{ min}^{-1}$
- fremdgekühlt
- Werkzeugaufnahme HSK-C 40
- dynamisch optimierter Spindelkörper (Leistung des IWM)
- flachheitsbasierte digitale Regelung der aktiven Magnetlagerung auf der Hardwarebasis d-space (Leistung des Instituts für Regelungs- und Steuerungstheorie der TU Dresden)

### Messtechnik

- Erfassung von Daten der Spindel-Regelung (System d-space)
- 6-Komponenten-Kraftmesstechnik zur Erfassung von Zerspankräften (System KISTLER)





## 2.2.4.6 Kupplungsprüfstand

### Aufgabenstellung

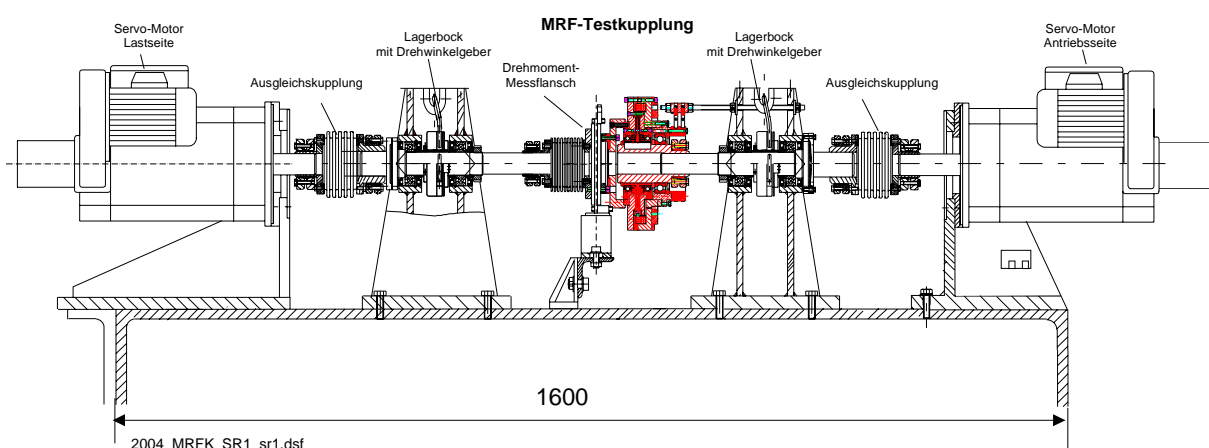
- Ermittlung der Übertragungseigenschaften von Schalt- und regelbaren Kupplungen
- Nachweis der Steuerbarkeit von Drehmomenten mit magnetorheologischen Flüssigkeiten
- Ermittlung der Parameter einer magnetorheologischen Experimentierkupplung
- Optimierung der konstruktiven, magnetischen und elektrischen Auslegung von magnetorheologischen Kupplungen und Bremsen (Variation konstruktiver Parameter sowie der Ansteuerparameter und der Drehzahl)

### Versuchsstandausrüstung

- zwei unabhängig regelbare Servoantriebe

### Messtechnik

- Drehmoment
- Drehzahl
- Temperatur



*Schematischer Aufbau des Prüfstandes mit MRF-Kupplung*



*Ansicht des Kupplungsprüfstandes*

## **2.2.4.7 Prüfstand für Profilschienenführungen nach dem Prinzip "bewegte Wagen"**

### **Aufgabenstellung**

- Lebensdaueruntersuchungen an Kugel-Profilschienenführungen der Baugröße 25 unter konstanter Belastung
- Vergleichende Untersuchung bei der Laufwegermittlung von Profilschienenführungen mittels Prüfstand "bewegte Wagen" und Prüfstand "bewegte Schienen"

### **Versuchsstandausrüstung**

- Antrieb mit Servomotor
- Belastungseinrichtungen für statische Kräfte

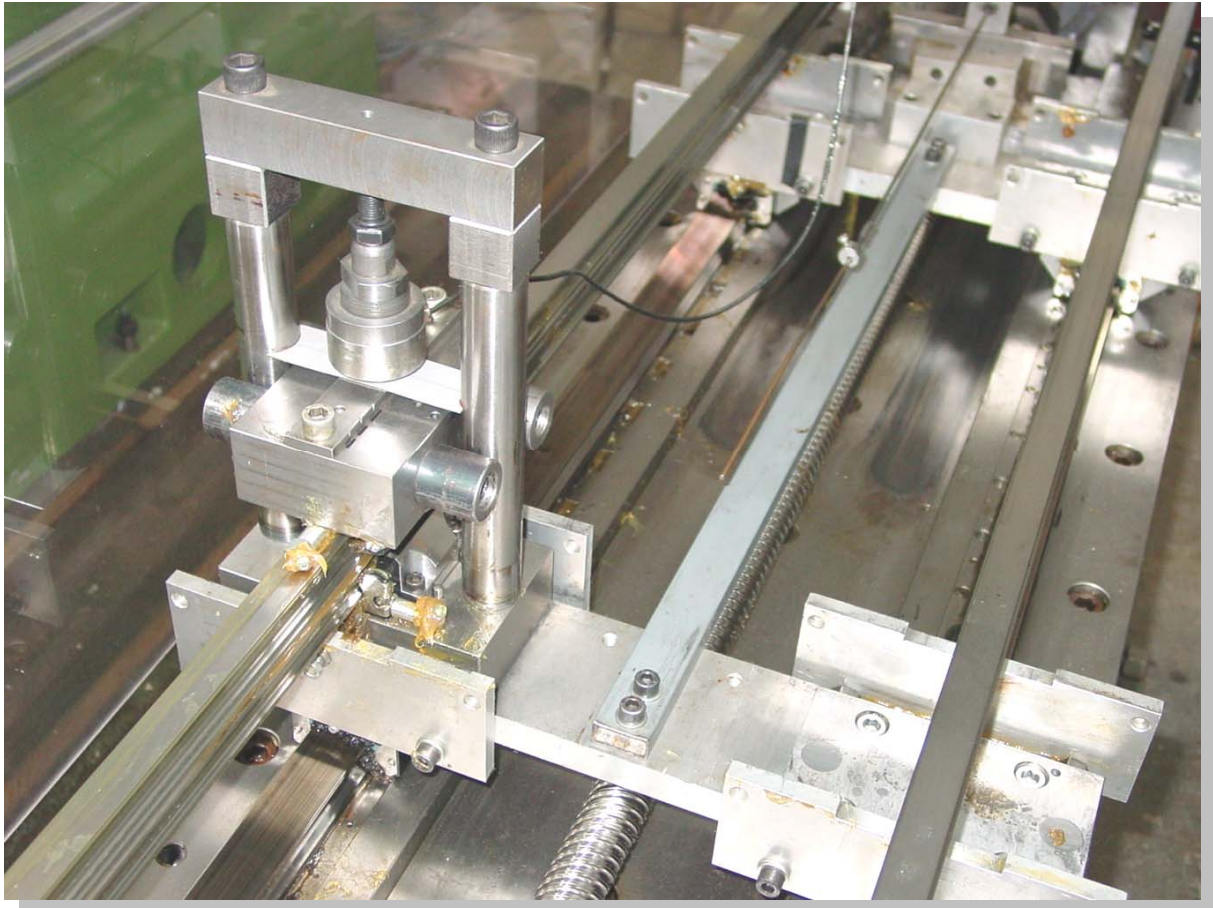
### **Daten**

- Belastungsrahmen (max. 4) zu je 12 kN
- Geschwindigkeit (max.) 0,8 m/s
- Beschleunigung (max.) 10 m/s<sup>2</sup>
- Beschleunigungsverlauf sinusförmig
- Hub (max.) 550 mm
- Messmöglichkeiten für Normalkraft

### **Messtechnik**

- Belastungskraft
- Laufweg (mech. Zähler)





*Lebensdauerprüfstand für PSF "bewegte Wagen"*

## **2.2.4.8 Prüfstand für Profilschienenführungen nach dem Prinzip "bewegte Schienen"**

### **Aufgabenstellung**

- Lebensdaueruntersuchungen an Kugel-Profilschienenführungen der Baugröße 25 unter konstanter Belastung
- Vergleichende Untersuchung bei der Laufwegermittlung von Profilschienenführungen mittels Prüfstand „bewegte Wagen“ und Prüfstand „bewegte Schienen“

### **Versuchsstandausrüstung**

- Antrieb mit Servomotor
- Belastungseinrichtungen für statische Kräfte

### **Daten**

- Belastungsplatten (max. 8) zu je 12 kN
- Geschwindigkeit (max.) 0,8 m/s
- Beschleunigung (max.) 10 m/s<sup>2</sup>
- Beschleunigungsverlauf sinusförmig
- Hub (max.) 500 mm
- Messmöglichkeiten für Normalkraft

### **Messtechnik**

- Belastungskraft
- Laufweg (elektronischer Zähler)



*Lebensdauerprüfstand für PSF "bewegte Schienen"*

## 2.2.4.9 Hexapod 1

### Aufgabenstellung

- Kinematische Kalibrierung
- Adaptive Prozessführung
- Referenzierung von Werkstück und Werkzeug
- Modellbasierte, steuerungsintegrierte Korrekturen systematischer Fehlerwirkungen (geometrisch, elastostatisch, thermisch)

### Versuchsstandausrüstung

- Bewegungseinrichtung mit Freiheitsgrad 6
- Hexapodspezifische Bedienoberfläche mit Netzwerkanbindung
- Entwicklungsplatz für eigene Steuerungs-Funktionalität
- Frässpindel 10 kW, 21.000 min<sup>-1</sup>, Wasserkühlung
- REFU-Spindelumrichter mit digitalem SERCOS-Interface

### Messtechnik

- 6-Komponenten-Kraftmessplattform KISTLER
- Genauigkeits-Messsystem (Double-Ball-Bar) RENISHAW QC 10
- Laser-Interferometer RENISHAW ML 10

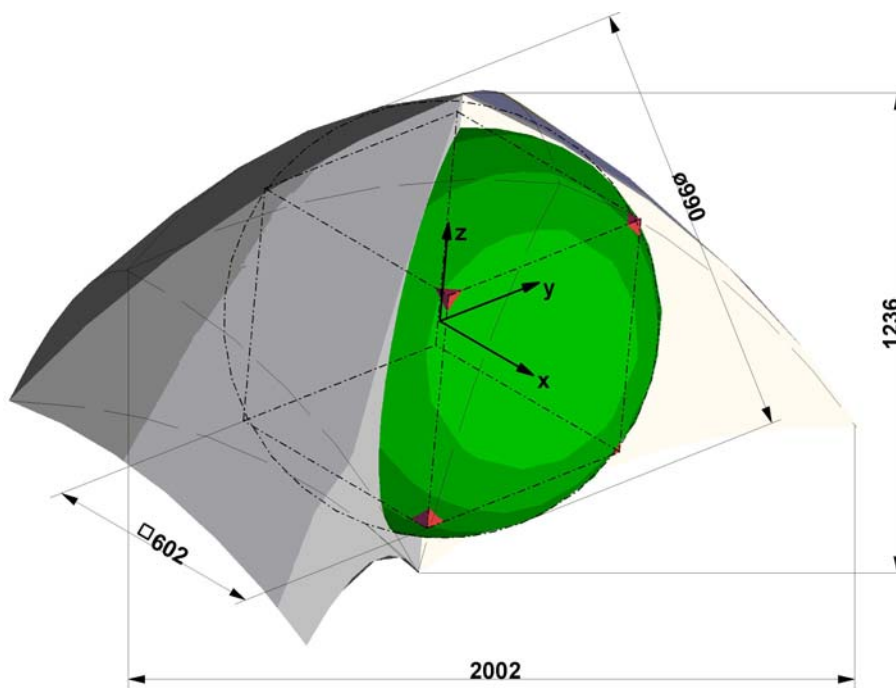
### Technische Spezifikation

- Arbeitsraum: Gelenkkreis Boden 3.000 mm  
Gelenkkreis Plattform 1.200 mm  
Auskragung 600 mm
- Komponenten: Kugelgewindetriebe, Servomotoren,  
Multi-Turn-Messsysteme
- Steuerung: Bosch Typ 3 OSA
- Stabachs-Stellwege: 980 mm
- Plattformwege (TCP) max.: horizontal 1.900 mm  
vertikal 1.200 mm
- Plattformneigung max. ± 50 °
- Drehung um z max. ± 60 °
- Zusatzmasse Plattform max. 100 kg
- Kräfte an Plattform max. 3 kN
- Geschwindigkeit max. 50 m/min





*Parallelkinematische Bewegungseinrichtung "Hexapod FELIX"*



*Größe und Form des Arbeitsraumes*

## 2.2.4.10 Hexapod 2

### Aufgabenstellung

- Geometrisch-kinematische Korrektur an einer Parallelkinematik
- Optische Referenzierung
- Alternative Konzepte für 3D-Handling und -Bearbeitung
- Bearbeitungszentrum z. B. für Holzformteile
- Richtzentrum z. B. für geschweißte Baugruppen
- Bewegungseinrichtung, z. B. für das Plasmaschneiden und Stapeln textiler Preforms

### Versuchsstandausrüstung

- Bewegungseinrichtung mit Freiheitsgrad 6
- Hexapodspezifische Bedienoberfläche mit Netzwerkanbindung
- Offenes Steuerungssystem Bosch Typ 3 OSA mit digitalen Antrieben
- Programmierarbeitsplatz zur Entwicklung eigener Steuerungs-Funktionalität
- Frässpindel 1,7 kW, 2.400 min<sup>-1</sup>, Luftkühlung, pneumatische Werkzeugspannung SK 30
- Frässpindel 7,8 kW, 17.400 min<sup>-1</sup>, Luftkühlung, Werkzeug-Spannzange 8 bis 12 mm
- Modulare pneumatische Spann- und Greifvorrichtungen für das Handling von Holzformteilen und textilen Preforms
- Abzugseinrichtung für textile Materialien
- Spezialwerkzeug für das Thermoglätten von Holz und Holzwerkstoffen
- Plasmabrenner zum Schneiden von HGTT-Halbzeugen
- Industrielle Staub-/Späneabsaugung

### Messtechnik

- Bildverarbeitungssystem zur Form- und Lageerkennung des zu bearbeitenden Werkstücks
- weitere s. Pkt. 2.2.4.9

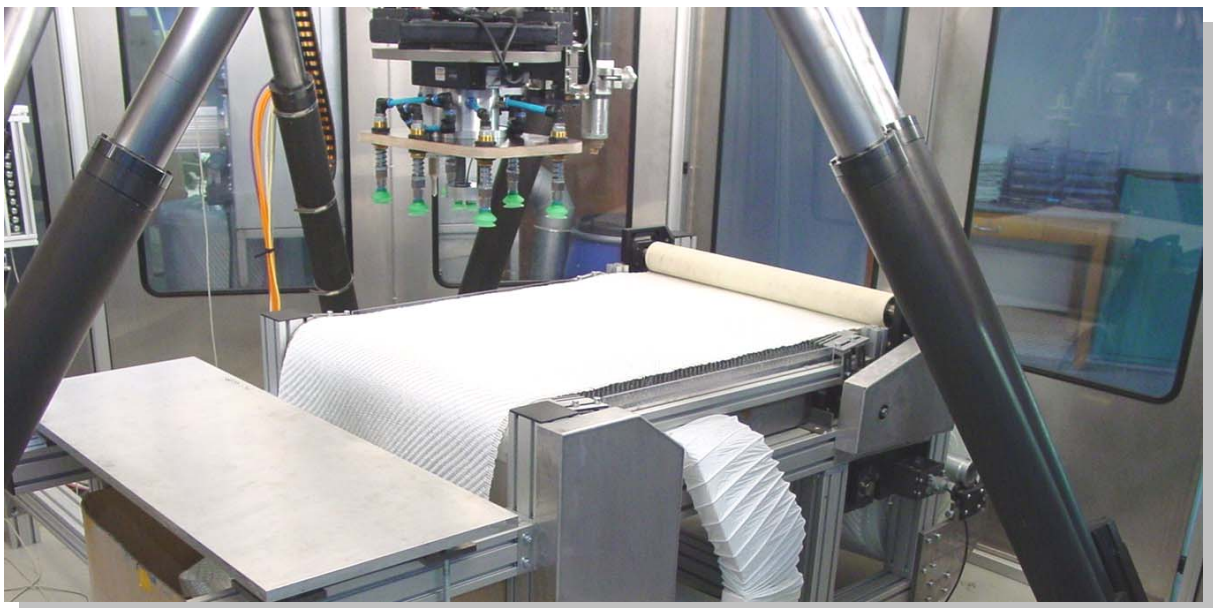
### Technische Spezifikation

- identisch zu Hexapod unter Pkt. 2.2.4.9





*Hexapod mit Ausrüstung für Plasmaschneiden und Handling von Hybridgarn-Textil-Thermoplast (HGGT)-Halbzeugen*



*Sauggreifer und Plasmabrenner*

## 2.2.4.11 Hexapod 3

### Aufgabenstellung

- Parallelkinematisches Bearbeitungszentrum mit hoher Flexibilität in Werkzeugkonfiguration und Werkstückhandhabung
- Technologien zur effizienten und automatisierten Referenzierung von Werkzeugen und Werkstücken im Arbeitsraum

### Versuchsstandausrüstung

- Bewegungseinrichtung mit Freiheitsgrad 6 (MiniHex)
- Bewegung des Werkstückes relativ zu den feststehenden Werkzeugen
- Zweiter, fest angeordneter Greifer zum Umgreifen des Werkstückes für eine 6-Seiten-Bearbeitung

### Messtechnik

- s. Pkt. 2.2.4.9

### Technische Spezifikation

- Arbeitsraum:  $x_{\max} = 1.340 \text{ mm}$   
 $y_{\max} = 1.240 \text{ mm}$   
 $z_{\max} = 560 \text{ mm}$
- Plattformneigung:  $\varphi_{x,y,z_{\max}} = \pm 45^\circ$
- Geschwindigkeit:  $v_{\max} = 60 \text{ m/min}$





*MiniHex bei der Bearbeitung von Holzkugeln*

## 2.2.4.12 Versuchsträger MAX

### Aufgabenstellung

- Schaffen einer 3-achsigen Präzisions-Bewegungseinrichtung (X, Y, Z), welche die gezielte Fehlerkorrektur in allen 6 Freiheitsgraden ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ,  $\Delta \varphi_x$ ,  $\Delta \varphi_y$ ,  $\Delta \varphi_z$ ) unter Ausnutzung der parallelen Antriebe in Y und Z ermöglicht
- Verringerung der erforderlichen mechanischen Bewegungsgenauigkeit durch die Korrekturfunktionalitäten
- Realisierung der Impulskompensation in der X- und Y-Achse (impulskompensierter Kreuzschieber)
- Wirkung der resultierenden Antriebskräfte im Schwerpunkt der bewegten Baugruppen für verminderte Schwingungsanregung
- Einsatz gelenkiger Anbindungen zwischen Gewindetrieben sowie Linearführungen, um die geforderten Korrekturbewegungen mit minimalem Kraftaufwand zu gewährleisten
- Modulare Bauweise der einzelnen Funktionsbaugruppen, um eine getrennte Inbetriebnahme und Analyse zu ermöglichen
- Realisierung der bewegten Baugruppen in Leichtbauweise (Aluminium-Platten) unter Anwendung von mittels Zugankern verspannten reibschlüssigen Verbindungen
- Anbringung der Hauptspindel an einer leichten und steifen Stabwerkskonstruktion

### Versuchsstandausrüstung

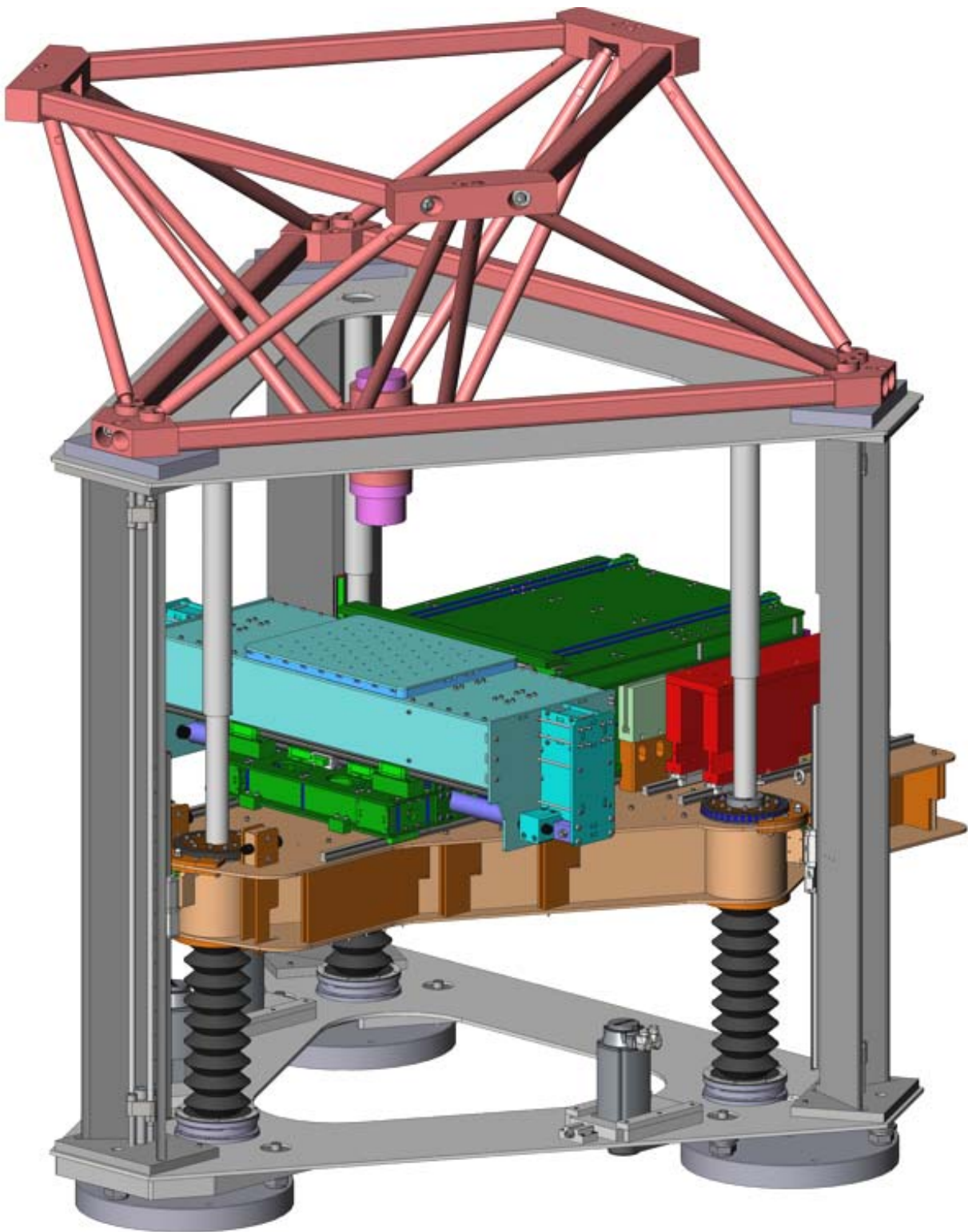
- Bewegungseinrichtung mit Freiheitsgrad 6 (MAX)
- Kugelgewindeantriebe in den 3 Z-Achsen (Steigung 10 mm)
- Servomotoren BoschRexroth Indradyn MSK 061C
- Zahnriemenstufe 1:1
- 2 Y-Nutz- und Kompensationsantriebe (eisenlose Lineardirektantriebe Parker ML50)
- 1 X-Nutz- und 2 X-Kompensationsantriebe (eisenlose Lineardirektantriebe Parker ML50)
- Kugel-Profilschienenführungen mit integriertem Messsystem
- PC-basierte, offene Steuerung (Eigenentwicklung), Kommunikation mit den Antrieben über EtherCAT (0,5 ms Zykluszeit)

## Messtechnik

- Kraftmessdosen in den Stäben der Stabwerksstruktur zur Erfassung der Prozesslasten in allen Freiheitsgraden
- Bildverarbeitungssystem zur photogrammetrischen Vermessung und Lagebestimmung

## Technische Spezifikation

- Verfahrenswege: X = 450 mm  
Y = 400 mm  
Z = 500 mm  
Kompensation X = 140 mm  
Kompensation Y = 180 mm
- Winkelkorrekturvermögen maximal ca. 200  $\mu\text{m}/\text{m}$
- alle Bewegungen auf der Werkstückseite
- Maximale Vorschubgeschwindigkeiten:  
X = 90 m/min  
Y = 90 m/min  
Z = 30 m/min
- Maximale Beschleunigungen:  
X = 20  $\text{m}/\text{s}^2$   
Y = 20  $\text{m}/\text{s}^2$   
Z = 10  $\text{m}/\text{s}^2$
- Vorschubkräfte der Direktantriebe:  
0,6 kN (Dauer)  
2,5 kN (maximal)
- Frässpindel (GMN) 10 kW mit 21.000  $\text{min}^{-1}$



*CAD-Modell Versuchsträger MAX*



## 2.2.4.13 Programmierung der Funktionssteuerung von Fertigungssystemen (SPS)

### Aufgabenstellung

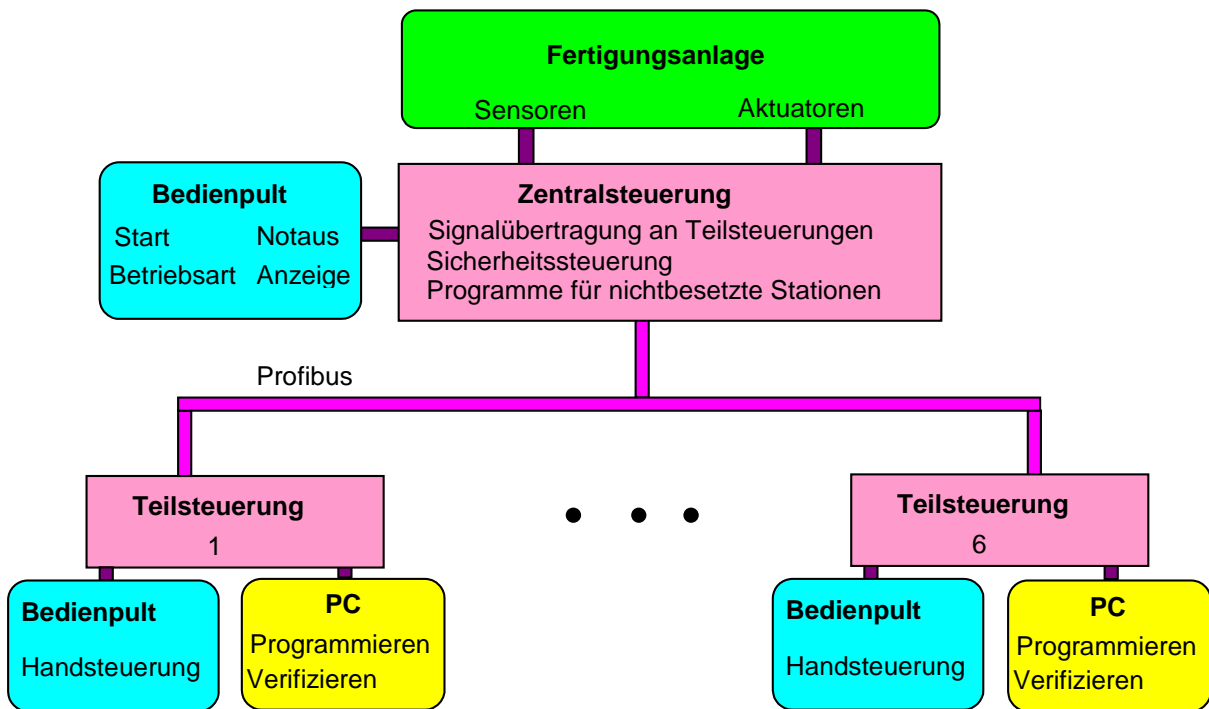
- Modulare Programmierung des asynchronen Ablaufs einzelner Arbeitsstationen
- Koordinierung ihres Zusammenwirkens in einem Fertigungssystem

### Versuchsstandausrüstung

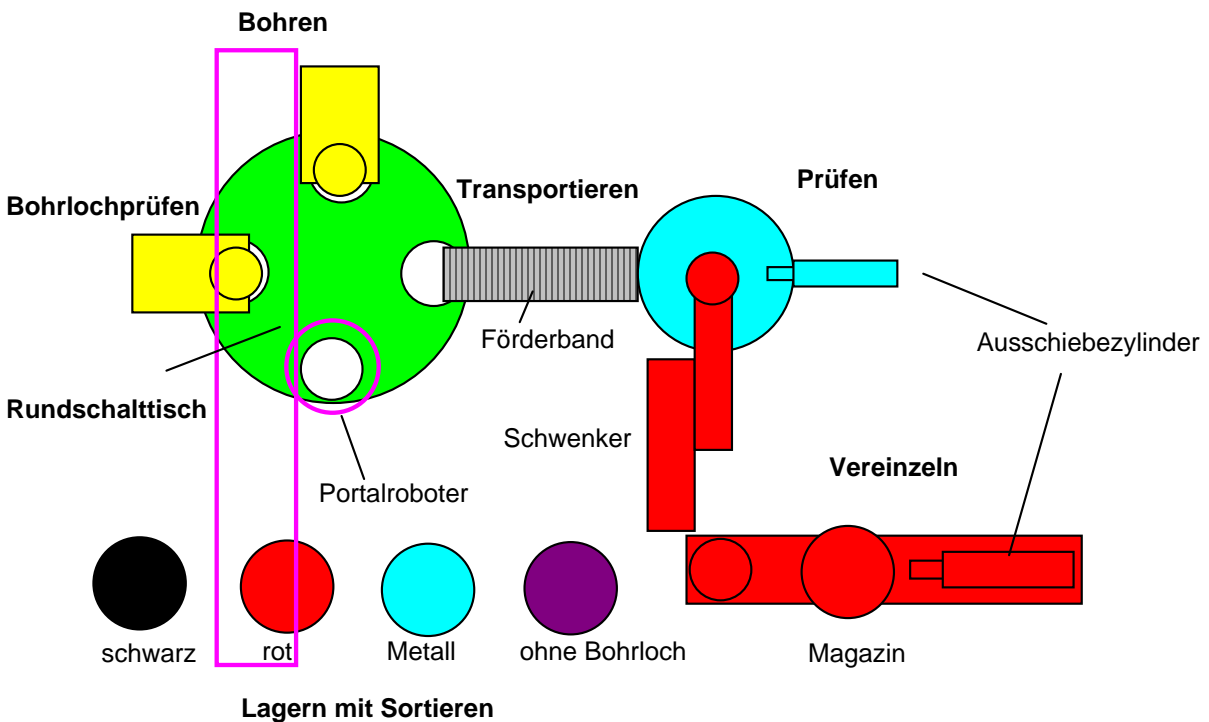
- Modell eines Fertigungssystems mit zentraler SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung)
- sechs über Feldbus angeschlossene Studentearbeitsplätze mit modularen SPS



*Lehrkabinett  
für die Programmierung der SPS eines modular aufgebauten  
Fertigungssystem-Modells*



*Aufbau des Lehrkabinetts*



*Aufbau des Fertigungssystems*

## 2.2.4.14 Geräuschuntersuchungen an Werkzeugmaschinen

### Aufgabenstellung

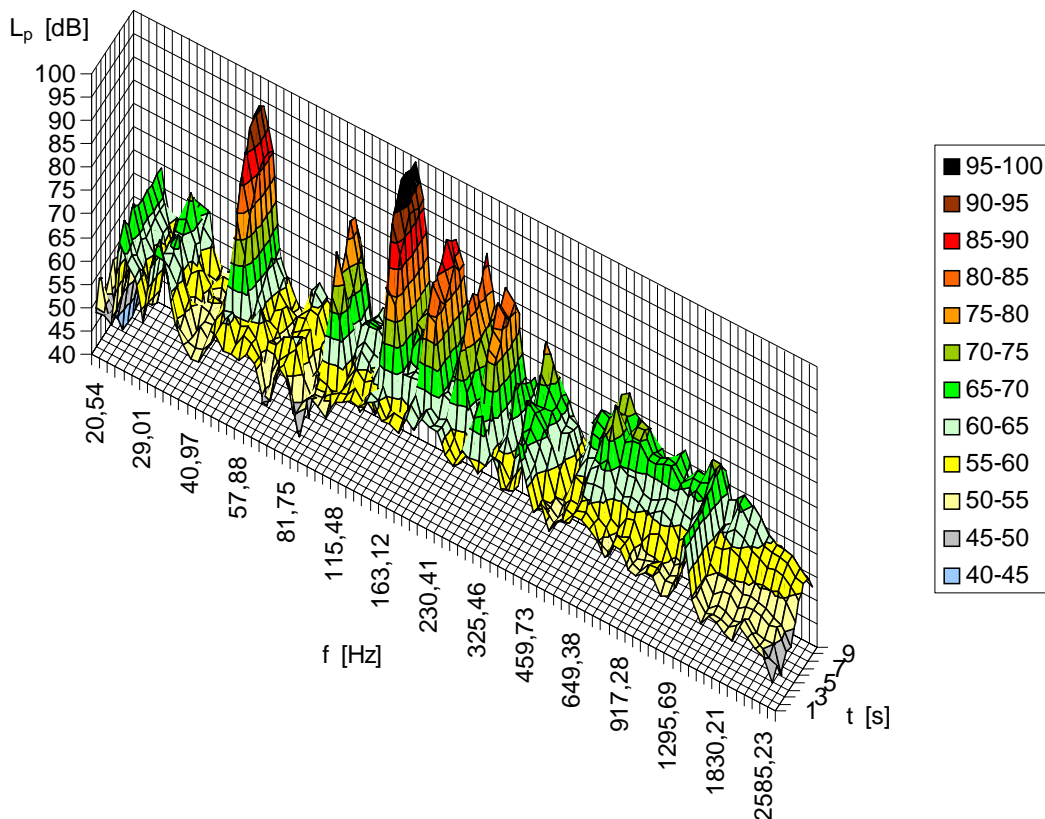
- Einführung in den Lärmschutz
- Messung von Lärmkenngrößen mit verschiedenen Messverfahren
- Kennen lernen von Analysemethoden und Lärminderungsmaßnahmen

### Versuchsstandausrüstung

- Versuchsdurchführung nach DIN 45635 T. 1 (Hüllflächenverfahren)
- Frequenzanalyse zur Lärmquellenortung

### Messtechnik

- Schalldruckpegel-Messgerät
- Schallintensitäts-Messgerät



*Schalldruckpegel-Multispektrum eines Umformvorganges*



*Schallintensitätsmessung an einer Drehmaschine*

## 2.2.4.15 Positioniergenauigkeit von Werkzeugmaschinen

### Aufgabenstellung

- Statistische Prüfung der Positionsunsicherheit numerisch gesteuerter Achsen mit dem Laser-Interferometer RENISHAW ML 10
- Statistische Auswertungsverfahren nach DIN ISO 230-2 Prüfregele für Werkzeugmaschinen, Teil 2: Bestimmung der Positionsunsicherheit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen (bisher VDI/DGQ 3441)
- Untersuchung maschinenbedingter Einflüsse auf den Positioniervorgang

### Versuchsstandausrüstung

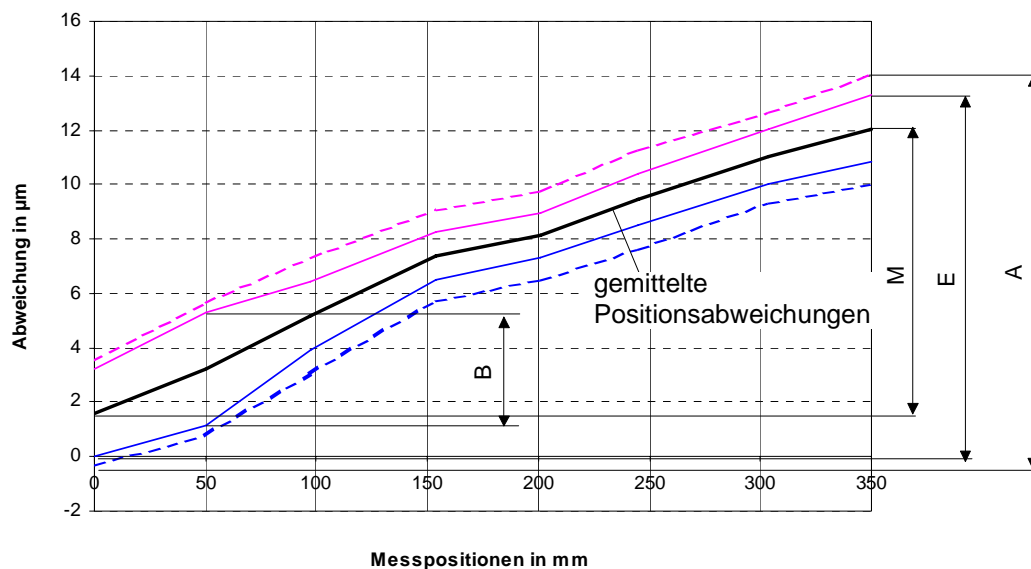
- Durchführung der Messungen unter Nutzung der lagegeregelten x-Achse einer CNC-Fräsmaschine

### Messtechnik

- Laser-Interferometer RENISHAW ML 10  
Messparameter für: lineare Verschiebung
  - Messbereich 0,1 bis 40 m
  - Genauigkeit  $\pm 1,1 \mu\text{m}/\text{m} + 0,025 \mu\text{m}$
  - Auflösung 0,001  $\mu\text{m}$lineare Geschwindigkeit
  - Messbereich 1 m/s
  - Genauigkeit + 0,05 %
  - Auflösung 0,05  $\mu\text{m}/\text{s}$



Laser-Interferometer bei einer linearen Verschiebungsmessung



B – Umkehrspanne einer Achse

M – gemittelte zweiseitige Positionsabweichung einer Achse

E – zweiseitige systematische Positionsabweichung einer Achse

A – zweiseitige Positionierungsunsicherheit einer Achse

Untersuchungsergebnisse für eine Achse



## 2.2.4.16 Kalibrierung von Stabachsen

### Aufgabenstellung

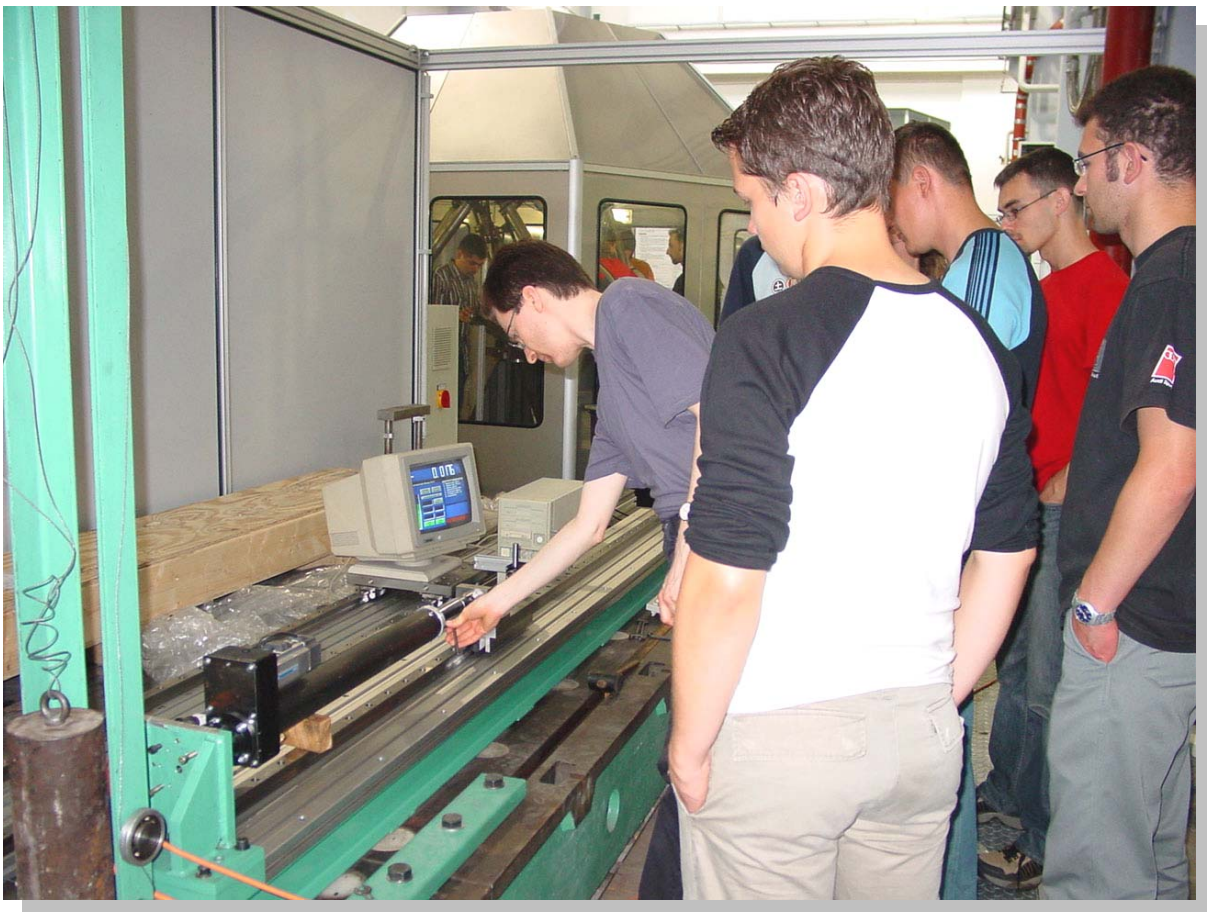
- Einstellung und Optimierung der Lageregelung der Stabachsen
- Referenzierung des Motorgebers an den Stabachsen
- Aufnahme des Spindelsteigungsfehlers der Stabachsen
- Bestimmung der exemplarischen minimalen und maximalen Achslänge (mechanische Anschläge)
- Ausrichtung der Kardangelenkachsen
- Untersuchung des elastischen, thermischen und dynamischen Verhaltens der Stabachsen

### Versuchsstandausrüstung

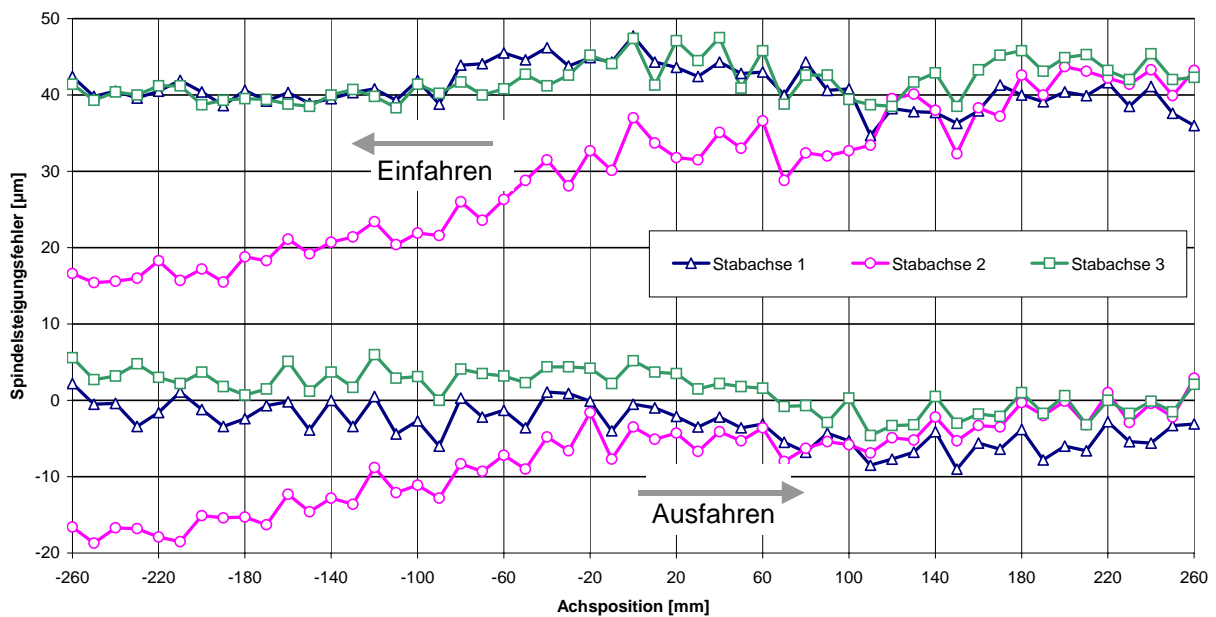
- Prüfstand mit modularen Gelenkaufnahmen für verschiedene Stabachsbauformen und -größen
- auf Profilschiene verschiebbarer Wagen mit Gelenkaufnahme
- Adapter zur Anbringung von Kraftsensoren
- Einrichtung zur Aufbringung von Vorspannungen
- Endmaße als physisch repräsentiertes Bezugsmaß

### Messtechnik

- Laser-Interferometer RENISHAW ML 10 für Referenzmessungen
- GTM-Kraftsensor 0...5 kN zur Ermittlung von Stablängskräften
- STAC-Analysator mit Mehrachs-Beschleunigungssensor für dynamische Untersuchungen



Praktikum am Stabachsprüfstand



Ergebnisse einer Spindelsteigungsfehler-Messung ohne Achslast

---

## 3 Lehre

---



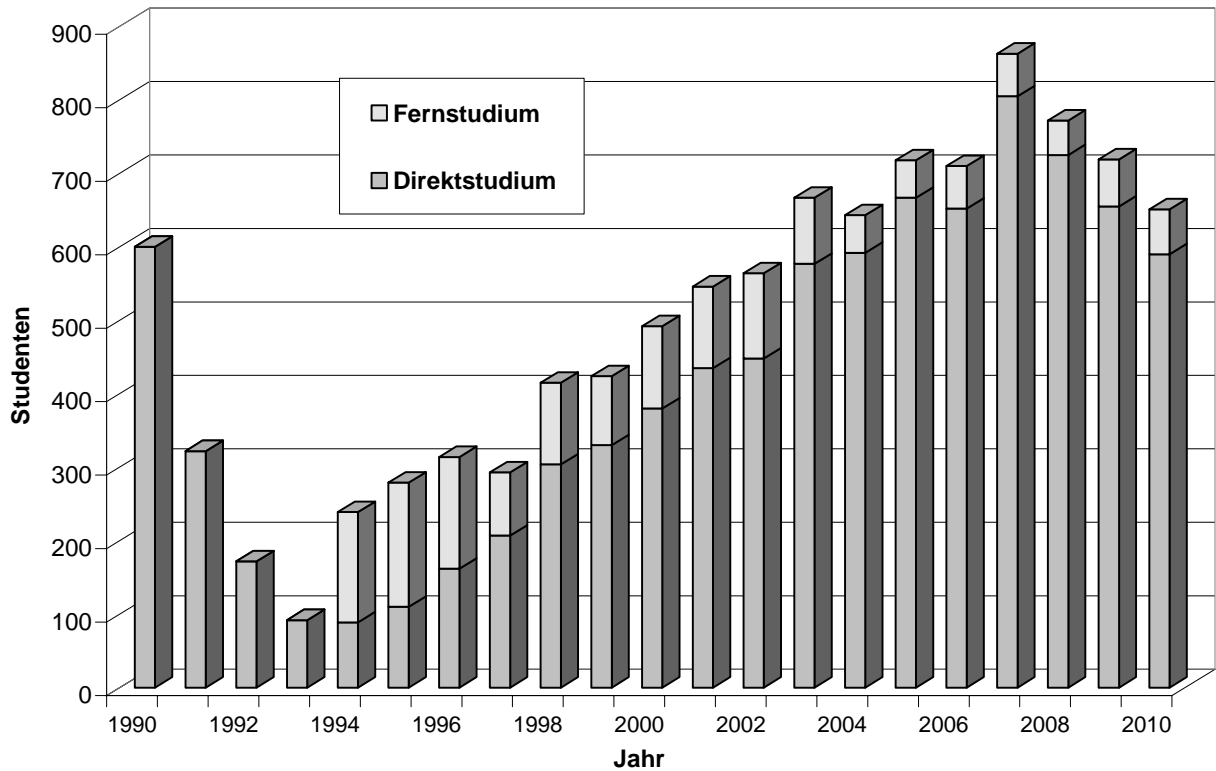
### 3.1 Entwicklungsetappen der vom Institut getragenen Lehre

- ab 1952 Bildung einer selbstständigen Fachrichtung **Werkzeugmaschinen** im Studiengang Maschinenwesen; Ausbildungsschwerpunkte im Direkt- und Fernstudium:
- Vorrichtungs-, Werkzeug- und Werkzeugmaschinenkonstruktion
  - Werkzeugmaschinenlabor
  - fertigungstechnische Versuchsfeldübungen
  - Konstruktionsübungen und Belegarbeiten (Entwerfen von Werkzeugmaschinen, Rationalisierungsmitteln, Verkettungs-, Transport- und Montageeinrichtungen)
  - Steuerung und Automatisierung von Werkzeugmaschinen
  - Hydraulische und pneumatische Antriebe, Steuerungen und Regelungen
- In der Folgezeit auch Angebot der Fach-Grundlagenlehreveranstaltungen für weitere Fachrichtungen: Fertigungstechnik, Arbeitswissenschaften, Berufspädagogik.
- 1965 Eine erste Studentengruppe absolviert für sechs Monate ein Ingenieurpraktikum in der Konstruktionsabteilung eines Werkzeugmaschinenbetriebes. Ziel: Entwicklung von Fähigkeiten zur selbständigen schöpferischen Arbeit unter interdisziplinären Praxisbedingungen.
- 1967 Allgemeine Einführung des Forschungs- bzw. Ingenieurpraktikums
- 1968 Die bisherige Fachrichtung Werkzeugmaschinen wird Vertiefungsrichtung in der Fachrichtung Technologie der metallverarbeitenden Industrie.  
Neues Studienfach: EDV in der Konstruktion.

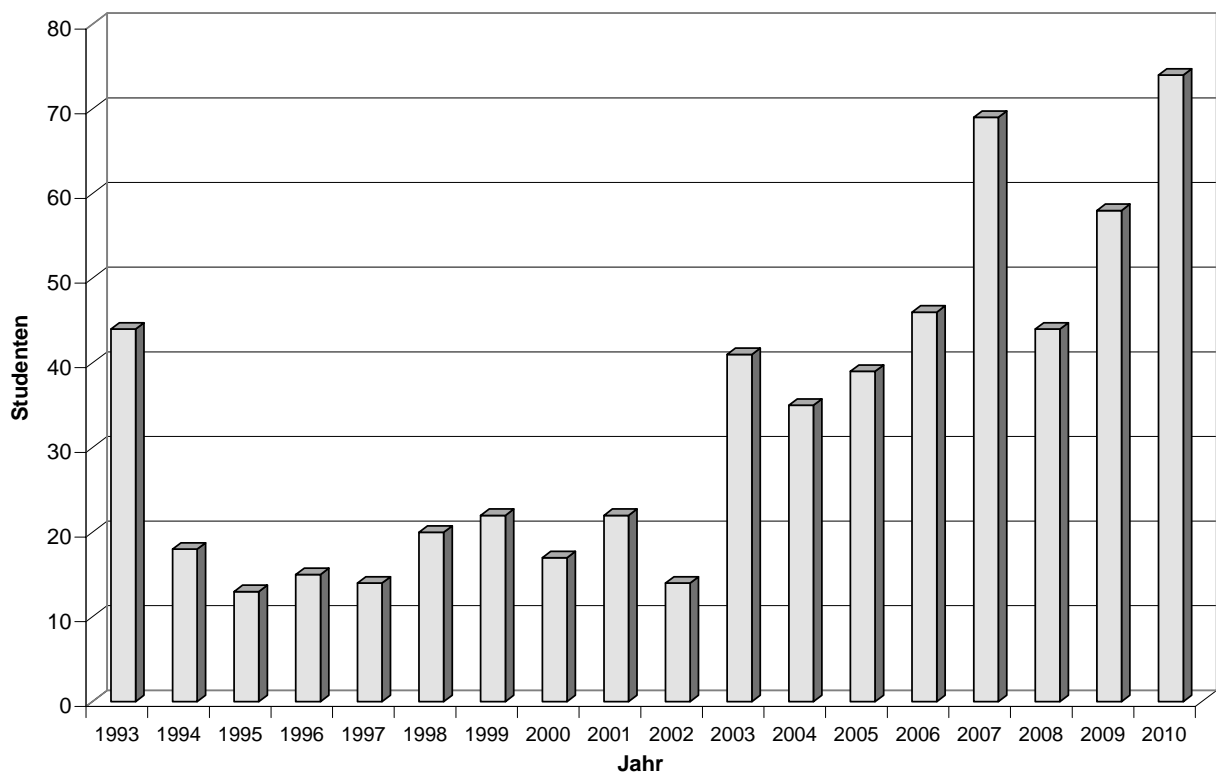
- 1973 Neuprofilierung einer selbstständigen konstruktiven Fachrichtung unter dem Namen **Fertigungsmittelentwicklung**.  
Neue Ausbildungselemente:
- Bildung komplexer Grundlagenfächer wie Konstruktionslehre mit Technischer Darstellungslehre und Maschinenelemente, Elektrotechnik und Elektronik bzw. Mess- und Automatisierungstechnik
  - Zeitlich und inhaltlich gestaffelter Übergang vom Grund- zum Fachstudium, d. h. Beginn der Fachausbildung bereits im Grundstudium
  - Einführung eines 3. und 4. konstruktiven Beleges zum Entwerfen von Werkzeugmaschinen
  - Verstärkte fertigungstechnische Ausbildung der Studenten der Fachrichtung Fertigungsmittelentwicklung in Urform-, Umform-, Abtrenn- und Fügetechnik
- 1983 Weiterentwicklung der Ausbildungskonzeption vor allem durch Einführung rechnerunterstützter Arbeitsweisen in allen Bereichen der Ingenieur Tätigkeit, insbesondere vertiefte Ausbildung in CAD/CAM, Computergrafik, Computergeometrie und Datenbanken, Vergrößerung des Zeitanteils für die selbstständige wissenschaftliche Arbeit der Studenten.
- 1989 Die Fachrichtung erhält die Bezeichnung:  
**Werkzeugmaschinenkonstruktion und Fertigungssysteme**.
- 1990 Eingliederung der Fachrichtung als Vertiefungsrichtung **Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme** in die Studienrichtung Konstruktiver Maschinenbau.  
Zeitliche und inhaltliche Trennung von Grund- und Fachstudium.  
Einführung eines Maschinenkundeversuchsfeldes und eines Beleges zum methodischen Konzipieren und Entwickeln einer Werkzeugmaschine.

- 1994 Erarbeitung neuer Vorlesungskonzepte:
- Grundlagen der Werkzeugmaschinen
  - Baugruppen der Werkzeugmaschinen
  - Rechnerische Analyse von Werkzeugmaschinen
  - SPS-Programmierung von Fertigungseinrichtungen
- 1999 Eingliederung der Fachrichtung als Vertiefungsrichtung **Werkzeugmaschinenentwicklung** in die Studienrichtung Produktionstechnik.
- Konzipierung der Lehrveranstaltungen:
- Werkzeugmaschinenentwicklung II
  - Verhaltensanalyse von Werkzeugmaschinen
  - Simulation technischer Systeme
  - Alternative Antriebs- und Maschinenstrukturen
  - Elektrische Antriebe für Werkzeugmaschinen
- 2002 Angebot der Fach-Grundlagenlehrveranstaltungen für andere Fachrichtungen:
- Werkzeugmaschinen/Grundlagen für Holz- und Faserwerkstofftechnik (im Rahmen von Sonderstudienplänen)
  - Werkzeugmaschinen/Grundlagen für Wirtschaftsingenieure (Bestandteil des Studienplans)
- 2004 Erarbeitung der Lehrveranstaltung:
- Bewegungsgeführte Maschinensysteme (Studiengang Mechatronik - Hauptstudium, Gruppe Anwendungen)
- 2006 Modularisierung des Lehrangebotes für die Studienrichtung Produktionstechnik sowie Vereinheitlichung der Module im Studiengang Mechatronik, der Studienrichtung Produktionstechnik und der Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung.
- 2008 Umfassende Überarbeitung, Neufassung und Erweiterung der Lehrveranstaltungen "Bewegungsgeführte Maschinensysteme" und "Baugruppengestaltung" mit umfangreichen Beispielaufgaben; digitale Vorlesungsskripte.

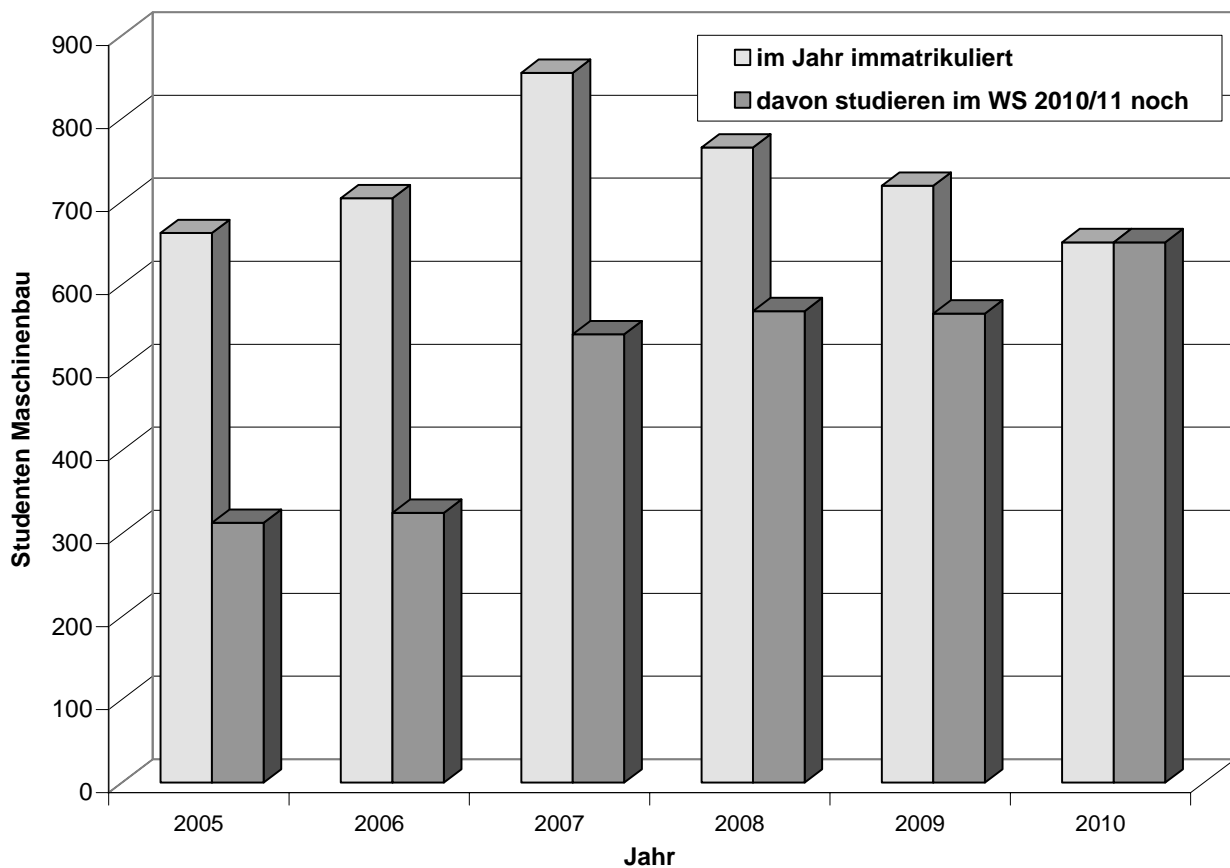




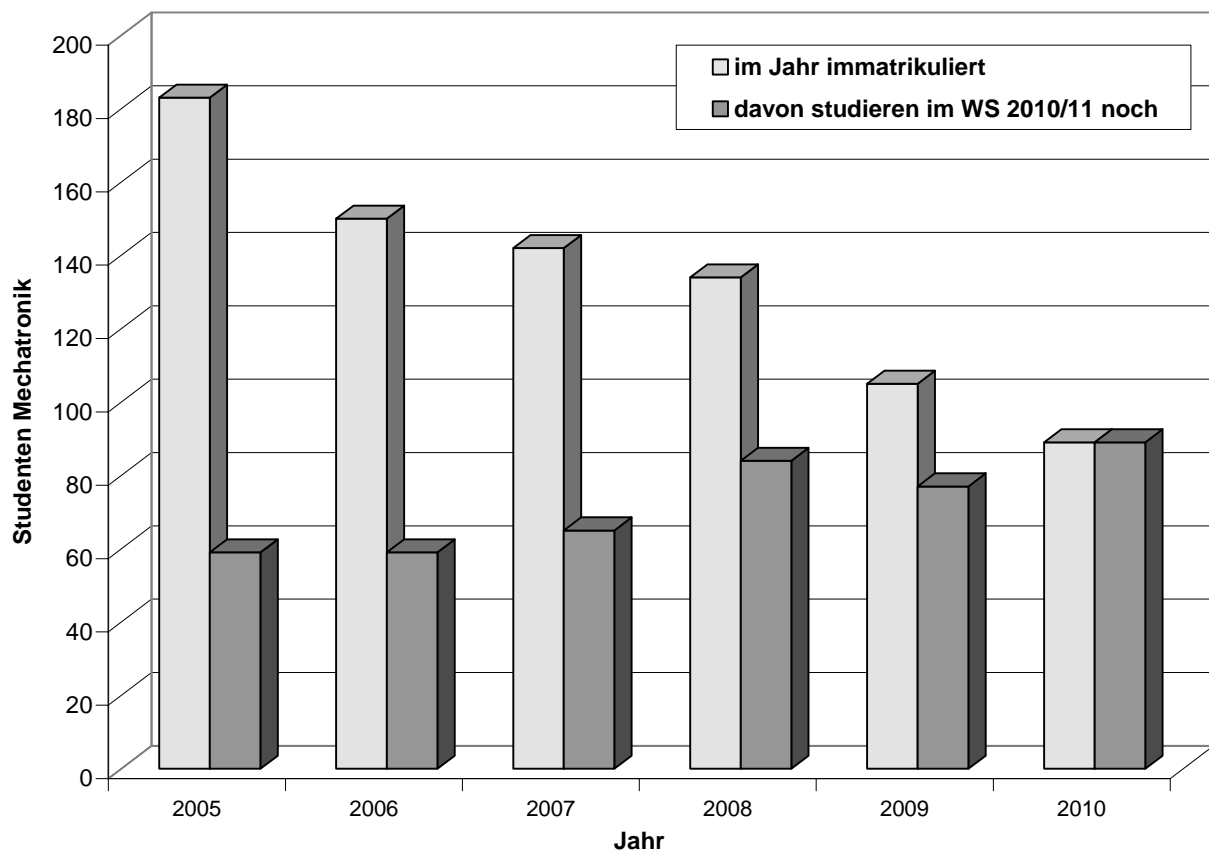
*Studienanfänger im Studiengang Maschinenbau der Fakultät Maschinenwesen (1. Semester)*



*Studierende in der Studienrichtung Produktionstechnik (5. Sem.)*



*Studierende in den Studiengängen Maschinenbau (oben) und Mechatronik (im jeweiligen Jahr immatrikuliert und davon im Wintersemester 2010/11 noch studierend)*



## **3.2 Lehrangebot**

### **3.2.1 Übersicht**

Der Lehrstuhl Werkzeugmaschinen bietet die folgenden Module und Lehrveranstaltungen im Hauptstudium der Ausbildung zum Diplomingenieur (Dipl.-Ing.) an.

In Vorbereitung sind inhaltlich überarbeitete und Bologna-konform modularisierte Lehrinhalte, die auch in Zukunft den Dipl.-Ing. als Abschluss zum Ziel haben werden.

#### **Werkzeugmaschinen-Grundlagen**

Pflichtmodul für die Studienrichtung Produktionstechnik im Studiengang Maschinenbau sowie Wahlpflichtmodul für die Studienrichtung Holz- und Faserwerkstofftechnik und die Studiengänge Wirtschaftsingenieurwesen und Höheres Lehramt an berufsbildenden Schulen mit den Lehrveranstaltungen

- Bewegungsgeführte Maschinensysteme - Systemcharakter und Komponenten bewegungsgeführter Prozesse und Systeme
- Vorrichtungskonstruktion

#### **Werkzeugmaschinen-Entwicklung**

Wahlpflichtmodul für den Studiengang Maschinenbau sowie Pflichtmodul für die Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung mit den Lehrveranstaltungen

- Bewegungsgeführte Maschinensysteme - Funktionell relevantes Systemverhalten und Beispiele mechatronischer Anwendungen
- Baugruppengestaltung
- Elektrische Antriebe  
(seit Auflösung der Dozentur Fertigungssysteme und Betriebsmittel im April 2006 wird die entsprechende Lehrveranstaltung der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik genutzt)

5. Sem.	<b>WZM-GRUNDLAGEN (6 SWS)</b>	
	Bewegungsgeführte Maschinensysteme/ <b>Systemcharakter und Komponenten (2/1/0)</b>	
	<b>Konzeptioneller Entwurf (0/1/0)</b>	
6. Sem.	Vorrichtungskonstruktion (1/1/0)	
8. Sem. (6. Sem.)	<b>WZM-STEUERUNG (8 SWS)</b>	<b>WZM-ENTWICKLUNG (14 SWS)</b>
	Funktions- steuerung (3/0/2)	Bewegungsgef. Maschinensyst./ <b>Verhaltensanalyse und Anwendungen (4/1/2)</b>
9. Sem.	Bewegungs- steuerung (2/0/1)	<b>Baugruppengestaltung (2/1/1)</b>
		<b>Elektrische Antriebe (2/1/0)</b>

*Lehrangebot des IWM für die Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung*

### **Werkzeugmaschinen-Steuerung**

Wahlpflichtmodul für den Studiengang Maschinenbau sowie Pflichtmodul für die Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung mit den Lehrveranstaltungen

- Funktionssteuerung
- Bewegungssteuerung

## **Bewegungsgeführte Maschinensysteme**

Wahlpflichtmodul für den interdisziplinären Studiengang Mechatronik mit den Lehrveranstaltungen

- Bewegungsgeführte Maschinensysteme - Systemcharakter und Komponenten bewegungsgeführter Prozesse und Systeme
- Bewegungsgeführte Maschinensysteme - Funktionell relevantes Systemverhalten und Beispiele mechatronischer Anwendungen

7. Sem.	<p style="text-align: center;"><b><i>Bewegungsgeführte Maschinensysteme (10 SWS)</i></b></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"><p><b>Systemcharakter und Komponenten bewegungsgeführter Prozesse und Systeme (2/1/0)</b></p></div>
8. Sem.	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"><p><b>Funktionell relevantes Systemverhalten und Beispiele mechatronischer Anwendungen (4/1/2)</b></p></div>

*Lehrangebot des IWM für den Studiengang Mechatronik*

## **Werkzeugmaschinenseminar**

Fakultative Lehrveranstaltung zur Vorstellung und Diskussion aktueller werkzeugmaschinenrelevanter Themen aus Lehre, Forschung und Praxis.

Nr.	Modul und ggf. Lehrveranstaltungen	Semesterwochenstunden (V / Ü / P)					
		Σ	5. Sem.	6. Sem.	7. S.	8. Sem.	9. Sem.
<b>Pflichtmodule</b>							
1	Grundlagen der Mess- und Automatisierungstechnik	6	201 P, Pr	201 P, Pr (F)	F A C H P R A K T I K U M		
2	Arbeitswissenschaften/Betriebswirtschaftslehre - Arbeitswissenschaft/Technische Betriebsführung - Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre	5	200 P	(F) 210 P			
3	Werkzeugmaschinenentwicklung/Grundlagen - Grundlagen der Werkzeugmaschine/ Systemcharakter und Komponenten bewegungs- geführter Prozesse und Systeme - Vorrichtungskonstruktion	6	310 B, P	(F) 110 B			
4	Fertigungstechnik II - Zerspan- u. Abtragtechnik - Umformtechnik - Oberflächen- und Schichttechnik	6	F 110 110 110				
5	Produktionssysteme - Automatisierung u. Messtechn. - Produktionsautomatisierung - Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung	5	100	(F) 110 B, P 002 P, Pr			
6	Maschinendynamik und Mechanismentechnik - Maschinendynamik - Mechanismentechnik	6	210 P	(F) 210 P			
7	Produktionstechnisches Praktikum	2		002 L			
<b>Summe Pflichtmoduler</b>		<b>36</b>	19	17			
<b>Wahlpflichtmodule</b>							
8	Werkzeugmaschinenentwicklung - Bewegungsgeführte Maschinensysteme/ Verhaltensanalyse und Anwendungen - Baugruppengestaltung - Elektrische Antriebe	14				412 P, Pr (F) 211 P 210 P	
9	Werkzeugmaschinensteuerung - Funktionssteuerung - Bewegungssteuerung	8				302 P, Pr (F) 201 P, Pr	
10	Technisches Wahlpflichtmodul	4				4 F	
11	Nichttechnisches Wahlpflichtmodul	4				4 F	
<b>Summe Wahlpflichtmodule</b>		<b>30</b>				20 10	
<b>Studienarbeiten u. sonst.</b>							
Interdisziplinäre Projektarbeit (max. Laufzeit 6 Mon.)		300 h			PA		
Großer Beleg (max. Laufzeit 6 Mon.)		500 h				PA	
Exkursionen		Teilnahme insgesamt mindestens 2 Tage					
Diplomarbeit (max. Laufzeit 4 Mon.)		im 10. Semester					

*Hauptstudienplan Studienrichtung Produktionstechnik,  
Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung  
(ab Immatrikulationsjahrgang 2006)*



## **3.2.2 Modul Werkzeugmaschinen-Grundlagen**

### **3.2.2.1 Bewegungsgeführte Maschinensysteme - Systemcharakter und Komponenten bewegungsgeführter Prozesse und Systeme**

#### **Umfang**

3 SWS (2/1/0)

#### **Hörende**

Studenten des 5. Semesters Studiengang Maschinenbau, Studienrichtung Produktionstechnik, Studienrichtung Holz- und Faserwerkstofftechnik und ohne den Beleg die Studiengänge Wirtschaftsingenieurwesen, Höheres Lehramt an berufsbildenden Schulen und Mechatronik (7. Semester)

#### **Lehrender**

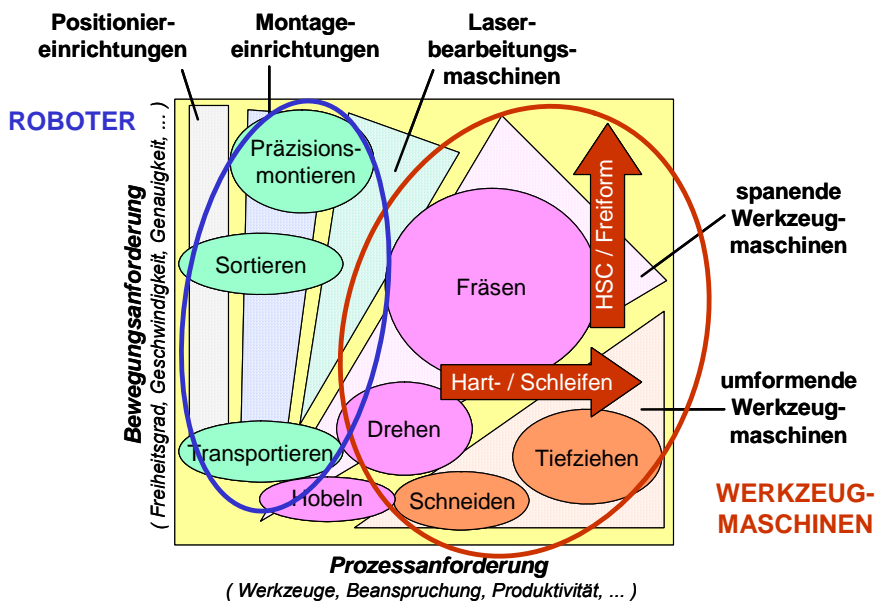
Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann

#### **Inhalt**

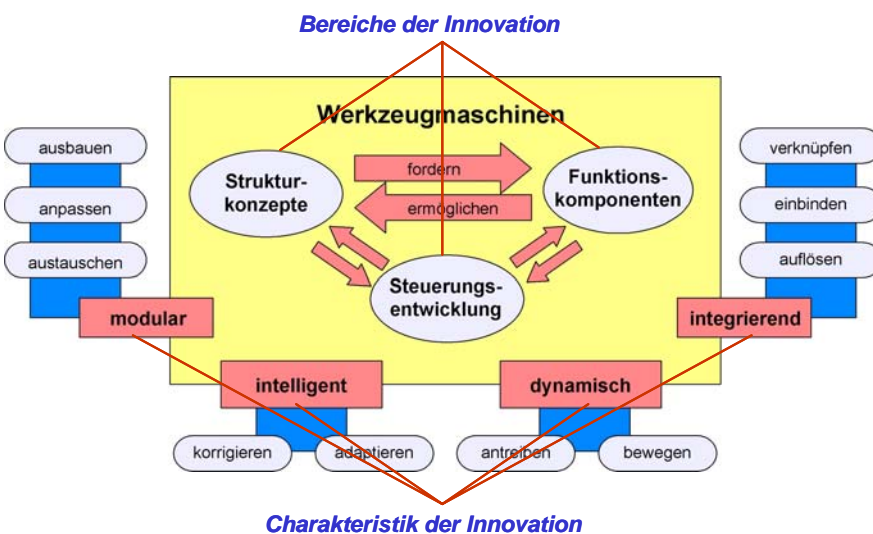
### **Mechatronischer Systemcharakter bewegungsgeführter Prozesse und Maschinen**

- Abgrenzung zwischen Handhabung und Bearbeitung
- Bearbeitungsprozesse und -maschinen
  - Einteilung, Definition u. Aufgaben der Werkzeugmaschinen
  - Beispiele aus der Blechumformung
  - Beispiele aus der Zerspanung
- Handhabungsprozesse und -einrichtungen
  - Definition, Aufgaben und Abläufe der Handhabung
  - Werkzeug- und Werkstück-Handhabung an spanenden Werkzeugmaschinen
  - Identifikation und Referenzierung von Körper-Koordinatensystemen
  - Erarbeitung von Handhabungslösungen am Beispiel automatischer Bearbeitung von flächigen und kleinen Holzformteilen auf dem Hexapod

- Innovationspotenziale und mechatronischer Systemcharakter
  - Innovation bei der spanenden Bearbeitung
  - Ein Beispiel: Hochgeschwindigkeits-Bearbeitung (HSC)
  - Wirtschaftlichkeit und Innovation
  - Der Produktprozess
  - Die virtuelle Werkzeugmaschine
  - Innovation an Werkzeugmaschinen
- Praktische Maschinenkunde



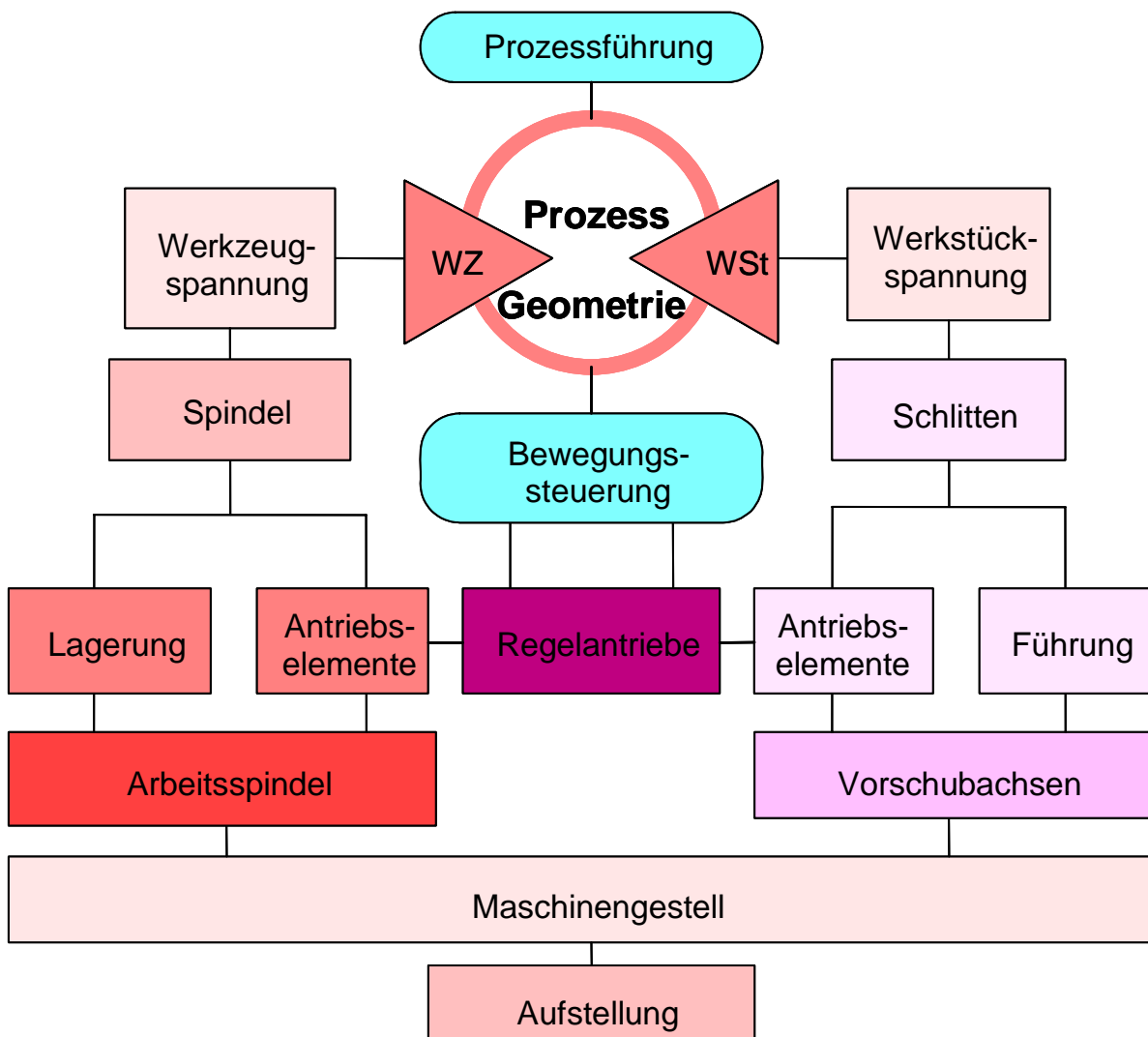
### Prozess- und Bewegungsanforderungen für bewegungsgeführte Maschinensysteme



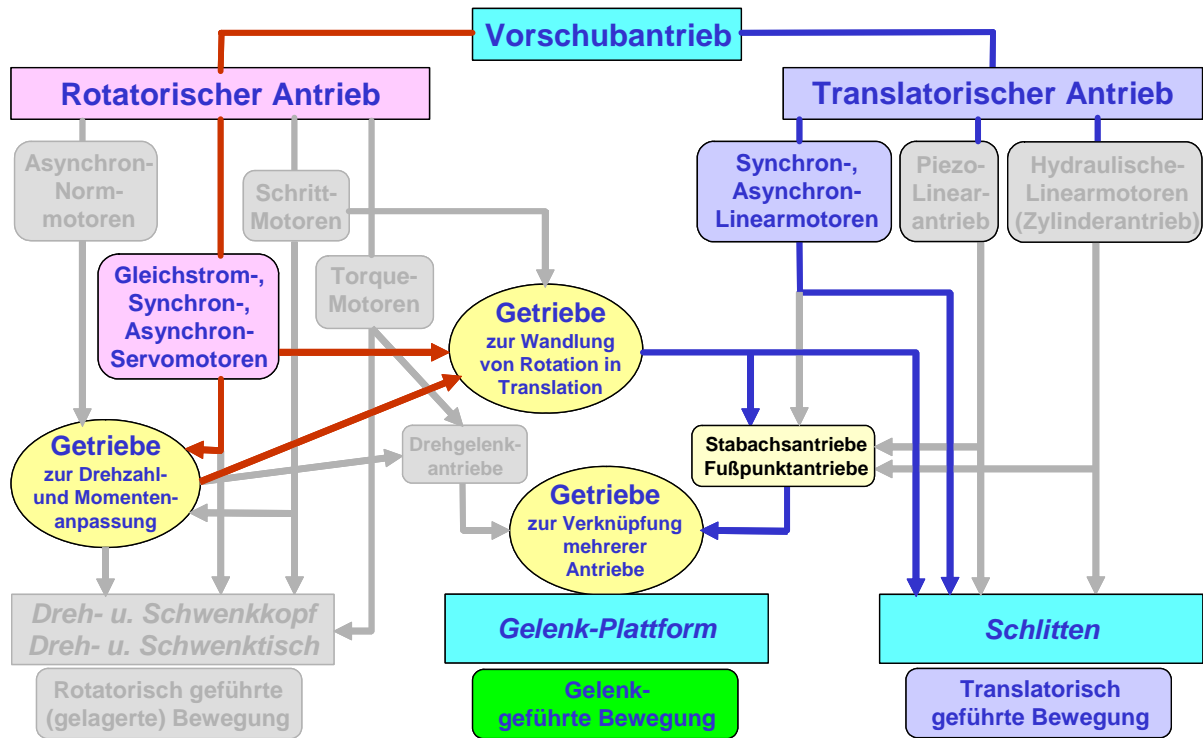
### Innovation an Werkzeugmaschinen als Gestaltungsraum

## Typische Teilfunktionen, Komponenten und Anforderungen

- Antriebssysteme
  - Hauptantrieb und Hauptspindel
  - Vorschubantriebe und geführte Baugruppen
- Steuerungssysteme
  - Funktions- und Ablaufsteuerung (SPS)
  - Bewegungssteuerung (CNC)
- Kinematik- und Gestellsysteme
  - Kinematik-Konzepte und Gestellstrukturen
  - Steifigkeitsorientierte Gestaltung



*Systemstruktur und Komponenten der spanenden Werkzeugmaschine*



*Vorschubantriebe zur Bewegung geführter Baugruppen*

### 3.2.2.2 Konzeptioneller Entwurf einer Werkzeugmaschine

#### Umfang

1 SWS (1/0/0)

#### Hörende

Studenten des 5. Semesters Studiengang Maschinenbau, Studienrichtung Produktionstechnik und Studienrichtung Holz- und Faserwerkstofftechnik

#### Lehrender

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann

Dipl.-Ing. V. Möbius, ab 2010 Dipl.-Ing. H. Höfer

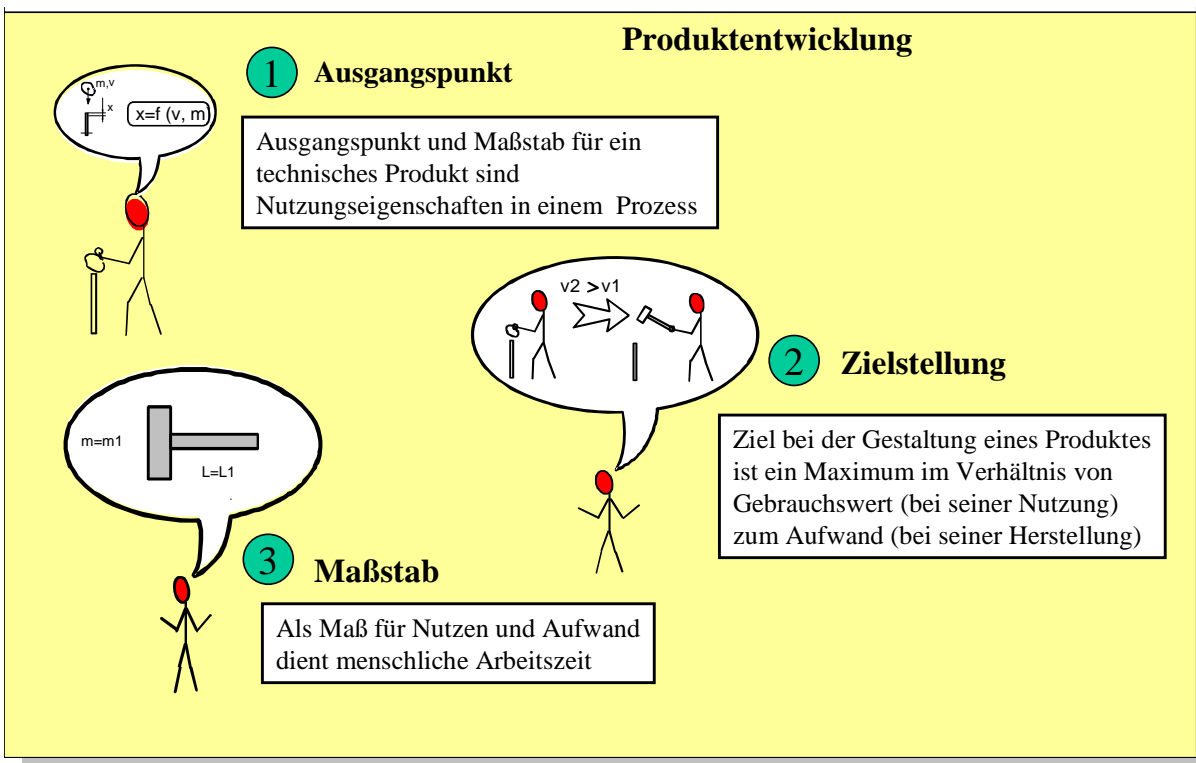
#### Inhalt

Mit Vorlesungsinhalt und anzufertigendem Beleg soll bei den Studenten erstes Verständnis für prinzipielles entwicklungs-methodisches Vorgehen bei der Produktentwicklung und für die dabei geltenden Bewertungsmaßstäbe erreicht werden. Das stützt sich auf Erfahrungen zu Defiziten bei Absolventen in der Fähigkeit, bei komplexen Konstruktionsaufgaben neben technischen Parametern auch angemessen und vergleichbar souverän mit wirtschaftlichen Kriterien umzugehen.

1. In der **Vorbereitung zum Beleg** wird herausgearbeitet, dass
  - das Ergebnis aller Technik an einem wirtschaftlichen Maßstab zu messen ist,
  - die Abschätzung der Wirkung einer technischen Entscheidung auf das wirtschaftliche Gesamtergebnis damit das einzig tragfähige Entscheidungskriterium darstellt,
  - entwicklungsbegleitende Kostenkalkulation für den Ingenieur genauso selbstverständlich sein muss wie der quantifizierte Nachweis der technischen Gestaltung.
2. Hinsichtlich der **methodischen Schritte** soll
  - der Schwerpunkt auf die Systemgestaltung in der Konzeptphase gelegt und die dort erfolgende "80 % -

Gesamtentscheidung" einer Entwicklung demonstriert werden,

- der Blick für die Bedeutung der Anwendungsprozesse durch die Definition einer Produktentwicklung als "schrittweise Informationspräzisierung zu einem System" geschärft werden,
- die gedankliche Beweglichkeit zur Innovationsfähigkeit gefördert werden.



### *Das Produkt als Gegenstand menschlicher Tätigkeit*

3. Als **hervorgehobene Etappen** bei der Produktentwicklung und diesen Etappen zugeordnete Entscheidungsmeilensteine werden formuliert:

1. Die marktstrategische Zielstellung
2. Die technisch-wirtschaftliche Konzeption
3. Konstruktion mit technischer und wirtschaftlicher Dokumentation
4. Bau des Prototyps
5. Experimentelle Überprüfung des technischen Ergebnisses und Nachkalkulation



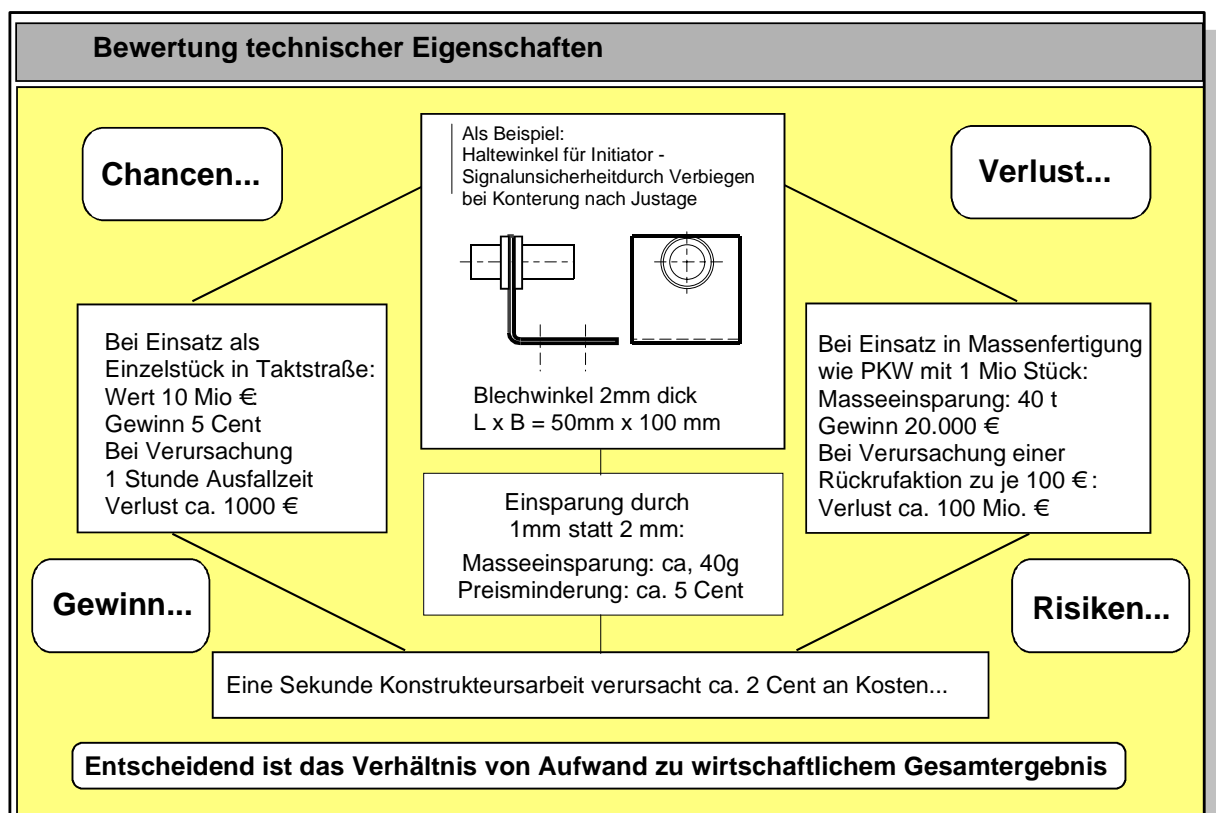
## 6. Überarbeitung zur Produktionsfreigabe

Dabei wird besonders die Bedeutung des Faktors Zeit herausgearbeitet.

Die Belegaufgabe beinhaltet unter einer angenommenen Ausgangssituation eines Unternehmens erste wichtige Schritte zur Innovation einer Fräsmaschine. Dazu erfolgt die Ausarbeitung von Dokumenten als Teilbeleg zur

- marktstrategischen Zielstellung,
- technisch-wirtschaftlichen Konzeption,
- Konkretisierung der Konzeption für eine Hauptbaugruppe.

Die Ergebnisse der Teilbelege werden jeweils von einigen Studenten in einem Rollenspiel als "Entwicklungsleiter des Unternehmens" vor den anderen Teilnehmern als "Vertreter der Geschäftsleitung" vorgetragen und sind in der Diskussion zu verteidigen.



*Aufwand und Ergebnis*

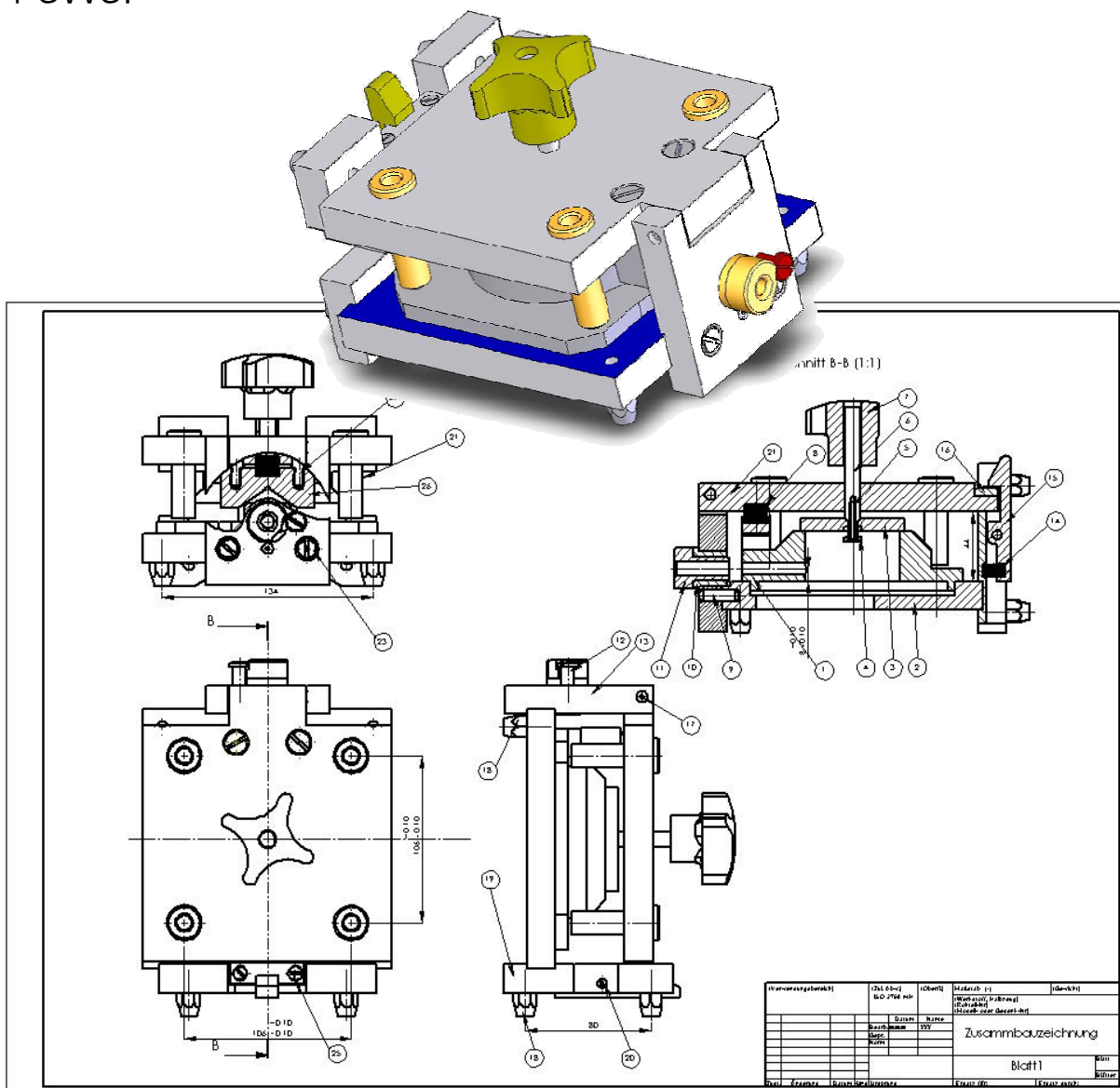


- Spannhebelsysteme
  - Schubschwinge
  - Kurbelschwinge
- Mechanische Kraftübertragungselemente
  - Spanneisen
  - Winkelhebel
  - Niederzugspanner
  - Ausgleichsspanner
- Spannen mit Druckmedien
  - Hydraulik
    - Grundlagen der Hydraulik
    - Handbetätigte Spannhydraulik-Systeme
    - Druckluftbetätigte Spannhydraulik-Systeme
    - Spannhydraulik syst. m. Motor u. Radialkolbenpumpe
    - Anwendungsbeispiele
  - Spannpneumatik / Anwendungsbeispiele
  - Spannen mit plastischen Medien / Anwendungsbeispiele
  - Magnetische Spannmittel / Anwendungsbeispiele
- Werkzeugführungen
  - Zweck
  - Direkte Werkzeugführungen
    - Bohrbuchsen / Anwendungsbeispiele
    - Räumnadelführungen
  - Indirekte Werkzeugführungen / Werkzeugeinstellelemente
- Vorrichtungskörper
  - Gegossene Ausführung
  - Geschweißte Ausführung
  - Verschraubt/verstiftete Ausführung
- Teileinrichtungen
  - Längsteilen
  - Kreisteilen
  - Index- und Feststellelemente
- Vorrichtungsschlüsse
- Aufnahme der Vorrichtung auf der Werkzeugmaschine
  - Konventionelle Aufnahme / Anwendungsbeispiele
  - Aufnahmen für die automatisierte Fertigung

## Palettensysteme Nullpunktspannsysteme (Zero-Point-Systems)

- Systemvorrichtungen
  - Einsatzkriterien
  - Grundsysteme
    - Lochsystem
    - Nutsystem
    - Kombisystem

Bestandteil der Lehrveranstaltung ist die Anfertigung eines konstruktiven Beleges "Vorrichtungskonstruktion" im Umfang von 1 SWS.



Auszug aus einem Beleg Vorrichtungskonstruktion

## **3.2.3 Modul Werkzeugmaschinen-Entwicklung**

### **3.2.3.1 Bewegungsgeführte Maschinensysteme - Funktionell relevantes Systemverhalten und Beispiele mechatronischer Anwendungen**

#### **Umfang**

7 SWS (4/1/2)

#### **Hörende**

Studenten des 8. Semesters Studiengang Maschinenbau, Studienrichtung Produktionstechnik, Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung sowie Studenten des 8. Semesters im Studiengang Mechatronik als Wahlpflichtfach aus der Gruppe "Anwendungen"

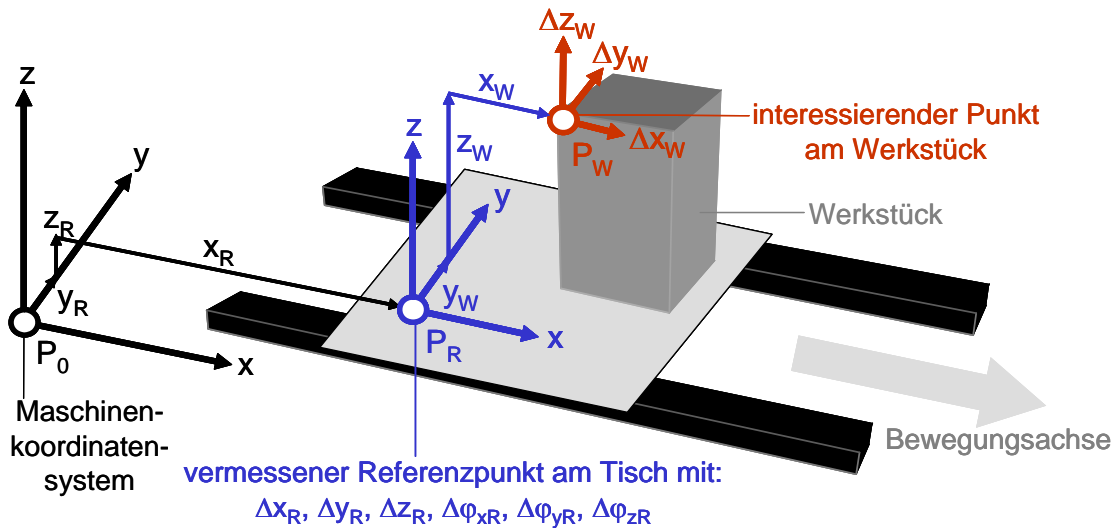
#### **Lehrender**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann  
u. a.

#### **Inhalt**

#### **Funktionell relevante Verhaltenseinflüsse und -beschreibung (Vorlesung und Übung)**

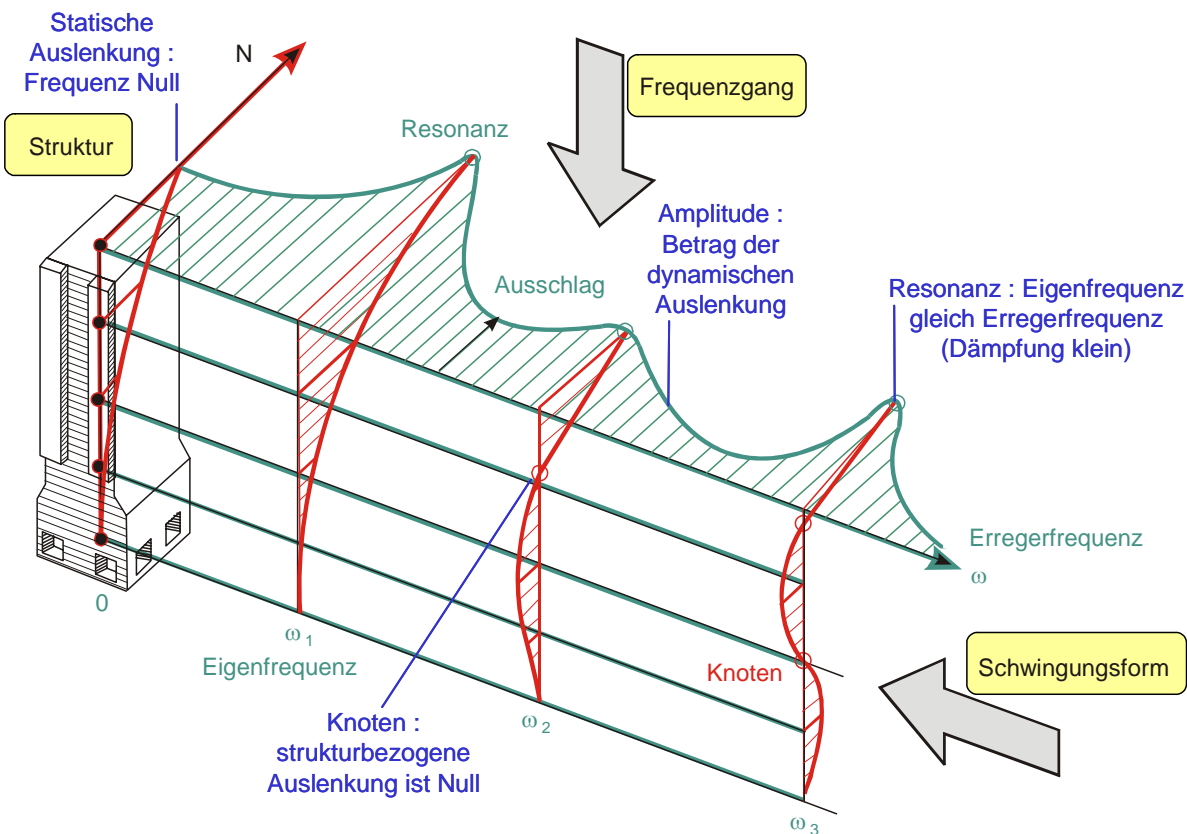
- Verhaltensbereiche und ihre funktionellen Einflüsse
- Geometrisch-kinematisches Verhalten
  - Prüfung im Rahmen der Maschinenabnahme
  - Genauigkeit im Bewegungsraum
- Linear-elastisches Verformungsverhalten
  - Grundlagen der linearen Strukturanalyse
  - Statisch und quasi-statisch bedingte Verformungen
  - Thermisch bedingte Verformungen
  - Dynamisch bedingte Verformungen im Frequenzbereich
- Nichtlineares Verhalten im Zeitbereich
  - Grundlagen der digitalen Simulation des Zeitverhaltens
  - Mechatronische Systemsimulation
  - Simulation instationärer thermischer Vorgänge



$$\{\Delta x(x_R)\}_W = \{\Delta x(x_R)\}_R + [\Delta \Phi(x_R)]_R * \{X\}_W$$

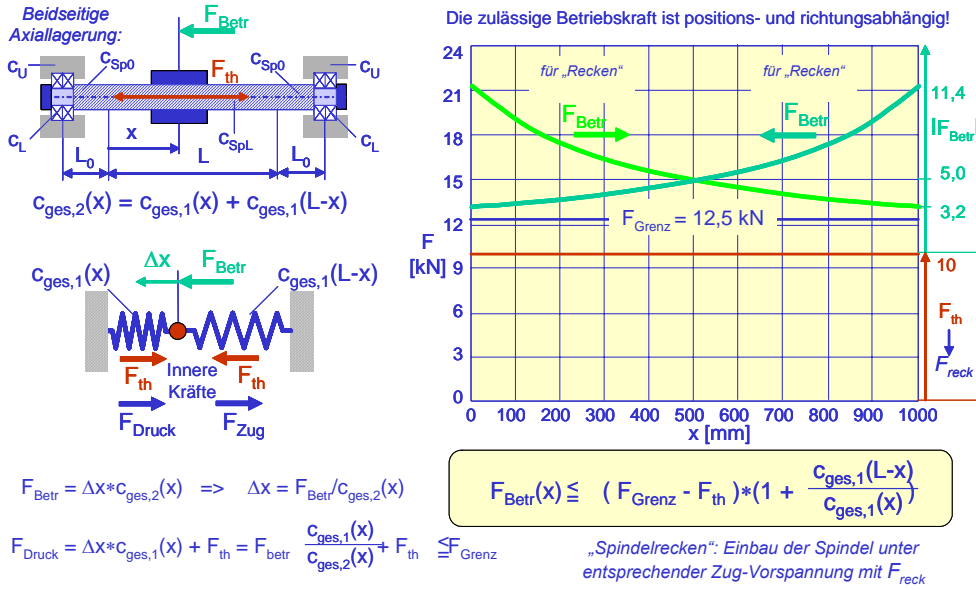
$$\{\Delta x\}_W = \begin{Bmatrix} \Delta x_W \\ \Delta y_W \\ \Delta z_W \end{Bmatrix} \quad \{\Delta x\}_R = \begin{Bmatrix} \Delta x_R \\ \Delta y_R \\ \Delta z_R \end{Bmatrix} \quad \{X\}_W = \begin{Bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{Bmatrix} \quad [\Delta \Phi]_R = \begin{pmatrix} 0 & -\Delta \phi_{zR} & \Delta \phi_{yR} \\ \Delta \phi_{zR} & 0 & -\Delta \phi_{xR} \\ -\Delta \phi_{yR} & \Delta \phi_{xR} & 0 \end{pmatrix}$$

Räumliche Fehlerwirkungen bei Bewegung einer Achse

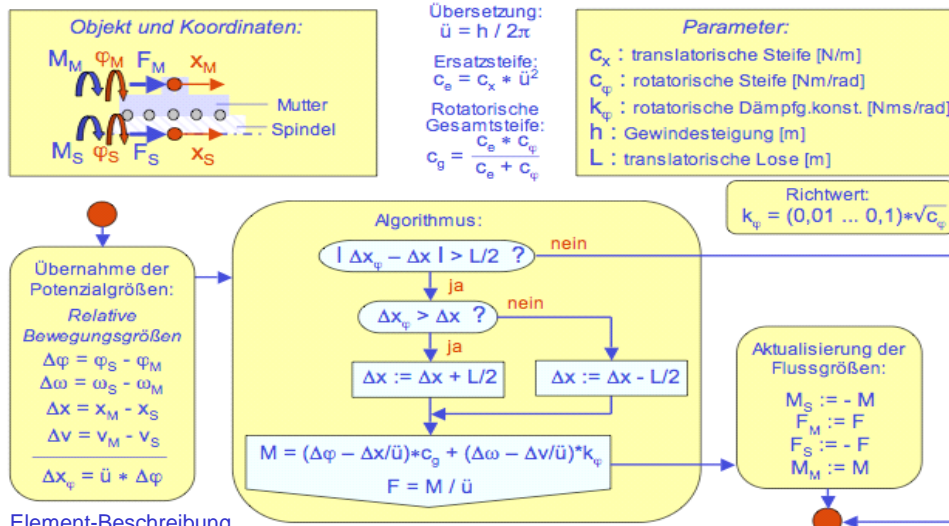


Veranschaulichung von Struktur, Schwingungsform und Frequenzgang



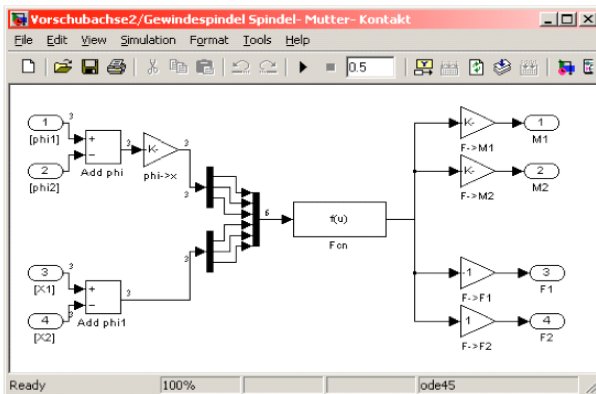


Betriebskraftgrenzen an der beidseitig axial gelagerten Gewindespindel unter thermischer Belastung



Element-Beschreibung für den Kugel-Gewindetrieb

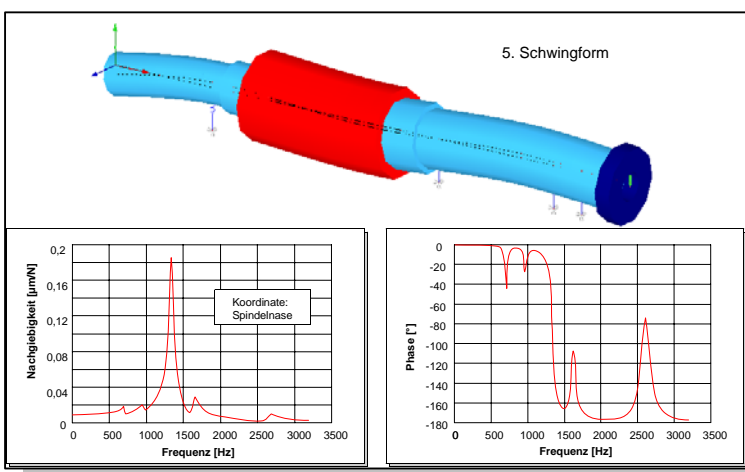
Modell des Kugelgewindetriebs unter Matlab-Simulink



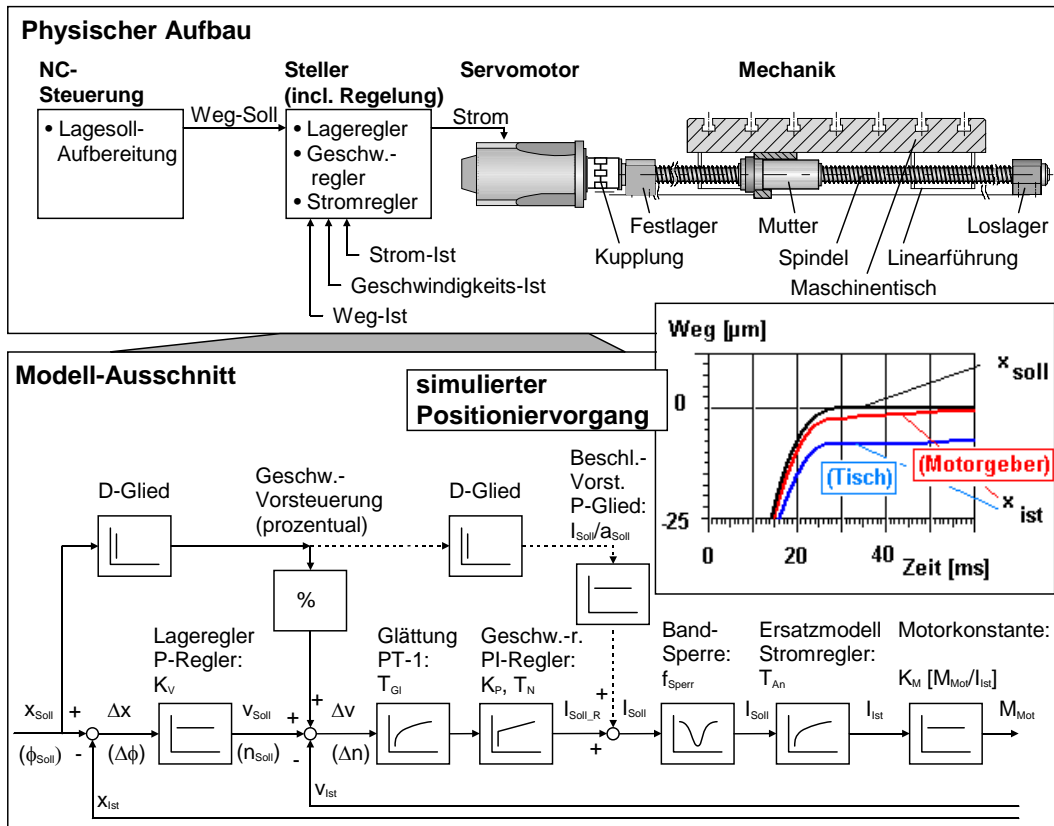
Modellbeschreibung und simulationsfähiges Modell des Mutter-Spindel-Kontakts

## Beispiele mechatronischer Anwendungen (Praktikum)

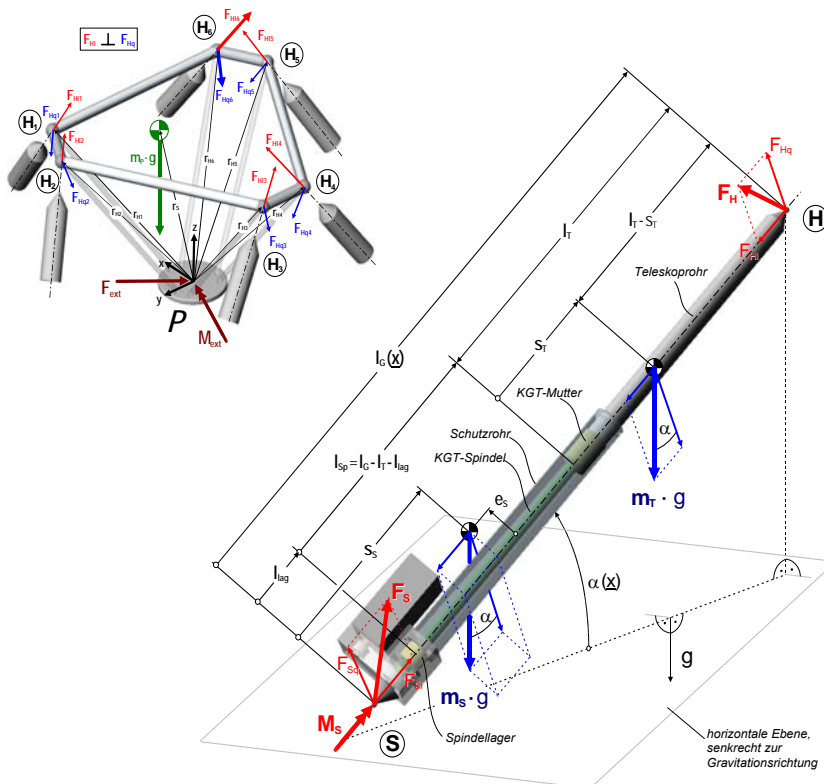
- Lagegeregelter elektro-mechanischer Vorschubantrieb
  - Grundlagen Modellstruktur und Parametrierung
  - Simulationsmodell, virtuelle Inbetriebnahme
  - Grundlagen zur experimentellen Prüfung an Vorschubachsen
  - Positionierverhalten, praktische Achstests
- Piezoelektrische Stellantriebe
  - Grundlagen Piezo-Stapelaktoren und Modellierung
  - Beispiel: Piezoelektrischer Werkstücktisch zur Neigungs korrektur
  - Beispiel: Piezoelektrische Mikro-Achse zur Werkzeug-Verstellung
- Aktiv magnetisch gelagerte Werkzeugmaschinen-Hauptspindel
  - Spindelaufbau, Funktionsweise, Spindelmodellierung
  - Strukturanalyse Spindel, Statik und Dynamik
  - Grundlagen Regleraufbau und -modellierung
  - Modellgestützte Ansteuerung und Regelung
- Parallelkinematisches Bewegungssystem "Hexapod"
  - Gestaltungsgrundlagen, Aufbau, Arbeitsweise
  - Bewegungssteuerung, Transformation, Fehlereinflüsse
  - Achsinbetriebnahme und -kalibrierung
  - Grundlagen modellgestützte Fehlerkorrekturen
  - Bedienung, Kreistest mit und ohne Korrektur
  - Grundlagen kinematische Kalibrierung
  - Kalibrierung mit Double Ball Bar (DBB)



*Dynamikanalyse an einer Motorspindel (Praktikum)*



Simulation Positioniervorgang einer NC-Achse (Praktikum)



### 3.2.3.2 Baugruppengestaltung

#### Umfang

4 SWS (2/1/1)

#### Hörende

Studenten des 9. Semesters Studiengang Maschinenbau, Studienrichtung Produktionstechnik, Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung

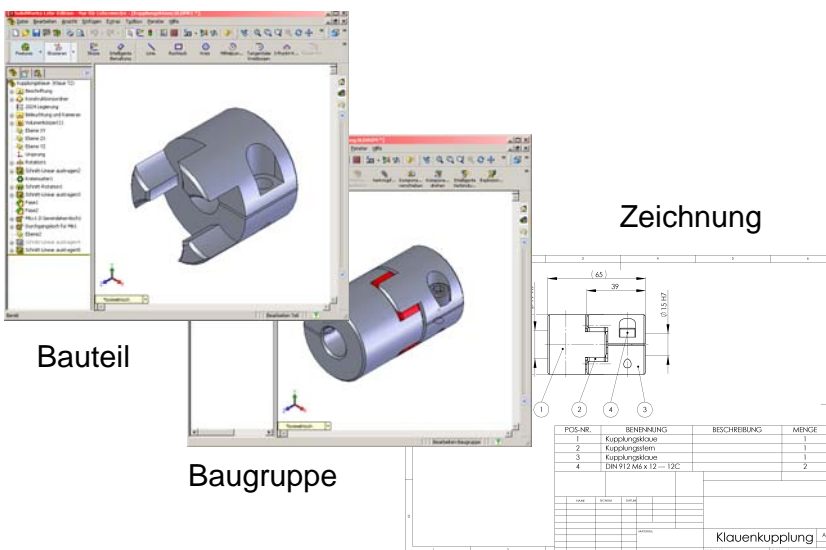
#### Lehrender

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann  
u. a.

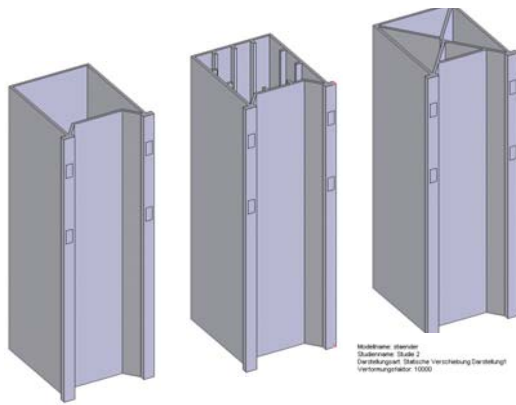
#### Inhalt

#### Anwendung von CAD zur Baugruppengestaltung

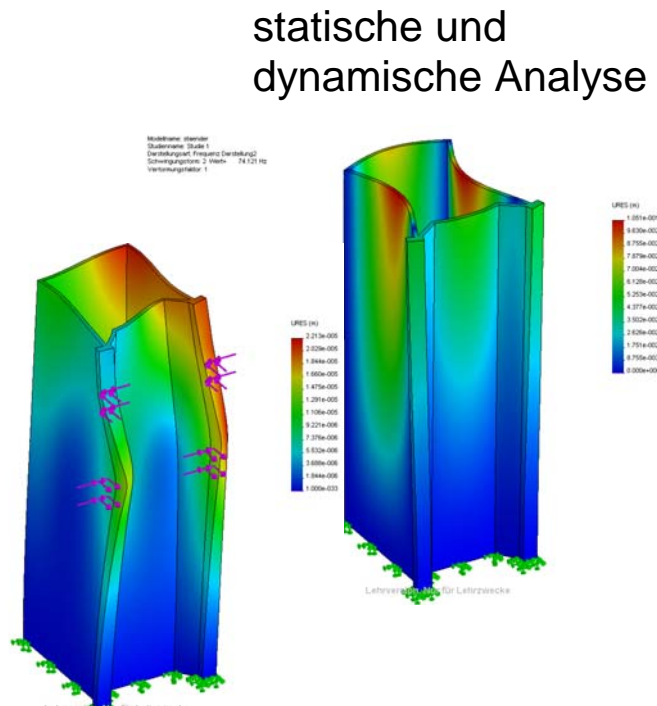
- Stand und Tendenzen der Anwendung von CAD in der Werkzeugmaschinen-Entwicklung
- Parametrische 3D-CAD-Beschreibung
- Einzelteile und Parametrierung, Kenngrößenermittlung
- Baugruppen, Strukturierung, Stücklisten
- Zusammenstellung, Darstellungsweisen, Varianten
- Kopplung von CAD und FEM



*Modellierungsgrundlagen*



### Ableitung des Berechnungsmodells



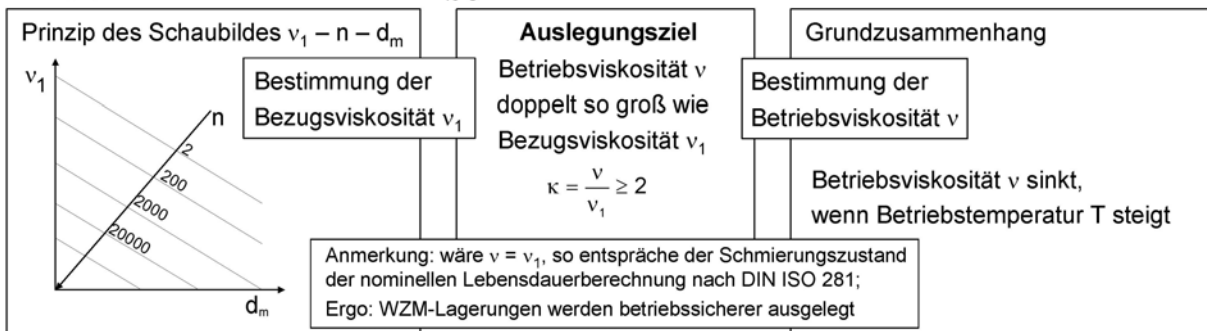
### Modellvarianten und -analyse

## Lagerungen und Hauptspindeln

- Gestaltung der Wälzlagerung von Hauptspindeln
- Integration von Hauptspindel und Antrieb
- Schmierung von wälzgelagerten Hauptspindeln
- Integration von Spannsystemen in die Spindel
- Alternative Hauptspindel-Lagerungen

### Zusammenfassung der EHD-Theorie in Schaubildern:

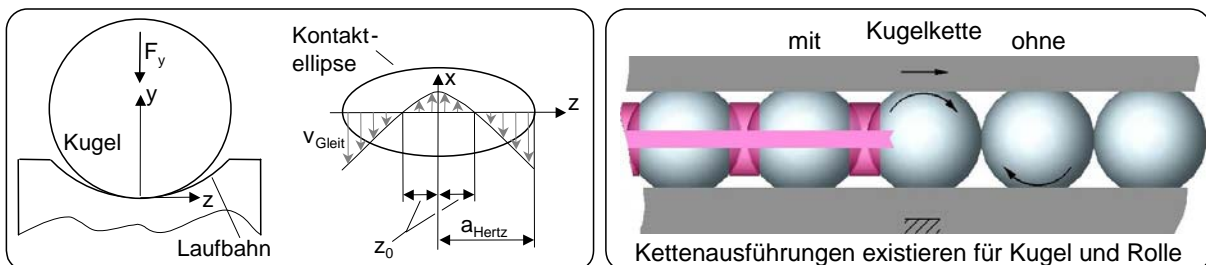
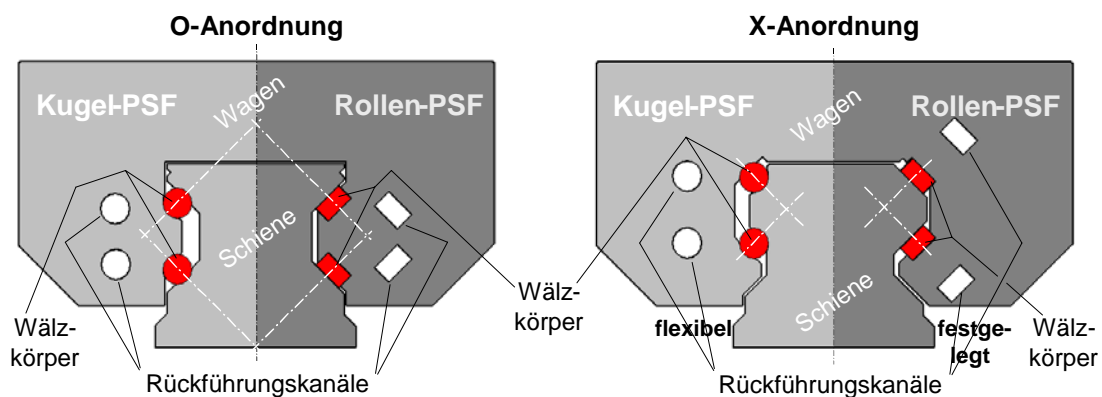
- Angabe einer kin. Bezugsviskosität  $v_1$  als Funktion des mittl. Lagerdurchmessers  $d_m$  und der Drehzahl  $n$
- Angabe der kin. Betriebsviskosität  $v$  als Funktion der Temperatur und der vom Schmierstoffhersteller angegebenen kin. Grundölviskosität  $v_{40^\circ C}$  bei  $40^\circ C$



### Wahl von Schmierstoffen für wälzgelagerte Spindeln

## Führungen und Vorschubachsen

- Antriebsvarianten, Gewindetribe und deren Lagerungen
- Aufbau, Arten und Einsatz von Profilschienen-Führungen
- Montage und Betriebsbedingungen von Profilschienen-Führungen
- Experimentelle und modellgestützte Analyse von Profilschienen-Führungen
- Linear-Messsysteme, Dichtungs- und Abdeck-Systeme
- Eigenschaften u. Anwendungsbereiche alternativer Führungen

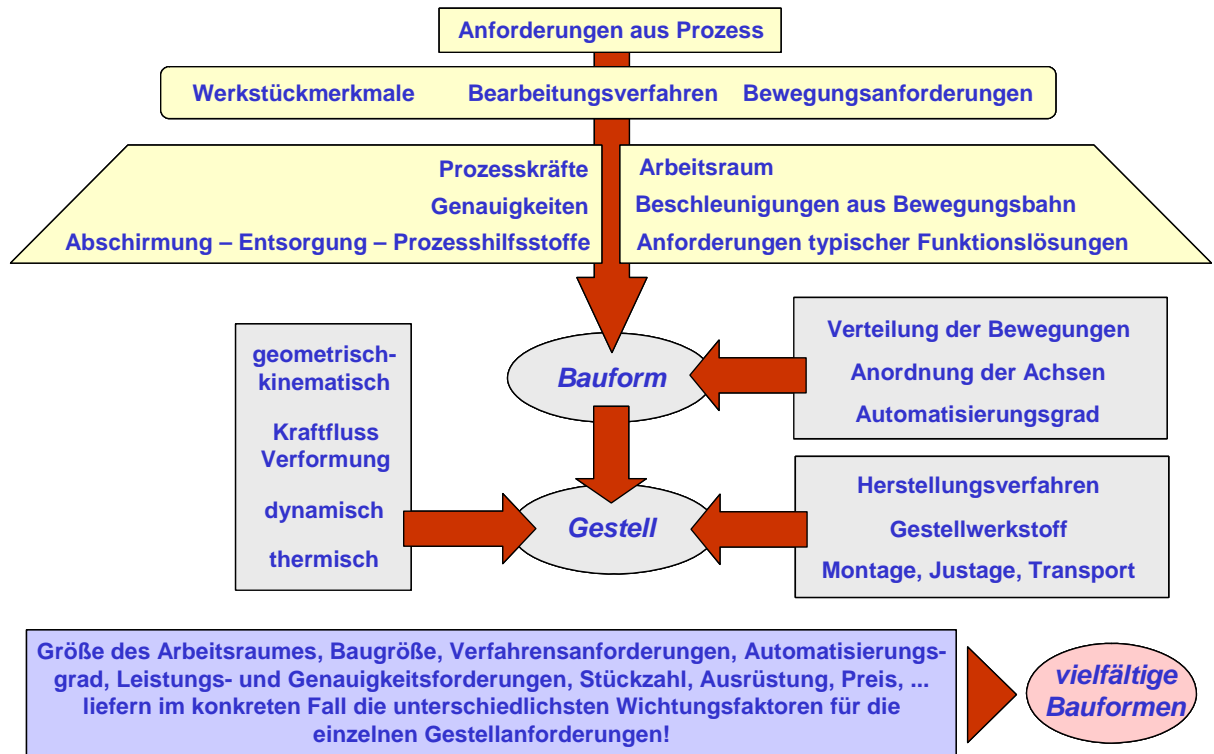


### Profilschienen-Führungen (PSF) für Vorschubachsen

## Strukturen und Baugruppen von Gestellen

- Gestaltungsprinzipien für den Strukturaufbau und Gestellkonzepte
- Charakteristik der Baugruppen der Bewegungsbasis (Betten, Ständer, ...)
- Charakteristik d. bewegten Baugruppen (Schlitten, Schieber, ...)
- Verschraubte Verbindungsstellen





*Ablauf und Gesichtspunkte zur Gestellgestaltung*

## **3.2.4 Modul Werkzeugmaschinen-Steuerung**

### **3.2.4.1 Funktionssteuerung**

#### **Umfang**

5 SWS (3/0/2)

#### **Hörende**

Studenten des 8. Semesters Studiengang Maschinenbau, Studienrichtung Produktionstechnik, Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung

#### **Lehrender**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann  
Dr.-Ing. B. Kauschinger  
Dipl.-Ing. (FH) H. Kretzschmar

#### **Inhalt** (Vorlesung)

- Einführung
  - Entwicklungsgeschichte der Funktionssteuerung
  - Einteilung, Steuerungsarten
- Grundlagen
  - Abbild und Realität, Modelle als Basis zur Steuerung
  - Funktionelle Gliederung der Anlage
  - Grundsaltungen binärer Steuerungen
- Beschreibungsmittel
  - Programmiersprachen
  - Zustandsgraphen, Petrinetze
  - IEC 61131
- SPS
  - Aufbau und Arbeitsweise
  - Ausführungsformen (Software, Hardware)
  - Programmiersprachen
  - Programmierung, Inbetriebnahmen, Programmtest

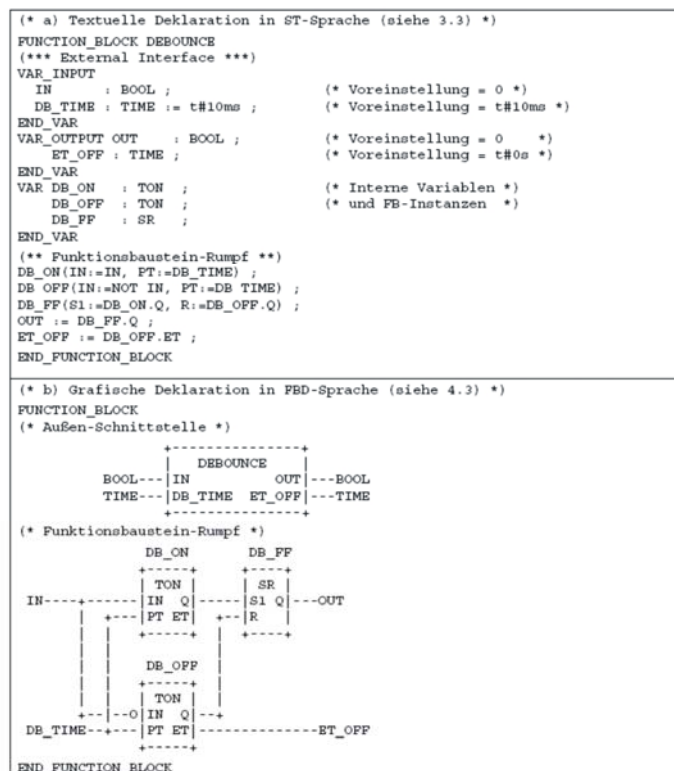
- Felddbusse
  - Kommunikation (OSI-Referenzmodell,
  - Busanbindung, Topologien
  - Buszugriffsmechanismen
  - Bussysteme  
(AS-interface, Interbus, CAN, ProfiBus, SERCOS)
- Sicherheit
  - Begriffe, Normen
  - Risikobeurteilung
  - Sicherheitskonzepte, Schutzarten
- Alternative Steuerungsansätze (CFS)

**Programm-Organisations-Einheiten (POE):**

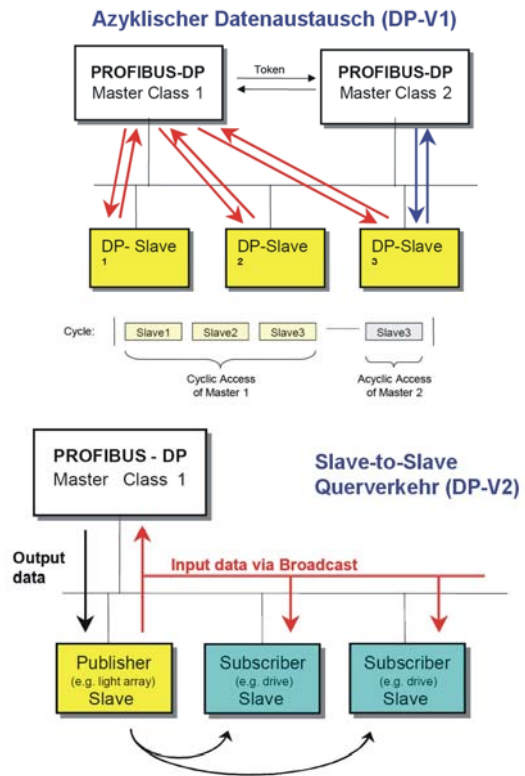
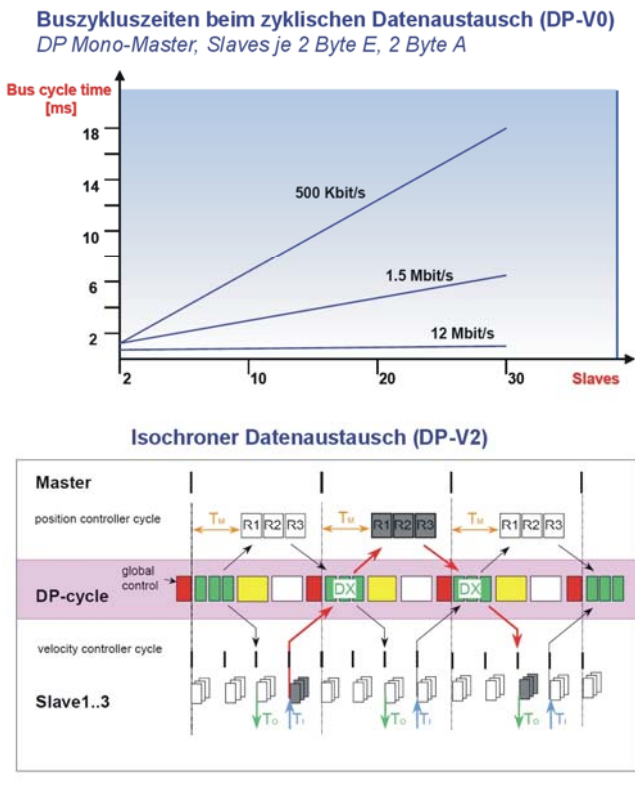
- Funktionen
  - liefern für gleiche Eingangsgrößen immer gleiche Ergebnisse
  - instanzlos
- Funktionsbausteine
  - liefern für gleiche Eingangsgrößen **nicht** immer gleiche Ergebnisse, d.h. sie können speichernde Eigenschaften haben (Vorgeschichte)
  - Instantiierung nur innerhalb von Programmen oder anderen Funktionsbausteinen
- Programme
  - kapseln Funktionen und Funktionsbausteine
  - Instantiierung nur innerhalb von Ressourcen

**Darstellung:**

- Kopfbereich
  - Deklaration von Typen und Variablen
  - Definition von Ein- und Ausgangsgrößen
- Rumpf
  - Implementation in einer der 5 Sprachen



Programmierung: IEC 61131 - Programmorganisationseinheiten

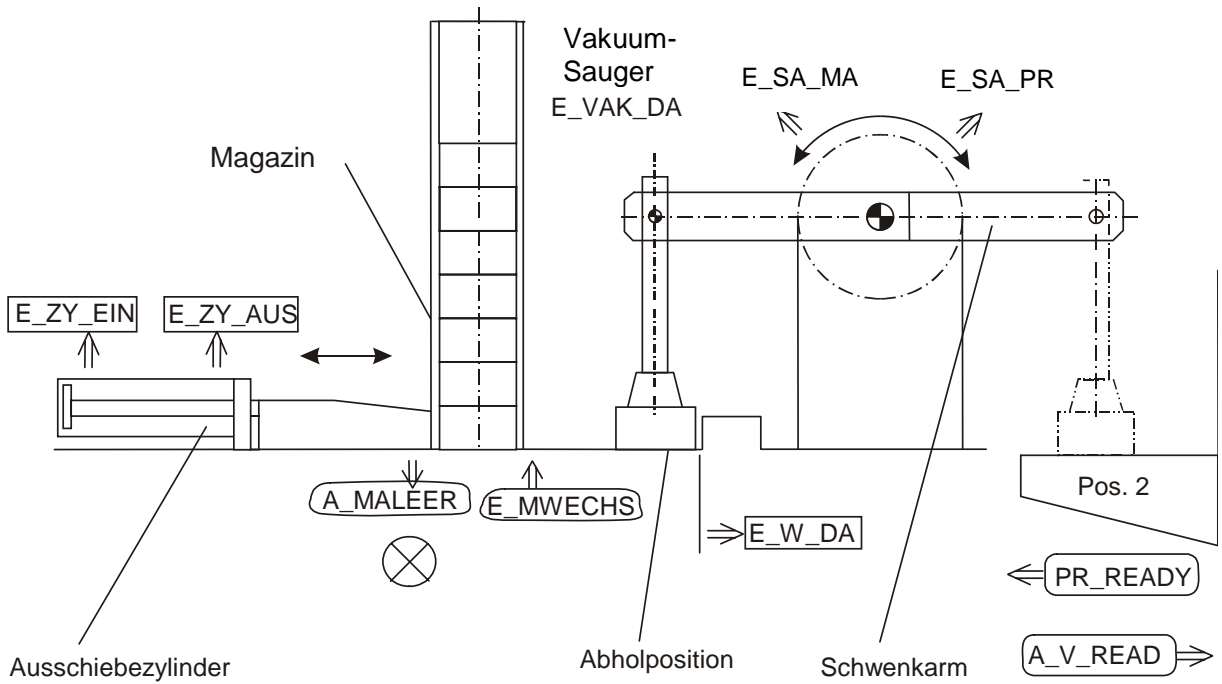


## Feldbusse: ProfiBus DP - Leistungsstufen

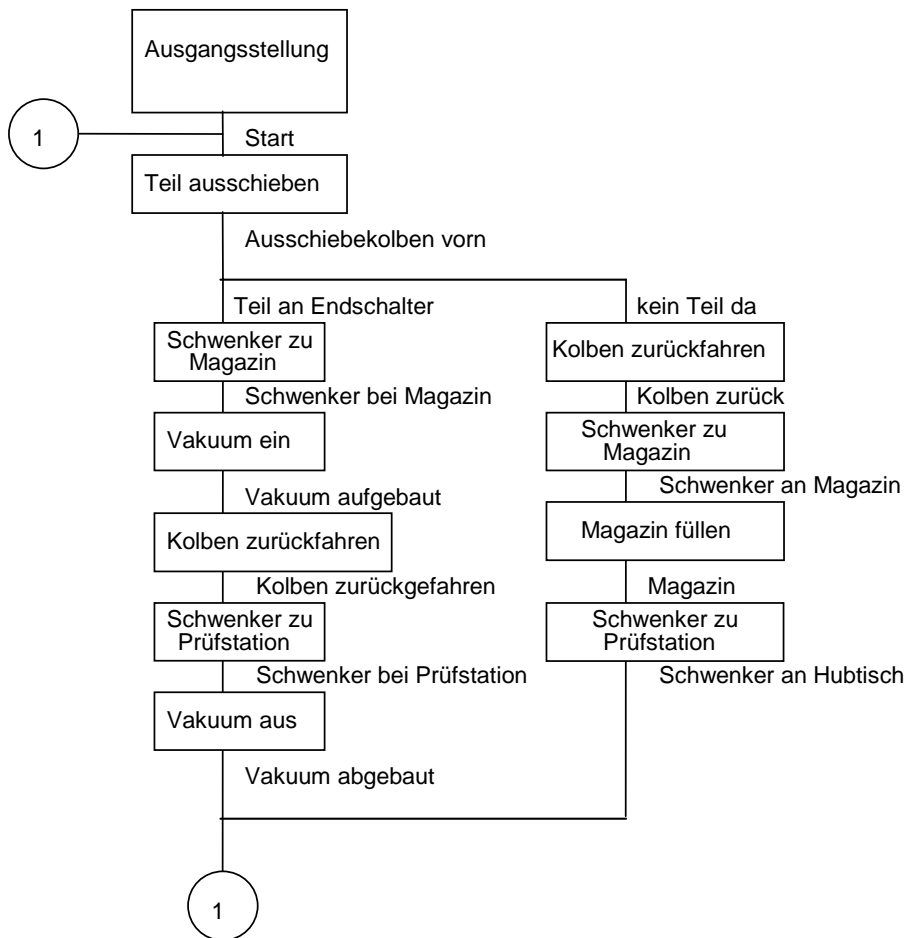
### Inhalt (Praktikum)

Die Lehrveranstaltung umfasst ein Praktikum im Umfang von 2 SWS, in dessen Rahmen die Studenten die SPS eines Fertigungssystems, bestehend aus den Stationen Vereinzeln, Prüfen, Bearbeiten\_1, Bearbeiten\_2, Rundtaktisch und Lager, programmieren und an einem Modell des Systems testen (s. a. Punkt 2.2.4.13).

- Programmentwicklung für einen vorgegebenen Fertigungsablauf mit den Betriebsarten
  - Automatikbetrieb
  - Schrittbetrieb
  - Tippbetrieb
- Programmierung der Funktion jeder Arbeitsstation in Form einer Anweisungsliste (AWL)
- Synchronisation über den Master-Teil der SPS



SPS-gesteuertes Modell-Fertigungssystem - Station "Vereinzeln"



Prozessanalyse für die Station "Vereinzeln"

### **3.2.4.2 Bewegungssteuerung**

#### **Umfang**

3 SWS (2/0/1)

#### **Hörende**

Studenten des 8. Semesters Studiengang Maschinenbau, Studienrichtung Produktionstechnik, Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung

#### **Lehrender**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann  
Dr.-Ing. B. Kauschinger

#### **Inhalt**

- Einführung
  - Motivation
  - Steuerung und Automatisierung
  - Entwicklung der Rechentechnik und der NC-Technik
- Bewegungseinrichtungen
  - serielle, parallele und hybride Kinematiken
  - Freiheitsgrade
  - Bewegungsachsen
- Bahnerzeugung
  - Mathematische Grundlagen
  - Bahnvorbereitung (Satzverarbeitung, look-ahead, Ruckbegrenzung)
  - Interpolation (Bahn-, Geschwindigkeits-, Beschleunigungs-führung)
- NC-Programmierung
  - Programmierverfahren
  - DIN-ISO 66025 (G-Code)
  - STEP-NC, Roboterprogrammierung



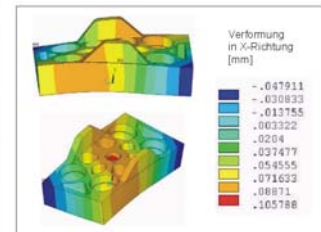
- Aufbau und Komponenten von NC-Steuerungen
  - Bedienoberflächen
  - Antriebe
  - Messsysteme
  - Antriebsregelung
- Antriebskommunikation
  - Schnittstellen, Protokolle
  - SERCOS-interface
- Bewegungsgenauigkeit
  - Ursachen
  - Korrektur
  - Kalibrierung

**Bewegungseinrichtungen:**

- **Kinematik:**
  - Seriell / parallel / hybrid
  - statisch bestimmt / überbestimmt
  - redundante Achsen



Seilkinematik  
(parallel, statisch überbestimmt)



Statisch überbestimmter Stößel



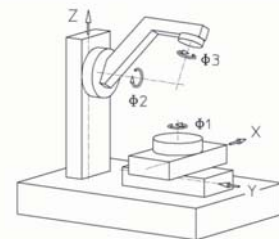
Hexapod (parallel)



Tricept (hybrid)

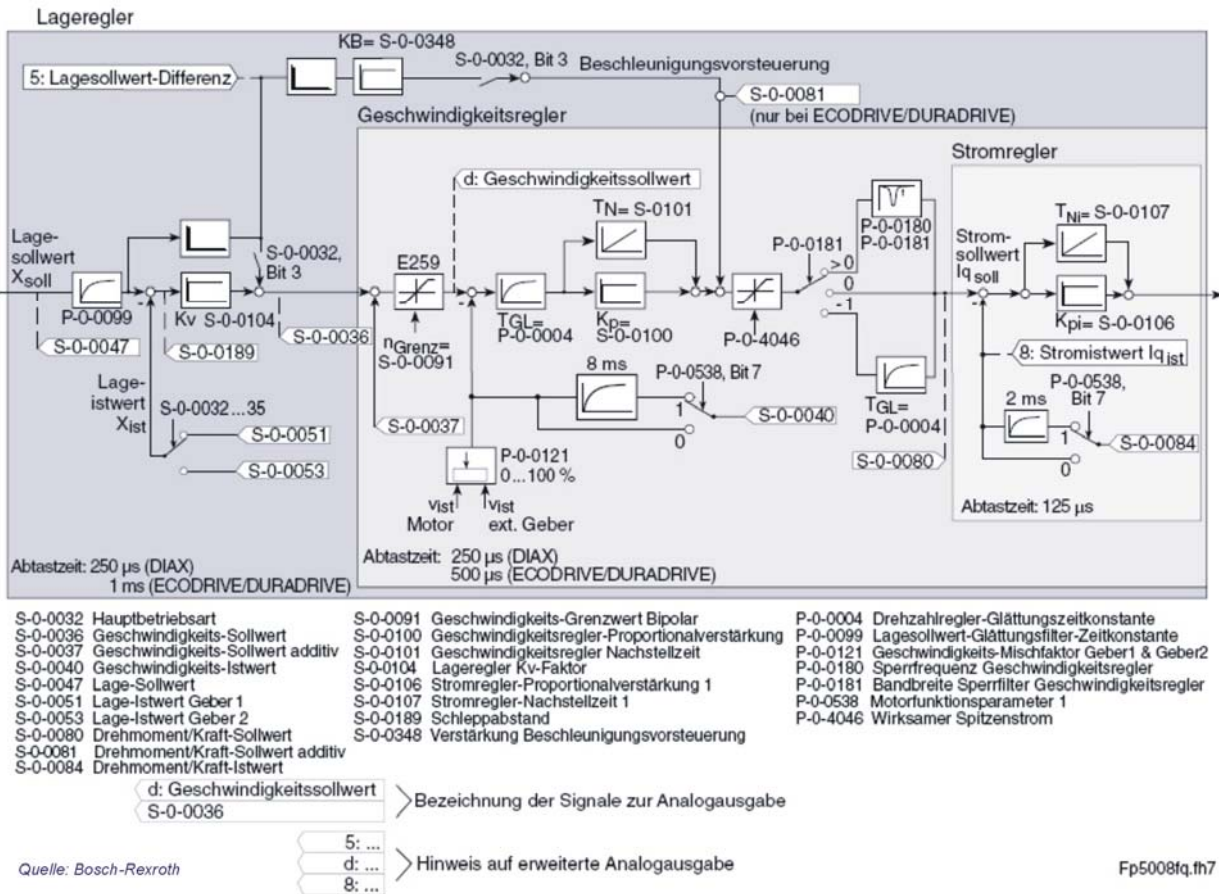


Industrieroboter (seriell)



Werkzeugmaschine (seriell)

*Bewegungseinrichtungen: Kinematiken*



Antriebsregelung: Regelkreisstruktur an einem SERCOS-Antrieb

## **3.2.5 Modul Bewegungsgeführte Maschinensysteme**

### **3.2.5.1 Systemcharakter und Komponenten bewegungsgeführter Prozesse und Systeme**

#### **Umfang**

3 SWS (2/1/0)

#### **Hörende**

Studenten 7. Semesters im Studiengang Mechatronik als Wahlpflichtfach aus der Gruppe "Anwendungen"

#### **Lehrender**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann  
u. a.

#### **Inhalt**

Der Inhalt ist identisch zu Punkt 3.2.2.1

### **3.2.5.2 Funktionell relevantes Systemverhalten und Beispiele mechatronischer Anwendungen**

#### **Umfang**

7 SWS (4/1/2)

#### **Hörende**

Studenten 8. Semesters im Studiengang Mechatronik als Wahlpflichtfach aus der Gruppe "Anwendungen"

#### **Lehrender**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann  
u. a.

#### **Inhalt**

Der Inhalt ist identisch zu Punkt 3.2.3.1

### **3.2.6 Werkzeugmaschinen-Seminar**

#### **Umfang**

1 SWS (1/0/0)

#### **Teilnehmer**

- Studenten der Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung
- Mitarbeiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik
- Gäste

#### **Leitung**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann  
Dipl.-Ing. G. Brzezinski

#### **Inhalt**

Vorstellung und Diskussion aktueller werkzeugmaschinenrelevanter Themen aus Lehre, Forschung und Praxis.

### **3.2.7 Unterstützung der Lehre an anderen Bildungseinrichtungen**

#### **Berufsakademie Sachsen**

#### **Staatliche Studienakademie Riesa**

**Fach** Werkzeugmaschinen

**Lehrende** Dr.-Ing. A. Mühl  
Dipl.-Ing. M. Löser

#### **Steinbeis-Hochschule**

**Fach** Kompetenzstudium Produktionstechnik

**Lehrende** Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann  
Dipl.-Ing. V. Möbius  
Dipl.-Ing. (FH) H. Kretzschmar

## **3.3 Studien- und Diplomarbeiten**

### **3.3.1 Interdisziplinäre Projektarbeit**

#### **Umfang**

300 Stunden, Laufzeit 6 Monate

#### **Teilnehmer**

Studenten des 6. bis 9. Semesters der Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung und des Studiengangs Mechatronik

#### **Leitung**

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann

#### **Inhalt**

Mit der Interdisziplinären Projektarbeit wird die Fähigkeit zur Teamarbeit und insbesondere zur Entwicklung, Durchsetzung und Präsentation von Konzepten nachgewiesen. Hierbei soll der Student zeigen, dass er an einer größeren Aufgabe Ziele definieren sowie interdisziplinäre Lösungsansätze und Konzepte erarbeiten kann. Die Themen leiten sich aus den aktuellen Forschungsprojekten des IWM ab.

### **3.3.2 Großer Beleg**

Der Große Beleg wird während des 9. Semesters mit einem geplanten Zeitaufwand von 500 Stunden bearbeitet (Laufzeit 6 Monate). Er ist als selbständige wissenschaftliche Arbeit während des Studiums konzipiert und stellt die unmittelbare Vorstufe der Diplomarbeit dar. Die Themen der Belegarbeiten werden aus den laufenden Forschungsprojekten des Lehrstuhls ausgewählt. Abschluss des Beleges ist die Verteidigung.

#### **Jahr 2009**

Kriechenbauer, Sebastian

Experimenteller Nachweis einer Methode zur Anpassung der Kontaktgeometrien von Umformwerkzeugen bezüglich elastischer Deformationen unter Prozesslast

---

Städel, Christian	Simulationsmodell zur Berechnung von Kettfadenkräften beim Faltenweben und Abziehen von GF/PP-spacer-fabrics
Peukert, Christoph	Modellgestützte Ermittlung von Parametern einer Ersatzbeschreibung des drehzahl-abhängigen dynamischen Übertragungsverhaltens einer rotierenden HF-Motorspindel
Kalisch, Sebastian	Exzentrische Gelenke für einen Hexapod einfacher Bauart
Koch, Oliver	Untersuchung des thermischen Verhaltens von Glas-Polypropylen-Hybridgarn-Geflecht beim thermischen Konsolidieren
Friedrich, Bertram	Erweiterung der Funktionalität eines Warenabzugs für das Weben von Spacer Fabrics auf einfach gekrümmte Strukturen
Wörner, Evi Karola	Entwicklung eines Stabstützwerkes für die Anordnung einer Motorspindel als C-Achse einer Experimentalmaschine

## **Jahr 2010**

Steinhäuser, Sebastian	Experimentelle Ermittlung von Zerspankraftkomponenten für die Prognose von Stabilitätsgrenzen beim Fräsen
Reißmann, Christian	Aufbau von FE-Strukturmodellen mit alternativen Dämpfungsbeschreibungen für verschraubte Verbindungsstellen und PSF sowie Identifikation von Dämpfungsparametern mit Hilfe von Messdaten
Thierfelder, Christoph	Aufbau und Inbetriebnahme eines Gelenk-Prüfstandes

### 3.3.3 Diplomarbeit

Nach erfolgreichem Abschluss aller Prüfungen erfolgt im 10. Semester die Anfertigung der Diplomarbeit (Bearbeitungszeit 4 Monate). Die Themen der Diplomarbeiten werden aus den aktuellen Forschungsprojekten des Lehrstuhls ausgewählt. Jede Arbeit wird zum Abschluss durch den Diplomanden verteidigt.

#### Jahr 2009

Städel, Christian	Planung von Versuchen und Verifizierung des simulativ ermittelten Aufteilungsverhältnisses der Zerspanungsleistung in Span, Werkstück und Werkzeug
Freyer, Nico	Test der Wärmeflussmessung zur Berücksichtigung des thermischen Umgebungseinflusses bei der thermischen Simulation von Werkzeugmaschinen
Müller, Peter	Modellgrundlagen für die Simulation des Ziehprozesses auf einer Servo-Spindelpresse
Carou, Nahuel	Entwicklung eines elastischen Niederhalterkonzepts für vorhandene Experimentierumgebung S-Rail
Kriechenbauer, Sebastian	Softwarekonzept zur Unterstützung der erweiterten Modellierung von Umformprozessen mit LS-Dyna
Schenke, Christer	Modellgestützte Analyse der Antriebspotenziale einer Servo-Spindelpresse

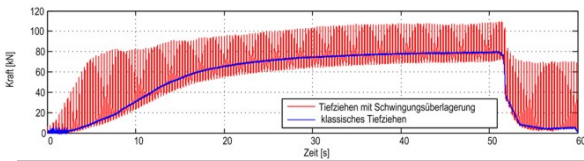
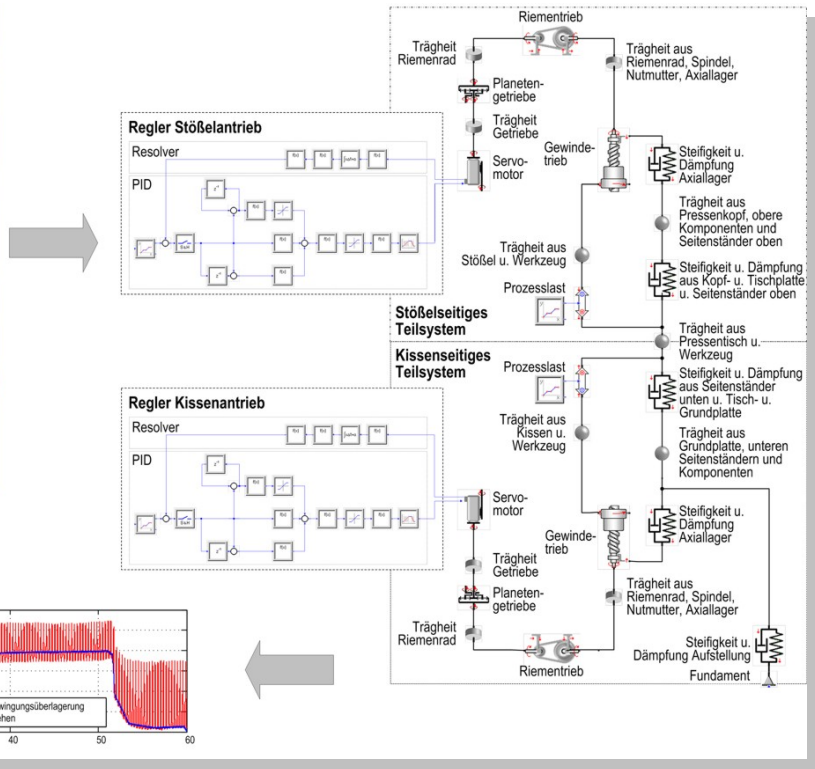
#### Jahr 2010

Kalisch, Sebastian	Erweiterung und experimenteller Abgleich thermischer Simulationsmodelle für die Beschreibung variothermer Prozesse beim Konsolidieren textilverstärkter thermoplastischer Hohlprofile
--------------------	---



Peukert, Christoph Sollbahnberechnung zur Impulskompensation von Lineardirektantrieben

Merx, Marcel Analyse, Dokumentation und Abbildung der Funktionalität einer Experimentalmaschine



*Simulationsmodell einer Servo-Spindelpresse  
[Diplomarbeit Chr. Schenke]*

## 3.4 Exkursionen

Mit unseren Exkursionen werden Studenten und Mitarbeiter mit dem Erzeugnisspektrum, den Aufgaben und Problemen der Erzeugnisentwicklung und -fertigung verschiedenartiger Unternehmen vertraut gemacht. Dafür wurden sowohl Betriebe der Großserien-/Massenproduktion als auch der Kleinserien/Einzel-fertigung besucht und großer Wert auf die Besichtigung der Fertigungs- und Erprobungsbereiche gelegt. Den neuesten Stand der Technik vermitteln die Messebesuche.

Teilnehmer der Exkursionen waren vor allem Studenten der letzten Semester der Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinen-entwicklung, der Studienrichtung Produktionstechnik und des Studiengangs Mechatronik. Aber auch interessierte Studenten anderer Semester und Fachrichtungen nutzten diese Gelegenheit für ihre berufliche Orientierung.



*Exkursion 2010*

## 11.12.2008

### • **MIKROMAT GmbH**, Dresden

Unter dem Motto "das produktive  $\mu$ " bietet dieser traditionsreiche sächsische Werkzeugmaschinenhersteller komplexe Technologien im Bereich der 5-Seiten- bzw. 5-Achsen-Bearbeitung von Werkstücken für den Werkzeugbau, die Luftfahrtindustrie und den Automobilbau bei größter Genauigkeit im gesamten Arbeitsraum an.



## 23.02.2010

### • **METAV 2010**, Düsseldorf

Fest eingeplant im Exkursionsprogramm des IWM ist aller zwei Jahre die Messe für Metallbearbeitung, der Treffpunkt der europäischen Fachwelt, um sich über die neuesten Produkte, Trends und Innovationen zu informieren.



Mit dem Schwergewicht auf Werkzeugmaschinen, Fertigungssystemen, Präzisionswerkzeugen, automatisiertem Materialfluss, Computertechnologie, Industrieelektronik und Zubehör präsentiert sich in Düsseldorf das vollständige Spektrum der Metallbearbeitung - von Standardmaschinen für die Großserienfertigung bis hin zu anspruchsvollen Sonderlösungen.

Aber auch vielfältige Anregungen für die Anfertigung ihres Beleges "Vorrichtungskonstruktion" können sich unsere Studenten hier holen.

Das IWM organisierte eine Busfahrt nach Düsseldorf, finanziell unterstützt vom Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V. (VDW).



*Gruppenfoto vor dem Messebesuch*

## 07.-08.10.2010

### • Pumpspeicherwerk Goldisthal

Das von der Vattenfall Europe Generation AG & Co. KG betriebene Pumpspeicher-Kraftwerk gehört zu den größten und modernsten seiner Art in Europa.

Es besitzt eine Gesamtnennleistung von 1.060 MW. Das Oberbecken hat einen Nutzinhalt von 12 Mio. m<sup>3</sup>, was für acht Stunden Turbinenvolllastbetrieb der vier Maschinensätze ausreicht.

Die vier Pumpspeicherturbinen (zwei synchron mit 333 U<sup>-1</sup>, zwei asynchron mit 300-346,4 U<sup>-1</sup> drehzahl geregelt) befinden sich untertage in einer Maschinenkaverne mit den Abmessungen 137 m Länge, 26 m Breite und 49 m Höhe.

In einer dazu parallelen Kaverne befinden sich die vier Blocktransformatoren, Leistungsschalter und Nebeneinrichtungen.



*Im Kavernenkraftwerk des PSW Goldisthal*

- **KAESER KOMPRESSOREN GmbH**, Coburg

KAESER KOMPRESSOREN ist Anbieter von Produkten, Dienstleistungen und kompletten Systemen zur Versorgung von Produktions- und Arbeitsprozessen mit dem Energieträger Druckluft.

Die Systemlösungen umfassen Druckluftherzeugung, Druckluftaufbereitung sowie Druckluftverteilung.

Das Unternehmen bot den Exkursionsteilnehmern eine exzellent vorbereitete und fachkompetent durchgeführte Besichtigung von der Teilefertigung bis hin zum Logistikzentrum.

Auch für das leibliche Wohl war bestens gesorgt ...



*Das Innenleben von Schraubenkompressoren*



## • Werkzeugmaschinenfabrik WALDRICH COBURG GmbH

Waldrich Coburg, seit 2005 in chinesischem Besitz, stellt hochpräzise Großwerkzeugmaschinen her. Vertikal-Fräsbearbeitungszentren in Gantry- und Tischbauweise, Horizontal-Fräsbearbeitungszentren, Vertikaldrehmaschinen, Führungsbahn- und Flächenschleifmaschinen, Riffelwalzen- und Linearführungsschleifmaschinen.

Diese Maschinen finden ihre Anwendung in den Industrien: Dieselmotorenbau, Kraftwerkskomponenten, Werkzeug- und Formenbau, Druck- und Papiermaschinenbau, Windkraftindustrie, Baumaschinen, Schienen- und Weichenbau, Werkzeugmaschinenbau, Luft- und Raumfahrt, Fertigung von Schiffspropellern, Hütten- und Walzwerke und Lohnfertigung.

Die Exkursionsteilnehmer hat die Bearbeitungsgenauigkeit beeindruckt, die mit diesen riesigen Maschinen zu erzielen ist.



*Staunen vor einem Drehtisch XXL*



- **Kultur**

Kultur ist Bestandteil jeder Exkursion des IWM - diesmal eine Führung durch die geschichtsträchtige Altstadt von Coburg.





---

# 4      Forschung

---

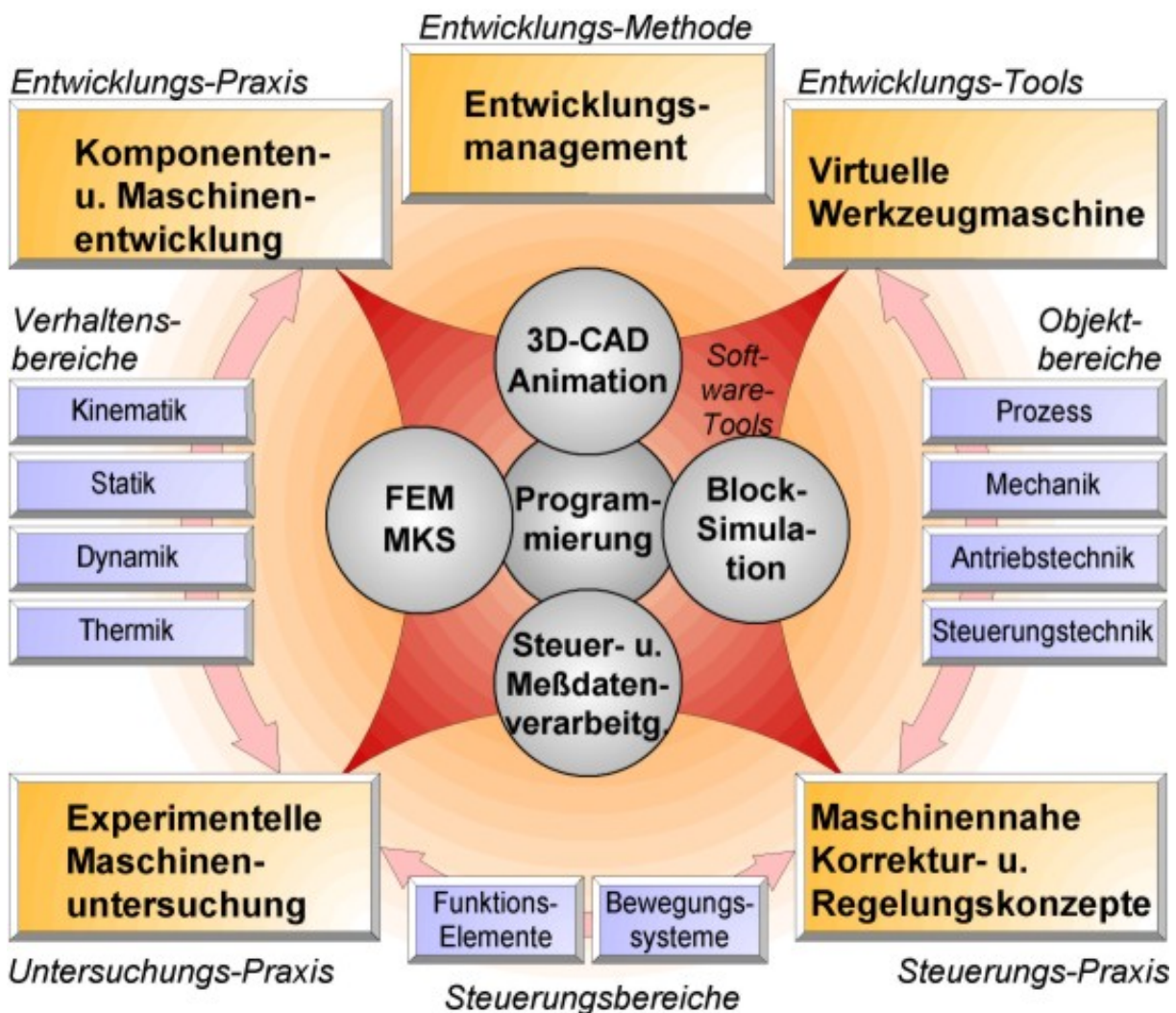




## 4.1 Entwicklung der Forschung am IWM

Die Forschungsgebiete des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen umfassen die im Entwicklungsprozess zusammengehörenden Felder der mechanischen und steuerungsseitigen Maschinenkomponenten und die für Auslegung und Eigenschaftsnachweis relevanten rechnerischen und experimentellen Arbeitsmittel und -methoden.

Besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang dem "Virtual Prototyping" zu, der ganzheitlichen Abbildung der Maschine und ihres Verhaltens im Rechner. Hierdurch werden wesentliche Eigenschaften einer Neu- oder Weiterentwicklung bereits vor dem Bau des ersten Prototyps beurteilbar.



Als Ergebnis hochwertiger Projektanträge konnte die Anzahl bewilligter Projekte und damit das Drittmittelbudget zur Finanzierung der Forschung weiter erhöht werden (Bild 1).

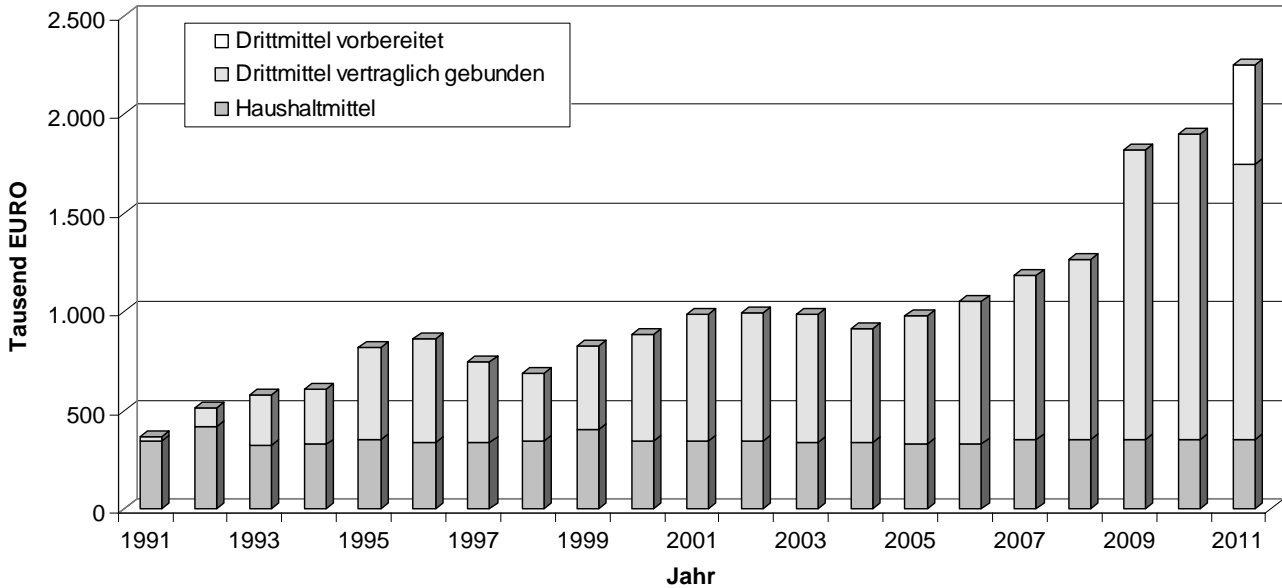


Bild 1: Budget des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen

Die Finanzierungsquellen und deren Anteile am Gesamt-Drittmittelaufkommen zeigt Bild 2.

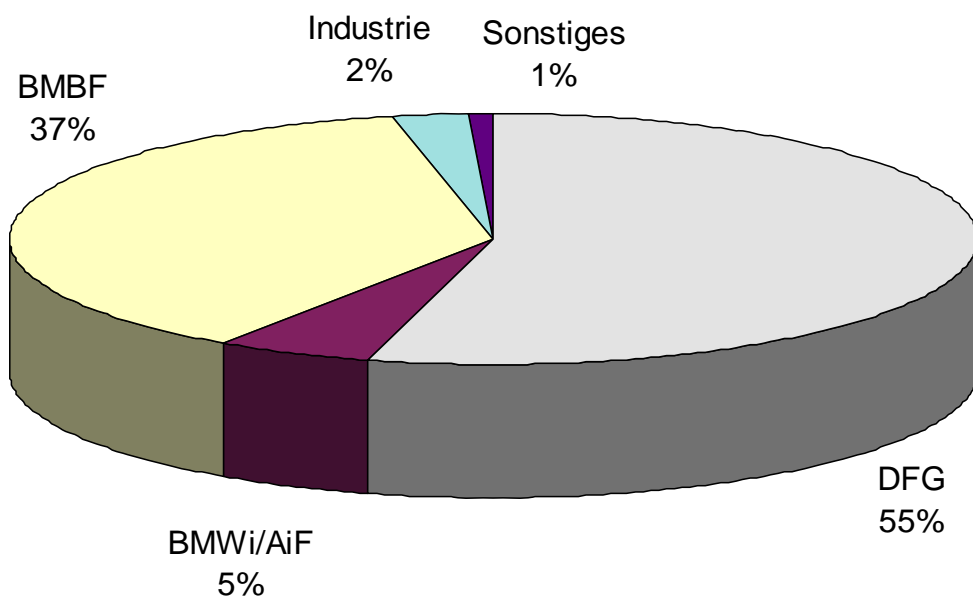


Bild 2: Anteile der Forschungsfinanzierung 2009/2010 (Drittmittel)

Bild 3 veranschaulicht die zahlenmäßige Entwicklung bearbeiteter und in Vorbereitung befindlicher DFG-Projekte.

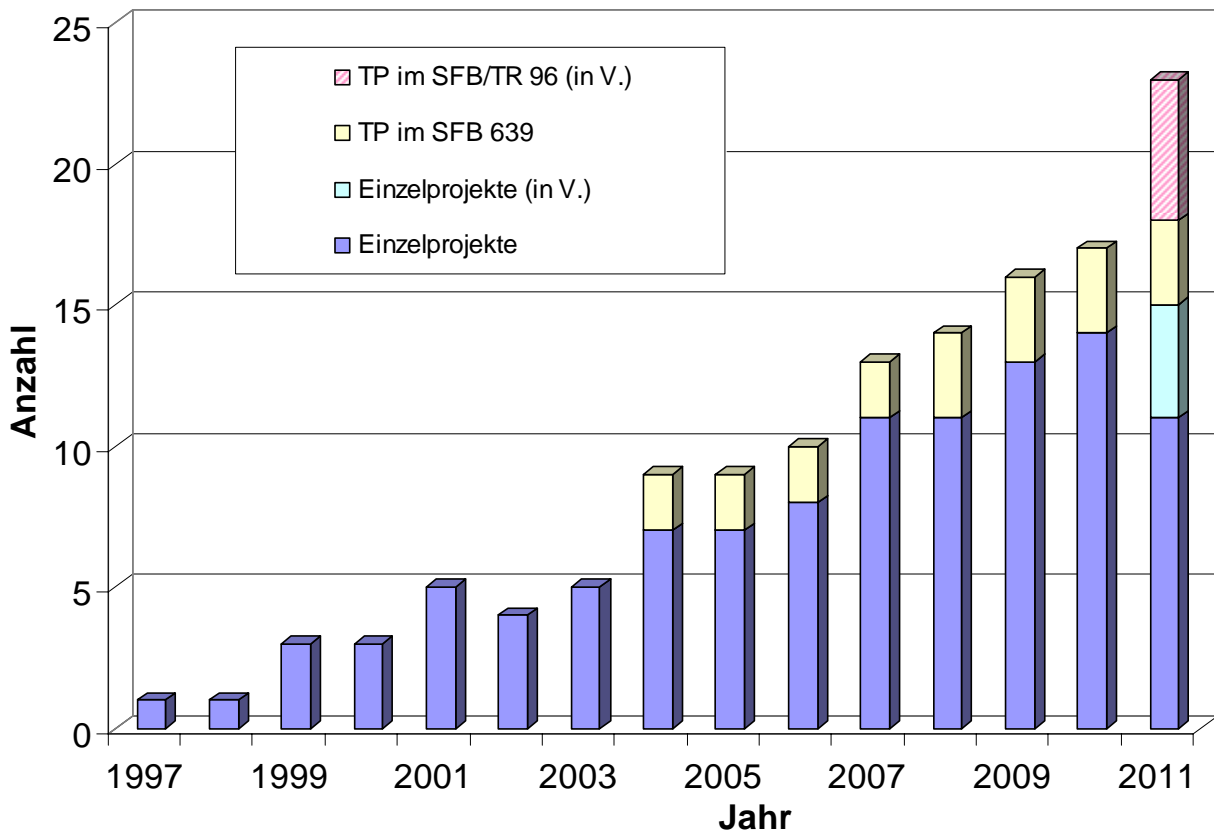


Bild 3: Anzahl bearbeiteter und vorbereiteter DFG-Projekte



## 4.2 Die aktuellen Forschungsschwerpunkte

### Produktivität

*Konzeptionelle Maschinenentwicklung:*

- ganzheitliche Wirtschaftlichkeit
- funktionsorientierte Gestaltung
- entwicklungsmethodische Unterstützung (Kompakt-Präzisionsdrehmaschine, Hexapod einfacher Bauart, Lineardirektgetriebene Präzisions-Leichtbau-Fräsmaschine)

*Virtuelle aktive Werkzeugmaschine:*

- Modellierungs- und Simulationstechnologien für das prozessaktuelle Gesamtsystem unter einer Simulationsumgebung (Zerspanung, Umformung)

*Prozessanalyse und -optimierung:*

- Prozess-Simulation (WZ-WSt) unter Einfluss von Maschine, Antrieben und Steuerung
- Bearbeitungsergebnis (Maß, Form, Oberfläche)
- Stabilitätsanalyse
- thermische Analyse



### Dynamik

*Komponenten zur Steigerung der Bewegungsdynamik:*

- Lineardirektantriebe (Impulskompensation)
- Profilschienenführungen (Lebensdauer)
- aktiv magnetisch gelagerte Spindel

## Genauigkeit

Strukturmodellbasierte Fehlerkorrektur im Arbeitsraum:

- steuerungsintegrierte Simulation des statischen und thermischen Verhaltens
- Kalibrierung kinematischer Modelle



## Bewegungsvermögen

6 DOF im Arbeitsraum:

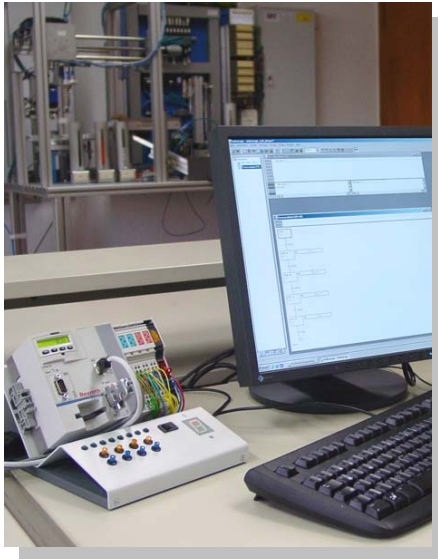
- Hexapod (Handling und Bearbeitung)
- Bahnplanung (Koordinatensysteme)
- Prozessführung (Regelungskonzepte)
- Kollisionsprüfung (Lagebestimmung)
- Fehlerkorrektur (Transformation)

## Flexibilität

(Re-)Konfigurierbarkeit:

- funktionelle Modularisierung (Mechanik/Steuerung)
- Selbstinbetriebnahme (Steuerungsintegration)
- Referenzierung (Lagebestimmung)





## Automatisierung

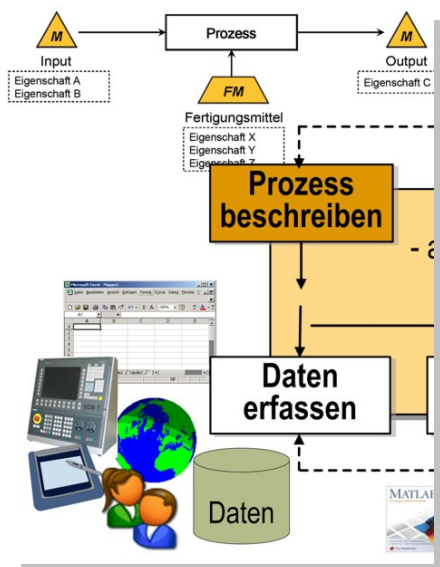
*Alternatives Steuerungskonzept:*

- Datenaufbereitung und -abarbeitung zur Bewegungssteuerung
- entwicklungsbegleitende Definition der Funktionssteuerung (Prüfung, Steuerung, Überwachung, Diagnose)

## Intelligenz

*Funktionserweiterungen in der Maschinensteuerung:*

- Messbahngenerierung (z. B. DBB) mit Messdatenerfassung und -verarbeitung
- Kalibrierung von Kamera-Modellen mit Bilderfassung und -verarbeitung
- Adaption exemplarischer Parameter



## Reproduzierbarkeit

*Analysemethoden für komplexe technisch-technologische Prozessketten:*

- Modellierungs- und Analysemethoden für Wechselwirkungen im Fertigungsprozess
- Integration der Betriebsdatenerfassung und der Bauteilprüfung
- Informations- und Wissensmanagement

Die Forschungstätigkeit findet statt in den vier Arbeitsgruppen

- Struktur- und Prozessanalyse  
Leiter: Dr.-Ing. Andreas Mühl
- Steuerungstechnik  
Leiter: Dr.-Ing. Bernd Kauschinger
- Umformtechnik  
Leiter: Dr.-Ing. André Hardtmann
- Prozessketten  
Leiter: Dr.-Ing. Hajo Wiemer

## 4.3 AG Struktur- und Prozessanalyse

### 4.3.1 Voraussetzungen zur reproduzierbaren Fertigung von textilen Preforms



#### **Teilprojekt A4 im SFB 639 Textilverstärkte Verbundkomponenten für funktionsintegrierende Mischbauweisen bei komplexen Leichtbauanwendungen**

**Laufzeit** 01/2004 - 12/2011

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dr.-Ing. Andreas Mühl  
Dipl.-Ing. Michael Löser

**Kooperation** Mitgliedsinstitute der TU Dresden im SFB 639

#### **Zielstellung**

Das Teilprojekt A4 des SFB 639 liefert in Verknüpfung mit den ebenfalls im SFB 639 laufenden Vorhaben A3 ("Textile spacer fabrics") und D4 ("Konstruktion und Verarbeitung") einen Beitrag zur Entwicklung einer Prozesskette, mit der neuartige spacer fabrics auf der Basis von Glasfaser-Polypropylen-Hybridgarn gewebt, abgezogen, zu Preforms zugeschnitten, gepuffert und thermisch verpresst werden können. Das Teilprojekt A4 führt die in der Basisphase des Projekts 2004 - 2007 entworfene und erfolgreich in Betrieb genommene neuartige Abzugs-, Schneid- und Stapleinrichtung für ebene spacer fabrics mit rechteckiger Öffnungsgeometrie zu einer technologisch reifen Lösung. Das Projekt entwickelt und testet ab 2008 angepasste Gerätetechniken für Abzug und Zuschnitt gekrümmter spacer-fabric-Strukturen mit variabler Öffnungsgeometrie. Weiterhin erfolgen Arbeiten zur Modellierung und Simulation der dynamischen Wechselwirkungen zwischen Fadensystemen und Antriebszügen der textilen Gerätetechnik zum Faltenweben und Abzug von spacer fabrics. Dieses zu entwickelnde Simulationswerkzeug dient der fundierten Stützung o. g. Entwicklungsarbeiten zu



angepassten Gerätetechniken und erlaubt deren modellgestützte Inbetriebnahme.

## **Lösungsweg**

In der ersten Projektphase 2004 - 2007 wurde auf der Basis konstruktionsmethodischer Vorgehensweisen ein völlig neuartiges Abzugs-, Schneid- und Stapelsystem für ebene spacer fabrics mit rechteckiger Öffnungsgeometrie entwickelt und in Betrieb genommen; zugleich wurden erste Simulationsmodelle zur Prognose dynamischer Kettfadenkräfte im Gesamtsystem Webmaschine-Abzug entwickelt. In der genehmigten zweiten Phase 2008 - 2011 sind die Entwicklung und Anpassung der Gerätetechniken zum Abzug, Zuschnitt und Stapeln für ebene und einfach gekrümmte spacer fabrics mit variabler Öffnungsgeometrie geplant; der Lösungsweg hierzu gliedert sich in die Schritte

- (1) Finden und modellgestütztes Bewerten von Lösungsprinzipien
- (2) Konstruktion und Modifikation
- (3) Bau
- (4) Steuerungsentwicklung und
- (5) Inbetriebnahme.

Begleitend hierzu sind Arbeiten zur Erlangung einer umfassenden Simulationsfähigkeit dynamischer Wechselwirkungen beim Weben und Abziehen von spacer fabrics vorgesehen; der Lösungsweg gliedert sich in die Schritte

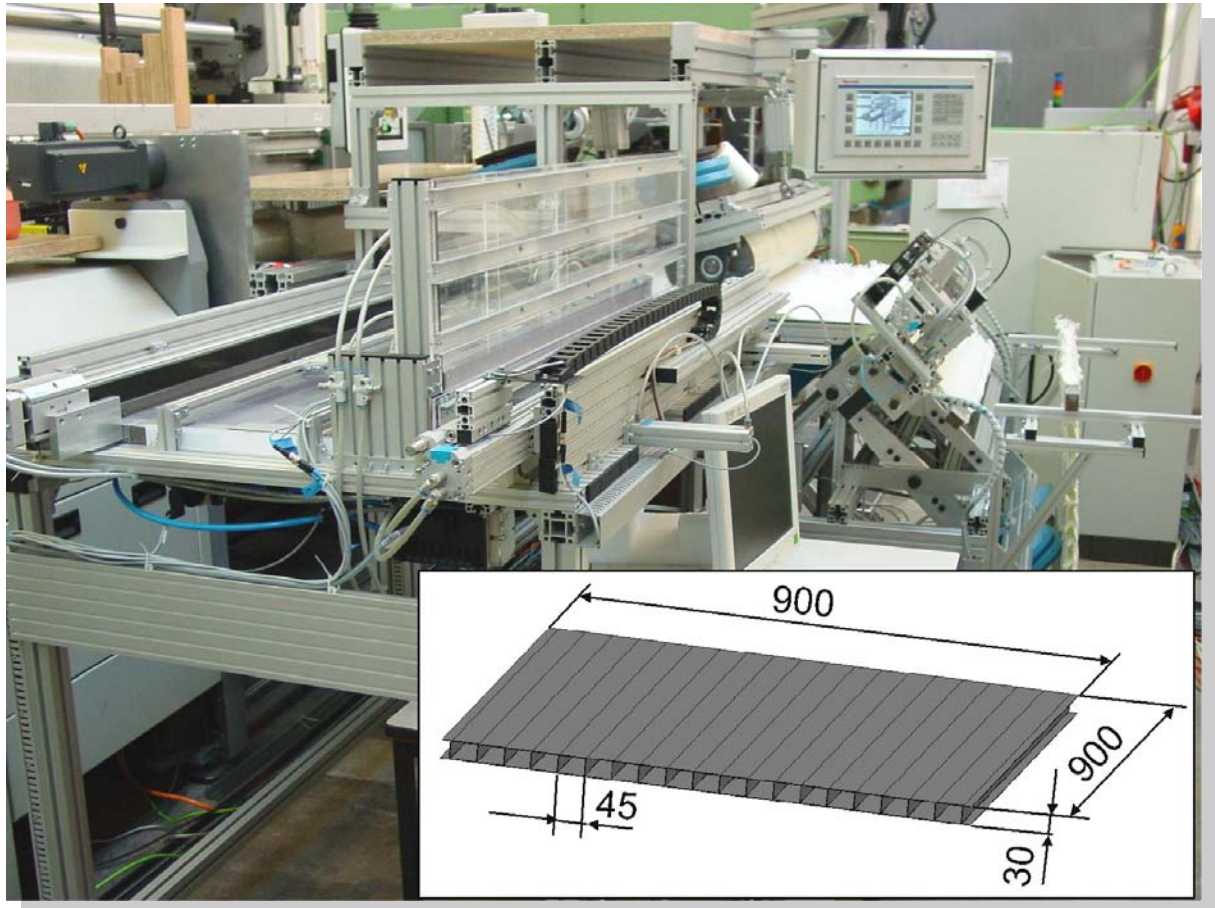
- (1) Analyse der Systemkomponenten
- (2) Aufbau einer Modellstruktur
- (3) Parametergewinnung
- (4) Modellierung, Modellrechnung und Modellverifikation und
- (5) Entwicklung einer modellgestützten Inbetriebnahmestrategie.

In den Jahren 2009/2010 konzentrierte sich die Arbeit im Teilprojekt A4 u. a. auf die Konstruktion und Fertigung sowie auf grundlegende Tests eines Schussfaden-Rückhaltesystems zur Erzeugung einfach gekrümmter spacer fabrics und auf die Modellierung der Kettfadenkräfte beim spacer-Weben.



## Ergebnisse

*Bild 1* zeigt das im Teilprojekt A4 entwickelte Abzugs-, Schneid- und Stapelsystem für das Weben von spacer fabrics sowie die geometrischen Abmessungen der spacer-Struktur aus der Basisphase des Projekts.



*Bild 1: Abzugs-, Schneid- und Stapelsystem*

*Bild 2* zeigt die erreichte Prognosefähigkeit zur Vorhersage der Kettfadenkräfte beim spacer-Weben.

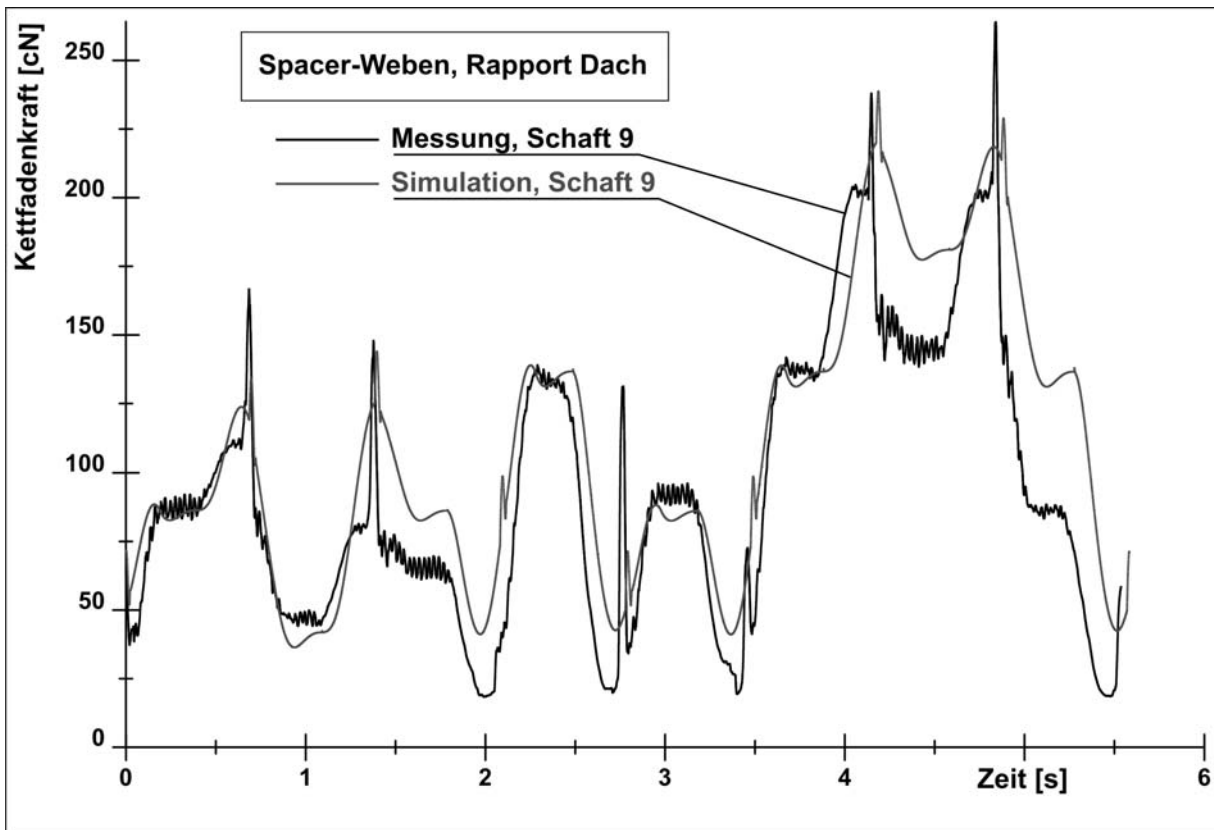


Bild 2: Simulation von Kettfadenkräften beim spacer-Weben

## 4.3.2 Thermische Simulation des Konsolidierungsprozesses für Spacer Fabrics



### Vorhaben im Teilprojekt D4 des SFB 639 Textilverstärkte Verbundkomponenten für funktionsintegrierende Mischbauweisen bei komplexen Leichtbauanwendungen

**Laufzeit** 01/2004 - 12/2011

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dr.-Ing. Günter Jungnickel  
Dipl.-Ing. Steffen Rehn

**Kooperation** Mitgliedsinstitute der TU Dresden im SFB 639

### Zielstellung

Im Teilprojekt D4 "Konstruktion und Verarbeitung" des Sonderforschungsbereichs 639 "Textilverstärkte Verbundkomponenten für funktionsintegrierende Mischbauweisen bei komplexen Leichtbauanwendungen" stellt die thermische Konsolidierung der spacer fabrics einen Schwerpunkt dar. Für die Entwicklung der Konsolidierungswerkzeuge und die Steuerung der Prozessabläufe beim Konsolidieren der textilen Preforms ergeben sich zahlreiche Fragen, die mit Hilfe der thermischen Simulation gelöst werden sollen.

### Lösungsweg

Die praktisch erreichbaren Prozesszeiten weichen erheblich von den theoretischen Werten einfacher Modellvorstellungen ab (*Bild 1*). Die Ursachen liegen im nichtlinearen Werkstoffverhalten, in den teilweise erheblichen Wärmekapazitäten der Leistungsquellen, Wärmeträger und Werkzeuge, in den Wärmeverlusten an die Umgebung, in den örtlichen Eigenschaften der Leistungsquellen, in den Temperaturunterschieden über dem Wandquerschnitt des Werkstücks und in Temperaturgrenzen auf der Wärmeübertragungstrecke. Alle diese relevanten Einflüsse müssen im Simulationsmodell berücksichtigt werden.

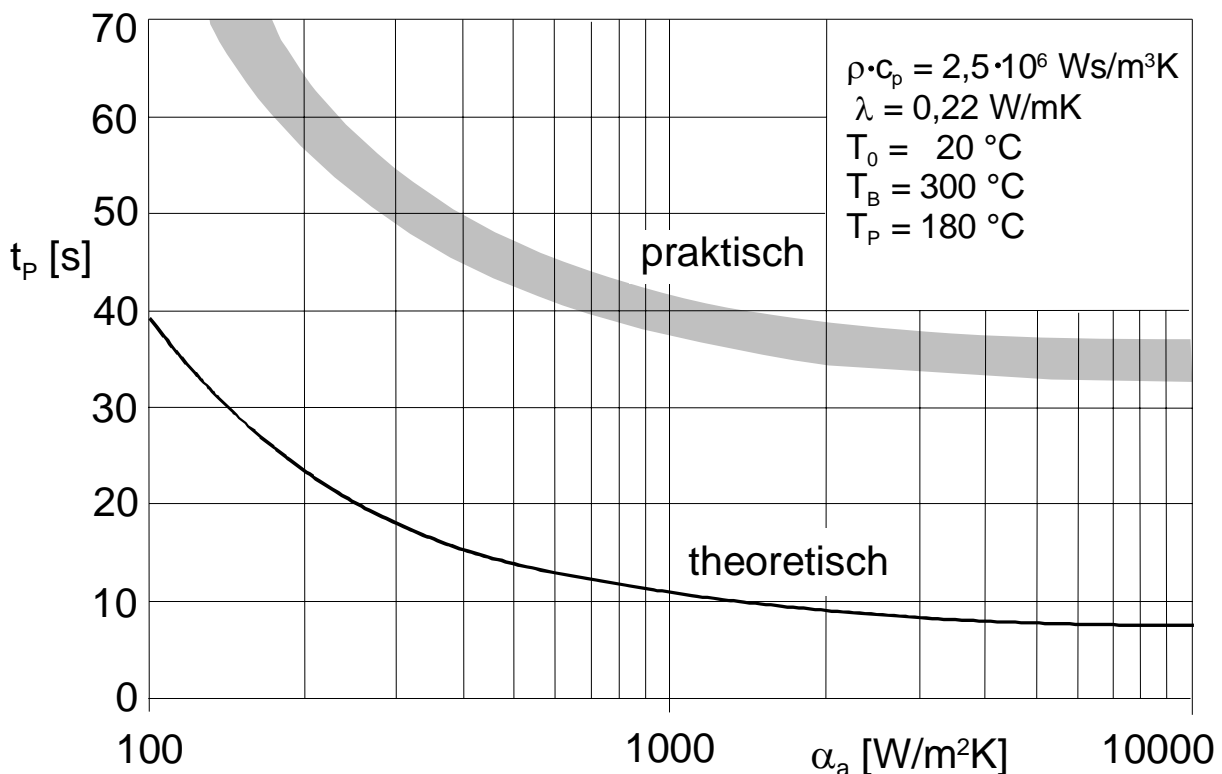


Bild 1: Erwärmungszeit des Musterwerkstücks

## Ergebnisse

Es wurden zahlreiche Simulationsmodelle zur Lösung einzelner Fragestellungen bei der thermischen Konsolidierung von spacer fabrics aufgebaut.

Beispielhaft soll hier die Untersuchung der Wärmeübertragungseigenschaften der Werkzeugkerne gezeigt werden. Die Werkzeugkerne sind für die innere Temperierung und Formgebung des Werkstücks zuständig. *Bild 2* zeigt das thermische Simulationsmodell zur Untersuchung des Wärmetransports im Kernquerschnitt. Anhand der gewonnenen Temperaturverläufe über dem Konsolidierungsprozess (*Bild 3*) konnten zahlreiche Fragen hinsichtlich der thermisch optimalen Gestaltung der Detailkonstruktion des Werkzeugkerns beantwortet werden. Dies betrifft beispielsweise die Gestaltung der Fugen zwischen den Metallprofilen der Kernkinematik oder die Gestaltung der Temperierkanäle.

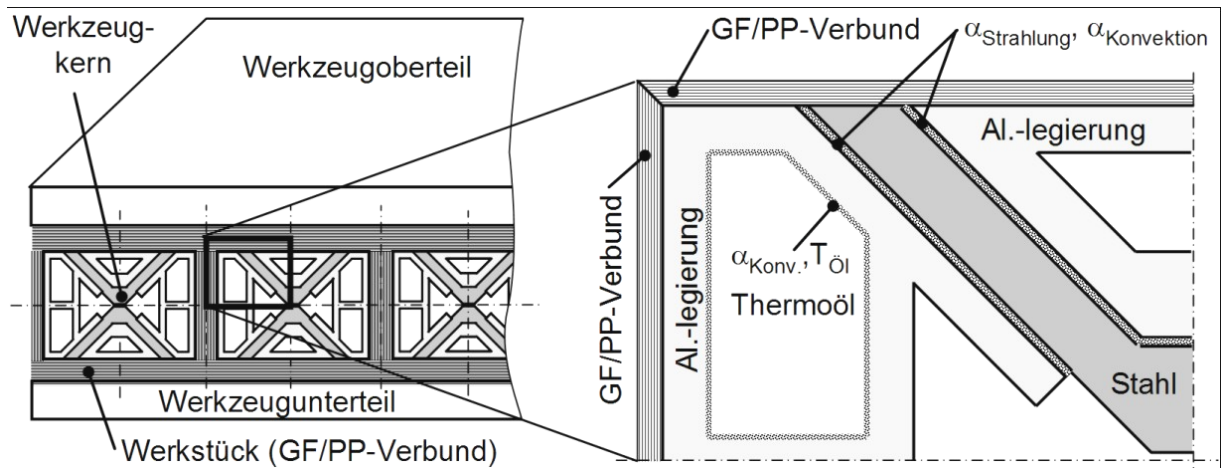


Bild 2: Thermisches Simulationsmodell des Werkzeugkerns

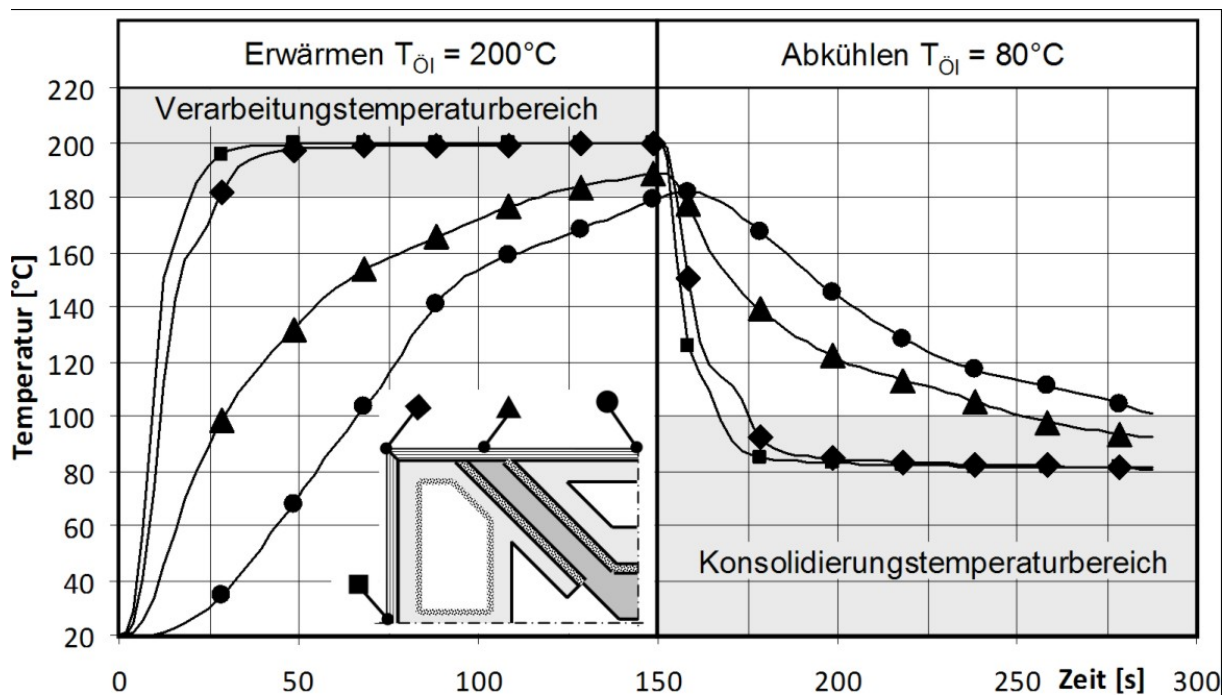


Bild 3: Temperaturentwicklung im Werkstück während der Erwärmungs- und Abkühlphase des Konsolidierungsprozesses

### 4.3.3 Untersuchungen zu den Grenzwerten des Einsatzes adaptronischer Komponenten zur Impulsentkopplung von linearmotorgetriebenen Werkzeugmaschinenachsen unter veränderlichen strukturell-mechanischen Umgebungsbedingungen

<b>Laufzeit</b>	06/2003 - 05/2005 06/2005 - 05/2007 (1. Fortsetzung) 06/2007 - 05/2009 (2. Fortsetzung)
<b>Finanzierung</b>	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) SPP 1156 Adaptronik für Werkzeugmaschinen
<b>Bearbeiter</b>	Dipl.-Ing. Jens Müller Dr.-Ing. Günter Jungnickel
<b>Kooperation</b>	FhG IWU Chemnitz, Außenstelle Dresden

#### Zielstellung

Gegenstand des Forschungsvorhabens waren Grundlagenuntersuchungen zur wirksamen Impulsentkopplung des Gestells einer Maschinenstruktur mit Lineardirektantrieb nach dem Funktionsprinzip der Lafette (*Bild 1*) mit den Zielen:

- Nachweis einer signifikanten Verringerung der Struktur-anregung durch die Impulsentkopplung.
- Ermittlung relevanter Einflussfaktoren auf die Wirksamkeit der Impulsentkopplung.
- Bestimmung optimaler Feder-Dämpfer-Parameter für variable Gestelleigenschaften.



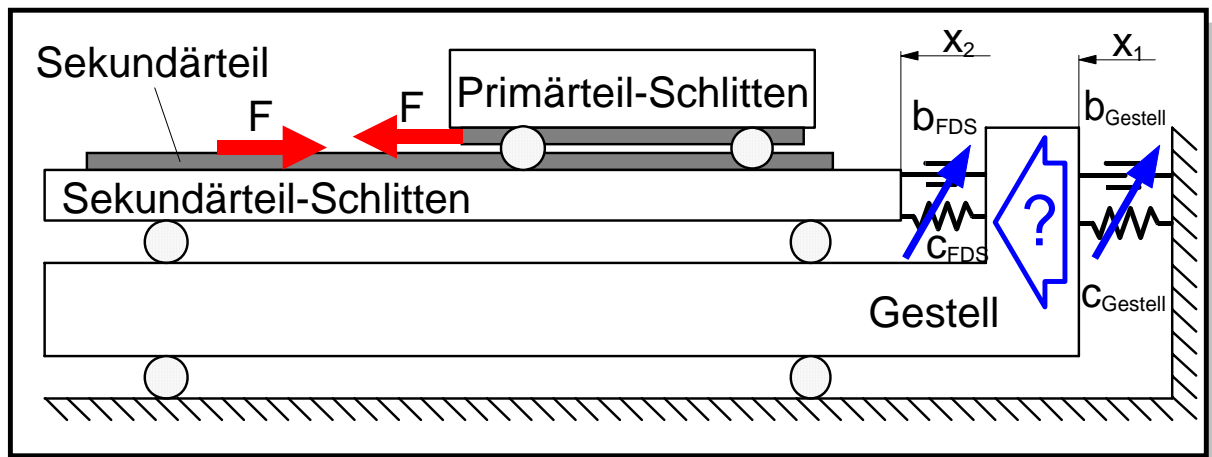


Bild 1: Grundprinzip der Impulskopplung mit adaptronischem Feder-Dämpfer-System

## Lösungsweg

Es wurde ein Linearmotorversuchsstand zur Untersuchung der Impulskopplung entwickelt (Bild 2). Zur Erweiterung der untersuchbaren Parameterbereiche, insbesondere der Verfahrenswege, sowie zur Verringerung des Messaufwandes wurde ein Matlab/Simulink<sup>®</sup>-Modell dieses Versuchsstandes erstellt. Für die Beurteilung der Wirksamkeit der Impulskopplung wurden verschiedene Messgrößen und Bewertungskriterien betrachtet. Letztlich wurde die Gestellbeschleunigung in Bewegungsrichtung als Messgröße sowie als Kriterium die maximale Überschwingweite und die betragslineare Regelfläche dieser Gestellbeschleunigung ausgewählt. Anhand dieser Kriterien wurden Optima und Grenzen der Impulskopplung ermittelt und mit der unentkoppelten Standard-Achse verglichen.

Weiterhin wurde der Einfluss der Führungsreibung sowie der Rastkraft und Kraftwelligkeit der Lineardirektantriebe auf die erreichbare Reduzierung der Strukturanregung untersucht.

## Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit Impulskopplung eine deutliche Verringerung der Gestellanregung gegenüber der unentkoppelten Einzelachse erreicht werden kann. Dafür ist es erforderlich, sowohl die Dämpfung als auch die Steifigkeit des Feder-Dämpfer-Systems an veränderliche Gestellparameter anzu-

passen. Als Beispiel sind in *Bild 3* die gemessenen und simulierten Maximalwerte der Gestellbeschleunigung bei Anregung durch einen Beschleunigungsvorgang mit

- Sollgeschwindigkeit  $v_{\text{Soll}} = 0,5 \text{ m/s}$ ,
- Sollbeschleunigung  $a_{\text{Soll}} = 40 \text{ m/s}^2$ ,
- Sollruck  $r_{\text{Soll}} = 10.000 \text{ m/s}^3$

bei unterschiedlichen Gestelleigenschaften und Feder-Dämpferparametern für die Impulsentkopplung dargestellt.

Grenzen des Verfahrens wurden insbesondere hinsichtlich der gestellanregenden Kraftwelligkeit und Rastkraft des Nutzantriebs ermittelt. Außerdem wurde ein starker Einfluss der Reibungsverhältnisse am Sekundärteilschlitten sowie der Gestelleigenschaften auf die Wirksamkeit der Impulsentkopplung festgestellt.



*Bild 2: Prüfstand zur Impulsentkopplung*

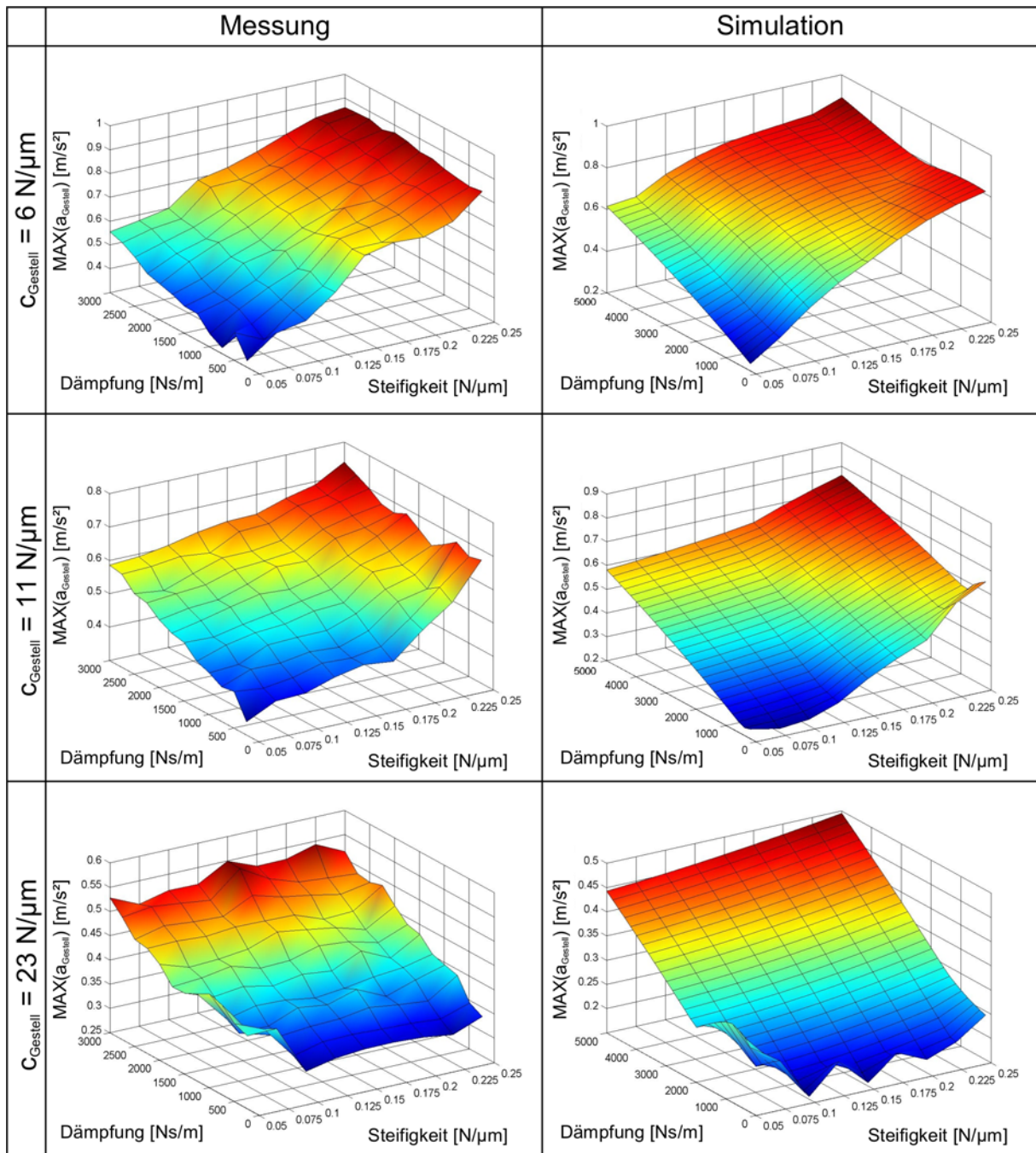


Bild 3: Gemessene und simulierte Maximalwerte der Gestellbeschleunigung in Abhängigkeit von  $c_{\text{FDS}}$ ,  $d_{\text{FDS}}$  und Gestellsteifigkeit

### 4.3.4 Grundlagenuntersuchungen für die Impulskompensation an Vorschubachsen mit Lineardirektantrieb

**Laufzeit** 07/2008 - 06/2010  
10/2010 - 09/2012 (Fortsetzung)

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dr.-Ing. Jens Müller  
Dipl.-Ing. Olaf Holowenko

#### Zielstellung

Lineardirektantriebe wurden in den letzten Jahren immer leistungsfähiger und gleichzeitig immer preiswerter. Aufgrund ihrer besonderen Vorteile, den hohen Kraftanstiegsgeschwindigkeiten, Verfahrensgeschwindigkeiten, Beschleunigungen und Beschleunigungsänderungen (Ruck) eignen sie sich besonders für hochdynamische Anwendungen, wie z. B. Werkzeugmaschinen für die Leichtmetall- und HSC-Bearbeitung, Handhabungstechnik oder in der Halbleiterindustrie (z. B. Bonder). Antriebskräfte erzeugen jedoch auch immer entgegengesetzt gerichtete Reaktionskräfte, die das Gestell, je nach Kraftamplitude und Kraftänderungsgeschwindigkeit, zu Schwingungen anregen. Beim Lineardirektantrieb entsprechen diese Reaktionskräfte aufgrund der direkten Anbindung der Linearmotor-komponenten an Gestell und Schlitten sowie fehlender mechanischer Übertragungselemente, wie z. B. übersetzender und elastischer Kugelgewindetriebe oder Zahnstangen, direkt den Antriebskräften. Eine Möglichkeit, die Gestellanregung durch die Reaktionskraft zu vermeiden, ist die Kraftkompensation, bei der eine zur Reaktionskraft entgegengesetzt wirkende Kompensationskraft in das Gestell eingeleitet wird. Eine spezielle Form der Kraftkompensation ist die am IWM entwickelte Impulskompensation, bei der nur die hochfrequenten, gestellanregenden Kraftanteile mit einem zweiten, kollinear angeordneten Lineardirektantrieb kompensiert werden. Die Berechnung der Sollkraft



für den Kompensationsantrieb erfolgt durch Filterung des Sollkraftsignals des Nutzantriebes mit einem Bandpassfilter.

Ziel dieses Forschungsvorhabens sind Grundlagenuntersuchungen zur wirksamen Impulskompensation am Gestell einer Maschinenstruktur mit Lineardirektantrieb.

## Lösungsweg

Es wurde ein Linearmotorversuchsstand (s. *Bild 2 in Abschnitt 4.3.3.*) aufgebaut, an dem die Impulskompensation sowie ein alternatives Verfahren, die Impulsentkopplung, untersucht werden können. Zur Erweiterung der untersuchbaren Parameterbereiche, insbesondere der Verfahrenswege, sowie zur Verringerung des Messaufwandes wurden Matlab/Simulink<sup>®</sup>-Modelle des Versuchsstandes erstellt. Anhand definierter Kriterien wurden Optima und Grenzen des Verfahrens ermittelt und die erreichbare Verringerung der Gestellanregung mit der Anregung durch die unkompenzierte Standard-Achse verglichen. Weiterhin wird der Einfluss der unterschiedlichen Lage von Massenschwerpunkt und Kraftangriffspunkt bei Nutz- und Kompensationsschlitten auf die Anregung von Biegeschwingungen des Gestells untersucht.

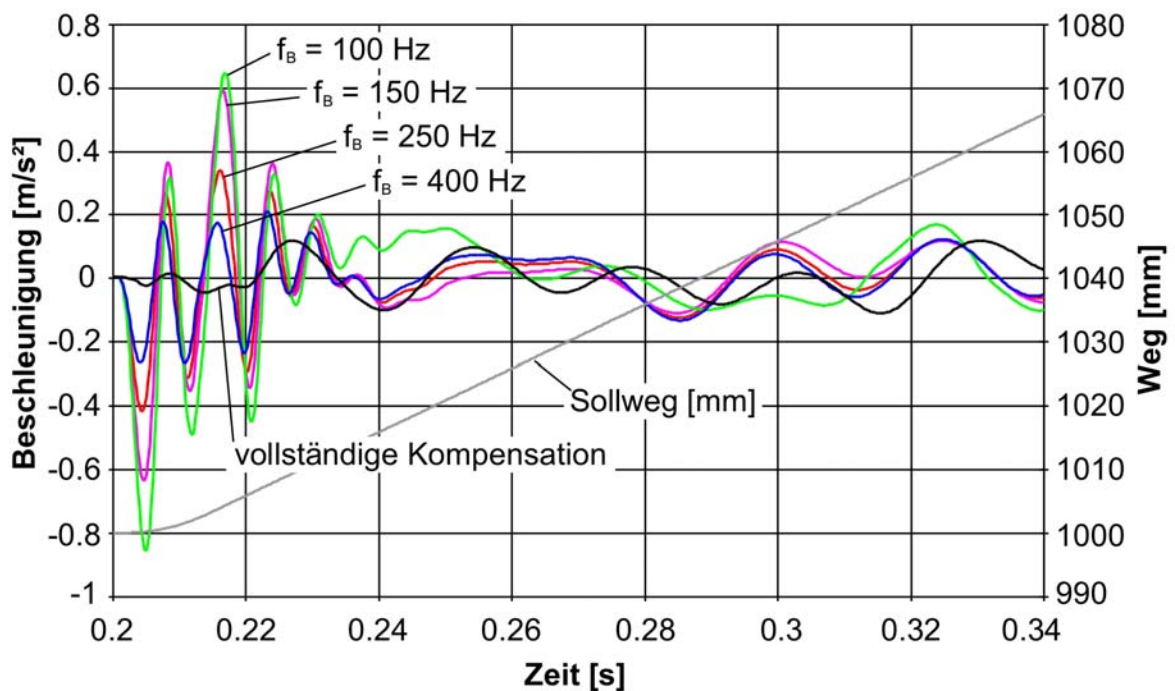


Bild 1: Einfluss der Bandbreite auf die Gestellbeschleunigung ( $f_G = 0$  Hz)

## Ergebnisse

Es wurden experimentell und in der Simulation mit Matlab/Simulink<sup>®</sup> Parametervariationen zur Ermittlung des Einflusses von Bandbreite und Grenzfrequenz des Bandpasses zur Sollstromgenerierung sowie der Reglerparameter des Kompensationsantriebes auf die erreichbare Impulskompensation durchgeführt.

Als Beispiel ist in *Bild 1* der Einfluss der Bandbreite des Filters zur Sollstromgenerierung auf die Gestellbeschleunigung bei Anregung durch einen Beschleunigungsvorgang dargestellt.

Es wurde gezeigt, dass bei der Filterparametrierung für eine optimale Impulskompensation die untere Grenzfrequenz  $f_G$  möglichst klein und die Bandbreite  $f_B$  möglichst groß zu wählen sind.

Bei der Parametrierung von Lage- und Geschwindigkeitsregelkreis des Kompensationsantriebes, die für die Rückführung des Antriebes in seine Ausgangsposition erforderlich sind, zeigte sich, dass der  $k_V$ -Faktor kaum Einfluss auf die Gestellantwort hat, während der  $k_P$ -Faktor die Gestellantwort maßgeblich beeinflusst. Der  $k_V$ -Faktor kann also relativ groß gewählt werden, der  $k_P$ -Faktor dagegen muss möglichst klein sein. Der I-Regler des Geschwindigkeitsregelkreises muss ausgeschaltet werden. Eine maßgebliche Abhängigkeit der Gestellantwort von den Gestelleigenschaften ist nicht erkennbar.

Weiterhin wurde die Anregung von Biegeschwingungen infolge der Momentenanregung durch den Hebelarm zwischen Schlittenschwerpunkt und Krafteinleitungsstelle untersucht. Dazu wurde die in *Bild 2* dargestellte Zusatzmasse am Schlitten montiert, die die Einstellung unterschiedlicher Schlittenschwerpunktlagen ermöglicht. Die Messergebnisse in *Bild 3* zeigen, dass die Biegeschwingung der ersten Eigenfrequenz nahezu verschwindet, wenn sich der bewegte Massenschwerpunkt in der Kraftangriffsebene befindet.



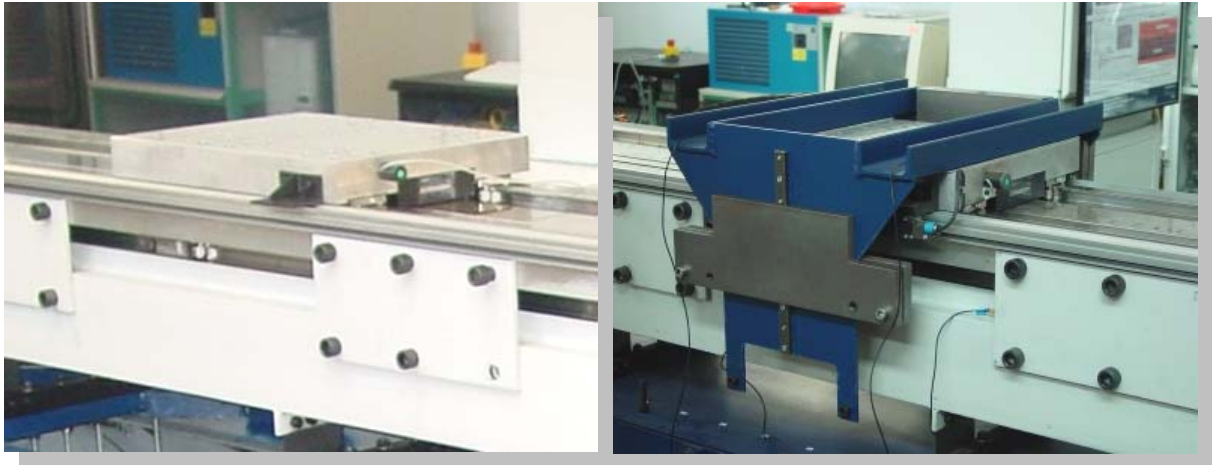


Bild 2: Nutzantrieb ohne und mit Zusatzmasse

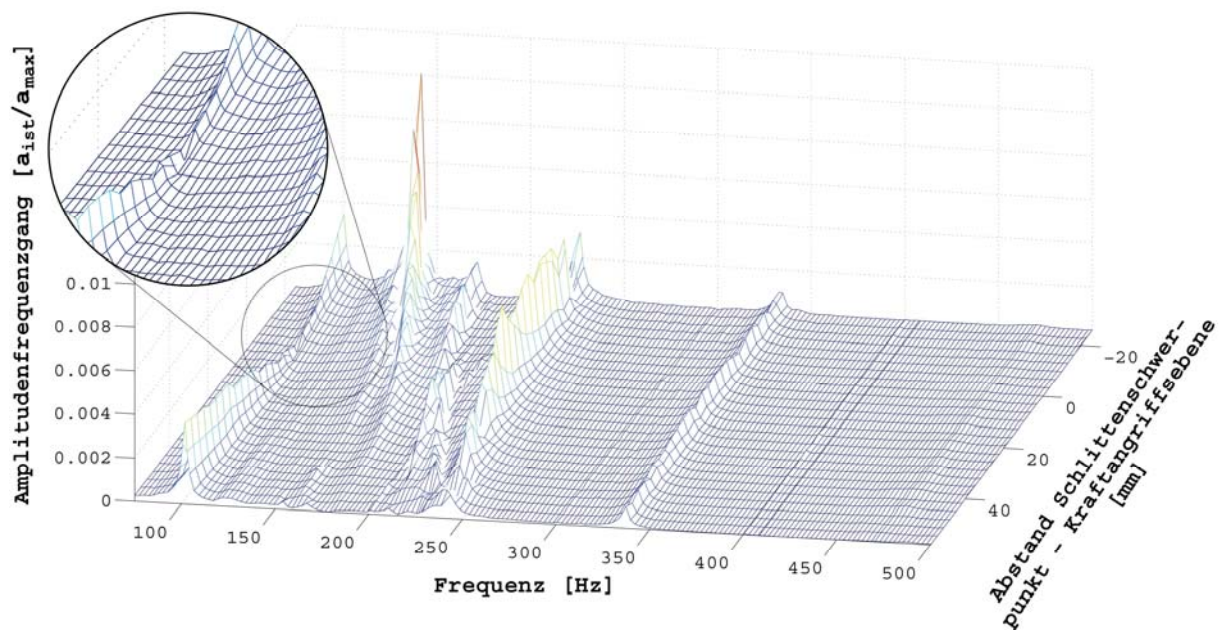


Bild 3: Einfluss der Schwerpunktlage der Schlitten auf die Anregung von Gestellbiegeschwingungen

### **4.3.5      Synthese von Ratterkarten mit hochoberflächendrehenden Spindel-Lager-Systemen unter Berücksichtigung gyroskopischer Effekte**

**Laufzeit**            06/2007 - 05/2009  
                         11/2009 - 10/2011 (Fortsetzung)

**Finanzierung**    Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)  
                         SPP 1180 Prognose und Beeinflussung der  
                         Wechselwirkungen von Strukturen und  
                         Prozessen

**Bearbeiter**        Dipl.-Ing. Michael Löser

#### **Zielstellung**

Das Ziel des Vorhabens besteht darin, Ratterkarten insbesondere unter Berücksichtigung der drehzahlabhängigen Änderung des strukturdynamischen Verhaltens von Spindel-Lager-Systemen schnell, zumindest teilanalytisch und unter Verzicht auf zeitaufwändige Simulationen im Zeitbereich zu berechnen. Ein weiterer Untersuchungsgegenstand ist der Einfluss niederfrequenter Anteile der Strukturodynamik des Maschinengestells sowie des Werkstücks bzw. der Werkstückspannung auf die Prozessstabilität bei hohen Drehzahlen und stark unterbrochenem Schnitt. Hinsichtlich der gegensätzlichen Forderungen nach Rechenzeiteffizienz und Prognosegenauigkeit erhält die Wahl eines geeigneten Berechnungsverfahrens eine hohe Bedeutung. Hierzu sollen Kenngrößen ermittelt werden, die eine Klassifizierung der Prozesse hinsichtlich der notwendigen Detailtiefe der in den Berechnungsverfahren zu berücksichtigenden Effekte erlauben.

#### **Lösungsweg**

Es existieren verschiedene zeiteffiziente analytische bzw. teilanalytische Berechnungsverfahren zur Analyse der Prozessstabilität, mit denen unter Berücksichtigung einzelner Effekte Ratterkarten berechnet werden. Diese Verfahren können angewandt und gegebenenfalls erweitert und/oder kombiniert werden. Damit können Sätze von Ratterkarten berechnet werden, die sich

unterschiedlichen Wirkmechanismen und Einflussgrößen zuordnen lassen. Mit diesen Teilratterkarten ist die Synthese einer Gesamtratterkarte möglich.

Als Referenz zur Bewertung der mit den weiterentwickelten Methoden berechneten Stabilitätsgrenzen dienen durch Simulationen im Zeitbereich ermittelte Ratterkarten.

## **Ergebnisse**

Der Schwerpunkt der ersten Projektphase lag auf der Ermittlung modenbezogener drehzahlabhängiger Ratterkarten. Der Fokus der zweiten Phase lag auf der Anwendung rechenzeiteffizienter analytischer Verfahren auf Prozesse mit stark unterbrochenem Schnitt und auf der Ermittlung der notwendigen Detailtiefe der angewendeten Berechnungsalgorithmen.

Beim Fräsen sind die - den Prozess-Maschine-Wirkungskreis beschreibenden - Bewegungsgleichungen vom Eingriffswinkel abhängig und damit zeitvariant. Dieser Effekt ist bei stark unterbrochenem Schnitt besonders stark ausgeprägt und besitzt einen Einfluss auf die Prozessstabilität. Werden die zeitabhängigen Koeffizienten der Bewegungsgleichungen durch Fourier-Reihen approximiert, ist eine rechenzeiteffiziente Behandlung des Stabilitätsproblems im Frequenzbereich aber dennoch möglich. Eine höhere Ordnung der Fourierentwicklung erhöht allerdings wiederum die benötigte Rechenzeit. Hierzu wurde ein Ansatz vorgestellt, mit dem die notwendige Fourierordnung in Abhängigkeit der Prozessparameter und der Charakteristik des dynamischen Verhaltens der Maschinenstruktur vor der eigentlichen Berechnung abgeschätzt und der Berechnungsalgorithmus dementsprechend angepasst werden kann, *Bild 1*.

Der Einfluss der Zeitvarianz der Bewegungsgleichungen auf die Stabilitätsgrenze und die Anwendbarkeit der analytischen Verfahren wurde am Beispiel des Drallwinkels von Schaftfräsern untersucht, *Bild 2*.

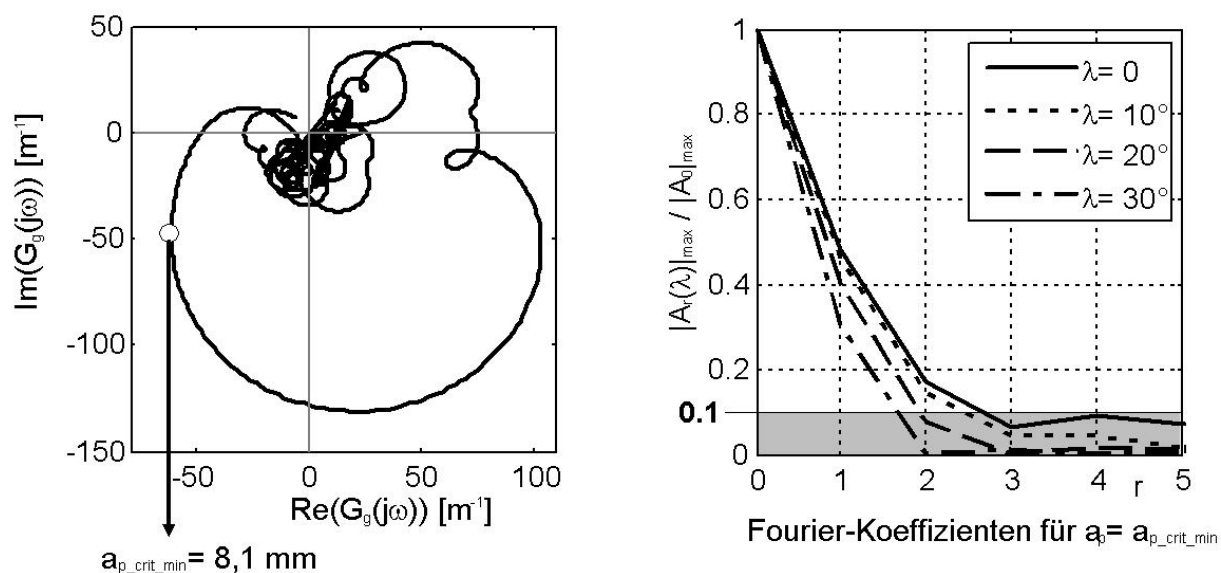


Bild 1: Ableitung der notwendigen Betrachtungstiefe des Berechnungsalgorithmus aus der Ortskurve des aufgeschnittenen Prozess-Maschine-Wirkungskreises

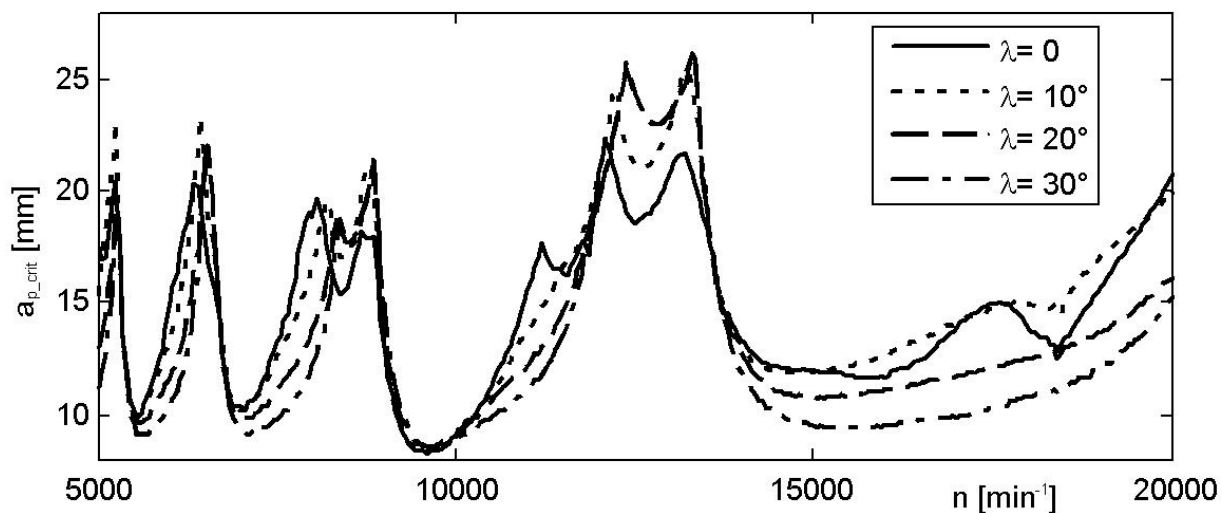


Bild 2: Berechnete Ratterkarten für Werkzeuge mit unterschiedlichen Drallwinkeln

### **4.3.6 Strukturbasierte Modellierung des für die Stabilität des Zerspanprozesses relevanten drehzahlabhängigen Übertragungsverhaltens eines Spindel/Werkzeug-Systems**

**Laufzeit** 10/2005 - 09/2007  
07/2008 - 06/2009 (1. Fortsetzung)  
07/2010 - 06/2011 (2. Fortsetzung)

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dr.-Ing. Andreas Mühl  
Dipl.-Ing. Michael Löser

#### **Zielstellung**

Das dynamische Übertragungsverhalten von rotierenden Spindel-Werkzeug-Systemen ändert sich über der Drehzahl. Dies kann einen Einfluss auf die Stabilität von Zerspanprozessen besitzen. Ziel des Projektes ist es, die Vorteile strukturbasierter und modaler Beschreibungen des dynamischen Verhaltens eines Spindel-Werkzeug-Systems zu verbinden und dabei deren Nachteile zu minimieren.

#### **Lösungsweg**

Grundlage des Vorgehens ist es, hinsichtlich der Ersatzparameter eine Separierung der Einflussgrößen vorzunehmen, welche die Drehzahlabhängigkeit verursachen. Damit wird es möglich, den Einfluss der Einzeleffekte isoliert voneinander zu untersuchen. Dies soll durch eine hybride Methode zur Ermittlung modaler Ersatzparameter erreicht werden. Grundlage ist dabei ein möglichst einfaches strukturbasiertes Modell. Für dieses Modell können Abweichungen bezüglich der Abbildung des dynamischen Übertragungsverhaltens toleriert und damit der Aufwand für Modellerstellung und Parameterabgleich verringert werden. Wichtig ist, dass das Modell die Qualität der Drehzahleinflüsse wiedergibt. Diese qualitativen (relativen) Änderungen des Übertragungsverhaltens können dann auf Ersatzparameter

übertragen werden, die aus Messungen an der realen Struktur gewonnen wurden. Hierbei reichen Messungen an wenigen Stützstellen aus. Zwischen diesen Stützstellen kann dann das drehzahlabhängige Verhalten modellgestützt interpoliert werden.

Um die Parameteridentifikation und die Untersuchungen zum Modellumfang effizient zu gestalten, wurde unter Matlab ein Script zur strukturbasierten Modellierung des Spindel-Werkzeug-Systems erstellt. Dabei wurde eine FE-Formulierung für *Timoshenko*-Balken verwendet. Für die Dämpfungsberechnung wurde ein *Rayleigh*-Ansatz zugrunde gelegt. Die Abbildung von Koppellementen, wie HSK-Schnittstelle oder Lagersteifigkeiten, erfolgt durch konzentrierte Feder-Dämpfer-Elemente. Da Torsions- und Längsschwingungen der Struktur nicht Gegenstand der Untersuchungen dieses Projektes sind, wurde der Freiheitsgrad der Knoten des Modells auf  $FG = 4$  beschränkt. Es werden nur die translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade senkrecht zur Längsachse der Spindel berücksichtigt, *Bild 1*.

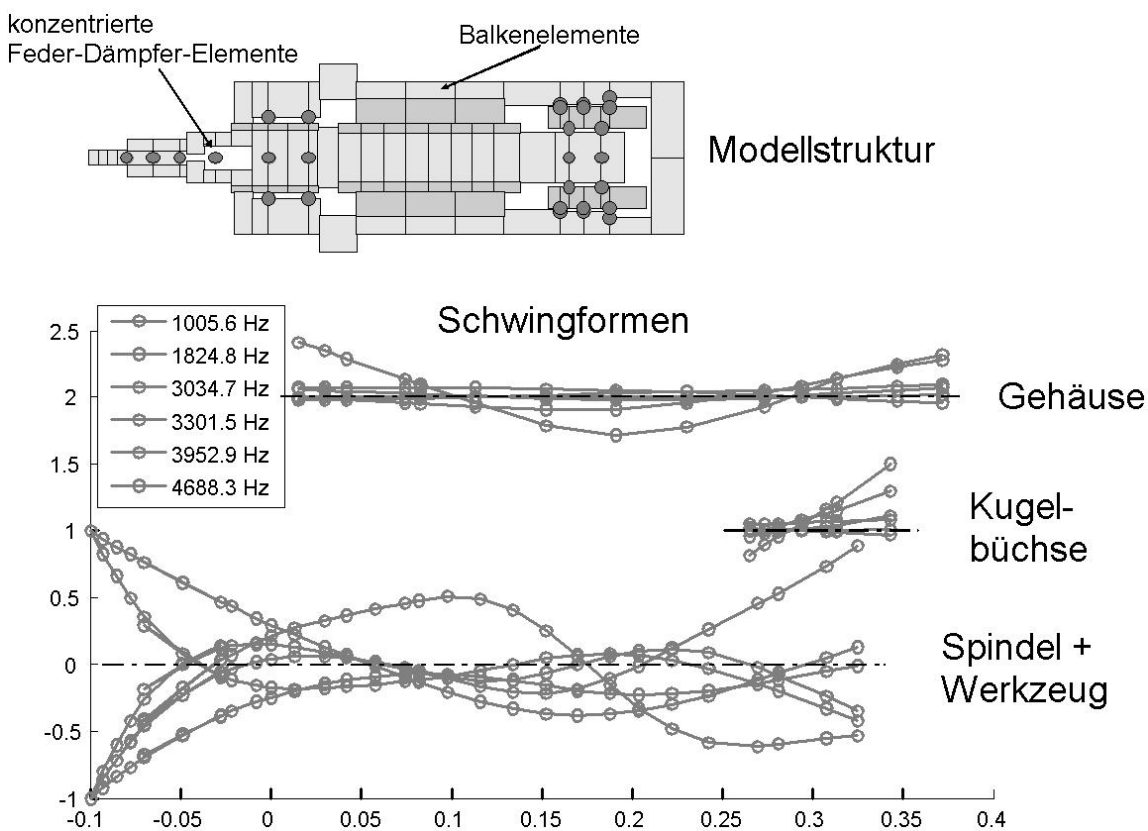


Bild 1: Visualisierung des strukturbasierten Spindelmodells unter Matlab



## Ergebnisse

Es wurde eine Ersatzbeschreibung formuliert, die durch einen zusätzlichen Parameter prinzipiell geeignet ist, drehzahlabhängige Effekte abzubilden.

Hinsichtlich des Strukturmodells konnte mit der Implementation eines Scriptes zur FE-Modellierung von Spindel-Werkzeug-Systemen unter Matlab ein wichtiger Schritt für das Erstellen eines Minimalmodells erreicht werden. Mit dieser Modellierungsumgebung wird die für simulative Untersuchungen notwendige Flexibilität erhöht, es wird die für die Rechenzeit nicht unwesentliche Problematik der Schnittstelle zu einer anderen Software umgangen und die Implementation eines Optimierungsalgorithmus erleichtert.

Mit dem entwickelten Algorithmus zur Parameteridentifikation konnten Lösungen für die problemspezifischen Schwierigkeiten - wie beispielsweise die beschränkte Datenbasis aufgrund einer schlechten messtechnischen Zugänglichkeit - gefunden werden. Dabei kann die Parameteridentifikation weitestgehend automatisiert ablaufen, ohne dass der Anwender einen zusätzlichen Aufwand, wie etwa durch das Aufbereiten von Frequenzgängen oder das Zuordnen von Eigenformen, betreiben muss.

Für die untersuchte Motorspindel wurden Parameter der drehzahlabhängigen Ersatzbeschreibung ermittelt. Gemäß dem oben beschriebenen Vorgehen wurden dabei die Ersatzparameter, welche das Wirken der gyroskopischen Effekte beschreiben, anhand von Simulationen mit dem strukturbasierten Modell des Spindel-Werkzeug-Systems ermittelt.

Im Weiteren wurden die Steifigkeits- und Dämpfungsparameter aus Messungen an diskreten Drehzahlen extrahiert, wobei die modalen Massen als über der Drehzahl konstant angenommen wurden.

Das Übertragungsverhalten bei einer Drehzahl  $n = 20.000$  U/min ist in *Bild 2* dargestellt.

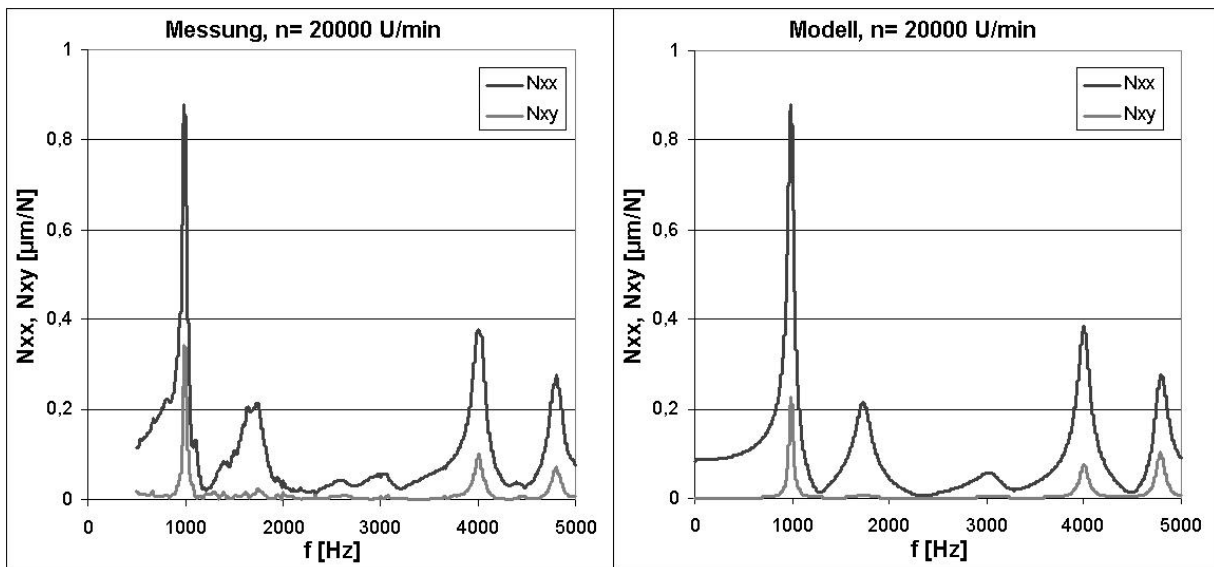


Bild 2: Vergleich des gemessenen Übertragungsverhaltens und des Übertragungsverhalten der drehzahlabhängigen Ersatzbeschreibung

### **4.3.7 Grundlagenuntersuchungen zur effizienten Dämpfungsbeschreibung und -parametrierung für die modellgestützte dynamische Strukturanalyse von Werkzeugmaschinen**

**Laufzeit** 07/2008 - 06/2010

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dipl.-Ing. Holger Rudolph

#### **Zielstellung**

Für alle Aufgaben der dynamischen Strukturanalyse an Werkzeugmaschinen, sowohl beim Entwurf als auch im Betrieb, bei denen die absoluten Amplituden der Schwingungen relevant sind, ist die "treffende" Berücksichtigung der Dämpfungskräfte von entscheidender Bedeutung. Dies trifft ganz besonders dann zu, wenn über die Schwingungseigenschaften der rein mechanischen Baugruppen hinaus das dynamische Verhalten gekoppelter Systeme interessiert, wie z. B. zur Bewertung von Bewegungssystemen oder zur Beurteilung der Zerspanungsstabilität. Daher sollen im Forschungsvorhaben zur Beschreibung strukturrelevanter Dämpfung an Verbindungs-, Lager- und Führungselementen von Werkzeugmaschinen Modellierungsansätze untersucht und weiterentwickelt, Verfahren zu Parameteridentifikation und -verifikation geschaffen sowie hinsichtlich Möglichkeiten und Grenzen bewertet werden.

#### **Lösungsweg**

Auf der Basis einer systematischen Darstellung der Dämpfungsproblematik und ihrer Ansätze zur Modellierung und Berechnung werden relativ einfache experimentelle Elementar-Strukturen verwendet, welche in gezielt kontrollierbarer Weise eine Untersuchung der Einzeleinflüsse (Einfluss der Fugenpressung, Einfluss der Vorspannklasse etc.) ermöglichen. Dabei werden parallel zu den Messungen von Nachgiebigkeitsfrequenzgängen an den Versuchsaufbauten (*Bild 1*) Modelle mit alternativen

Dämpfungsbeschreibungen erstellt, an denen Dämpfungskenngrößen für die verschiedenen Modellansätze identifiziert werden.

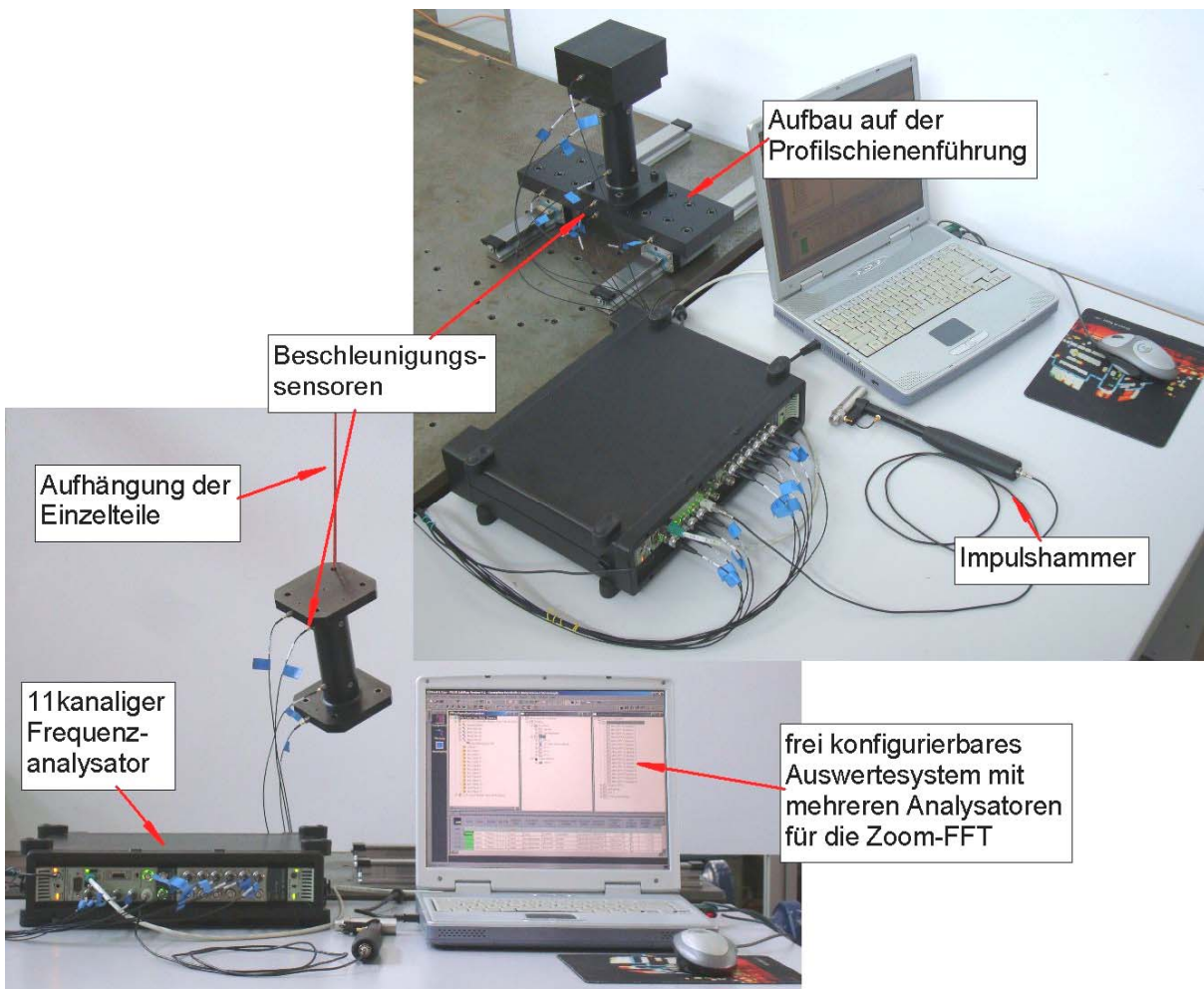


Bild 1: Experimentalaufbau zur Untersuchung von Dämpfungseinflüssen

## Ergebnisse

Die abschließenden Arbeiten befassen sich mit der systematischen Auswertung und der modellgestützten Identifikation von Dämpfungsparametern an diesen Elementar-Strukturen. *Bild 2* zeigt im Vergleich von Messung und Modell die Nachgiebigkeitsfrequenzgänge und Ortskurven für ein ausgewähltes Bauteil Schlitten. In *Bild 3* sind die Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in den drei Raumrichtungen für den kompletten Versuchsaufbau mit zwei Profilschieneiwagen (mit 13 % Vorspannung) im Vergleich von Messung und gewählten Modellansätzen dargestellt.

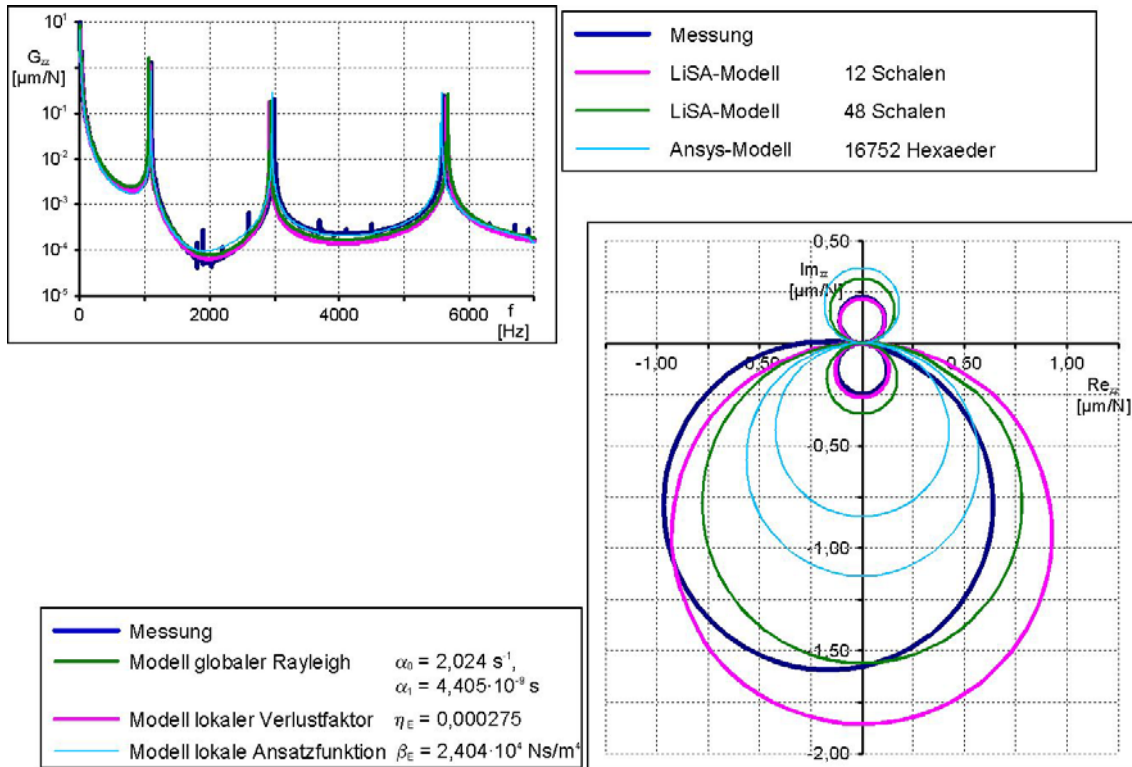


Bild 2: Nachgiebigkeitsfrequenzgänge für die benutzten Modelle (links oben) und Ortskurven in Abhängigkeit der verwendeten Dämpfungsansätze (rechts unten) im Vergleich zur Messung

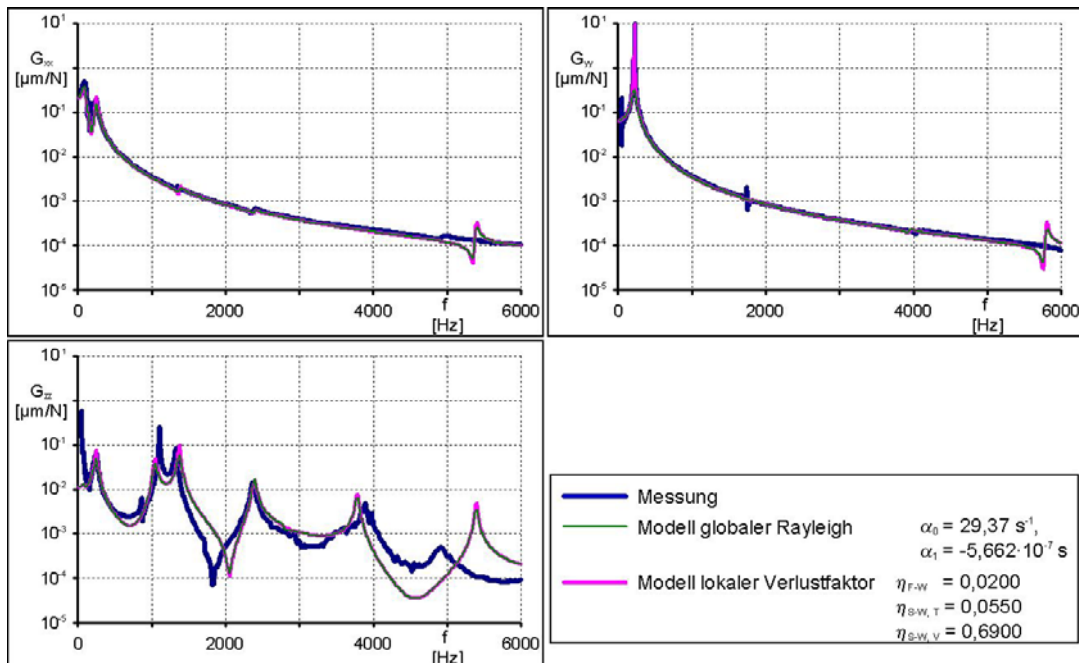


Bild 3: Nachgiebigkeitsfrequenzgänge für die benutzten Modellansätze im Vergleich zur Messung für die Vorspannklasse 13 %

### **4.3.8 Grundlagenuntersuchungen zur effizienten Dämpfungsbeschreibung und -parametrierung für elementare werkzeugmaschinentypische Körper und Kopplungselemente**

#### **Teilprojekt 1 in FOR 1087**

#### **Dämpfungseffekte in Werkzeugmaschinen**

<b>Laufzeit</b>	01/2010 - 12/2013
<b>Finanzierung</b>	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
<b>Bearbeiter</b>	Dipl.-Ing. Holger Rudolph Dr. rer.nat. Hannes Weishart
<b>Kooperation</b>	RWTH Aachen, WZL TU München, iwb

#### **Zielstellung**

Bei der Gestaltung von Werkzeugmaschinenbaugruppen ist die simulationsgestützte Bestimmung des strukturdynamischen und statischen Verhaltens von großer Bedeutung. Eine Simulation kann aber nur dann das tatsächliche Verhalten ausreichend gut beschreiben, wenn auch die Dämpfungswirkungen "treffend" berücksichtigt werden.

Das Ziel der gesamten Forschergruppe ist es, systematische Grundlagen zu schaffen, um das dynamische Verhalten von Werkzeugmaschinen wesentlich genauer und gesicherter vorherbestimmen zu können, als dies nach dem Stand der Technik bisher möglich ist. Während Eigenfrequenzen und Schwingungsformen einer Werkzeugmaschine bereits heute gut vorhergesagt werden können, ist eine Prognose des Dämpfungsverhaltens und damit der dynamischen Nachgiebigkeiten nicht ausreichend möglich.

Das Teilprojekt 1 konzentriert sich auf die Grundlagenuntersuchungen zur Dämpfungsbeschreibung und -parametrierung für elementare werkzeugmaschinentypische Körper sowie für Kopplungselemente, die diese Körper im Montagezustand mitein-



ander verknüpfen. Damit liefert das Teilprojekt 1 Modellierungs- und Parametrierungstechnologien zur Beschreibung von Dämpfungseffekten für die anderen Teilprojekte der Forschergruppe.

## Lösungsweg

Auf elementarer Ebene betrachtet sind in Werkzeugmaschinen mehrere homogene Körper oder als homogen idealisierbare Körper mittels Kontaktelementen gekoppelt. Auf dieser elementaren Grundlagenebene sollen im Teilprojekt Dämpfungsbeschreibungen für typische

- homogene und homogenisierbare Körper (z. B. Spindelkörper, Motorläufer, Wälzlagerringe, Gestellbauteile, Werkzeug-Futter) sowie
- Kontaktelemente (z. B. Passungen, Verschraubungen)

theoretisch und experimentell begründet gefunden werden.

Am Beispiel einer in Hauptspindeln typischen Kopplung des homogenen Spindelkörpers mit dem homogenisierbaren Läufer eines Hohlwellenmotors durch das Kontaktelement Stufenpressverband zeigt *Bild 1* die grundsätzliche Lösungsidee:

- In einem ersten Schritt werden auf der Teilstruktur-/Element-Ebene FE-Modelle dieser homogenen oder homogenisierbaren Körper generiert. Die Dämpfungsbeschreibung erfolgt dabei alternativ nach mehreren Ansätzen. Die Referenz zur Bestimmung der Parameter der alternativen Dämpfungsansätze sind Messdaten, die aus experimentellen Modalanalysen der isolierten Struktur gewonnen werden.
- In einem zweiten Schritt erfolgt die Verknüpfung der gültigen Systemmatrizen jeweils zweier Teilstrukturen. Hier werden sowohl mehrere Modellierungsansätze zur Beschreibung der Steifigkeit des Kontaktes als auch mehrere zugeordnete Dämpfungsansätze als Alternativen untersucht. Eine experimentelle Modalanalyse am realen, montierten System und entsprechende Parameter-Identifikationen liefern wiederum Aussagen zur Beschreibungsgüte der jeweiligen Ansätze.

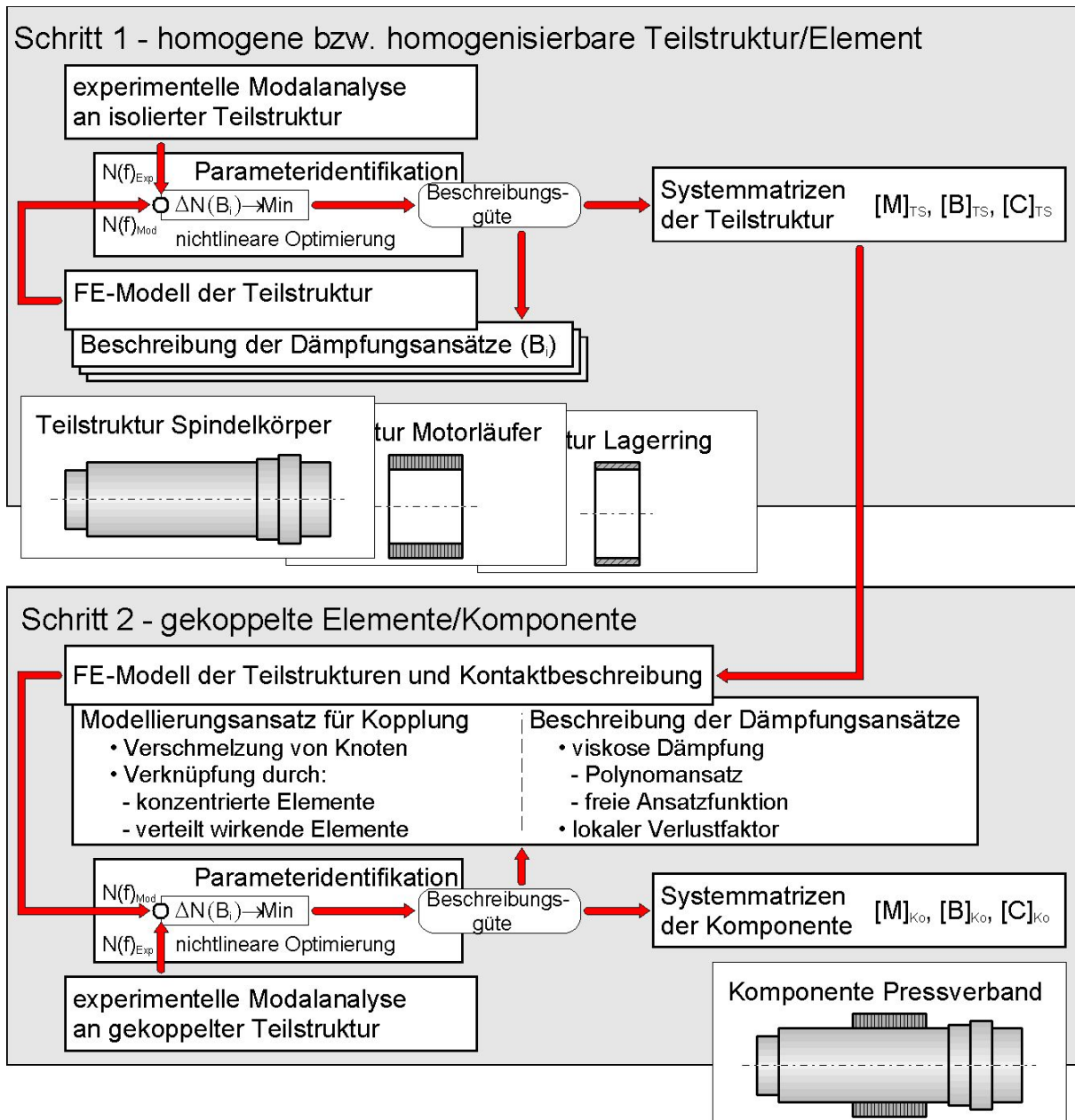


Bild 1: Lösungsidee zur schrittweisen Parameterermittlung

## Ergebnisse

Die gegenwärtigen Arbeiten befassen sich mit dem Aufbau der experimentellen Elementarstrukturen für ein Hauptspindel-system, der Konfiguration und Applikation der messtechnischen Ausstattung für die experimentellen Untersuchungen und der sukzessiven Durchführung von Experimenten und Parameter-identifikation an diesen Strukturen. *Bild 2* zeigt hierzu erste Ergebnisse für die Dämpfung an einer Spindelkörper-Lagerring-Verbindung im Vergleich von Messung und ausgewählten Modellierungsansätzen.

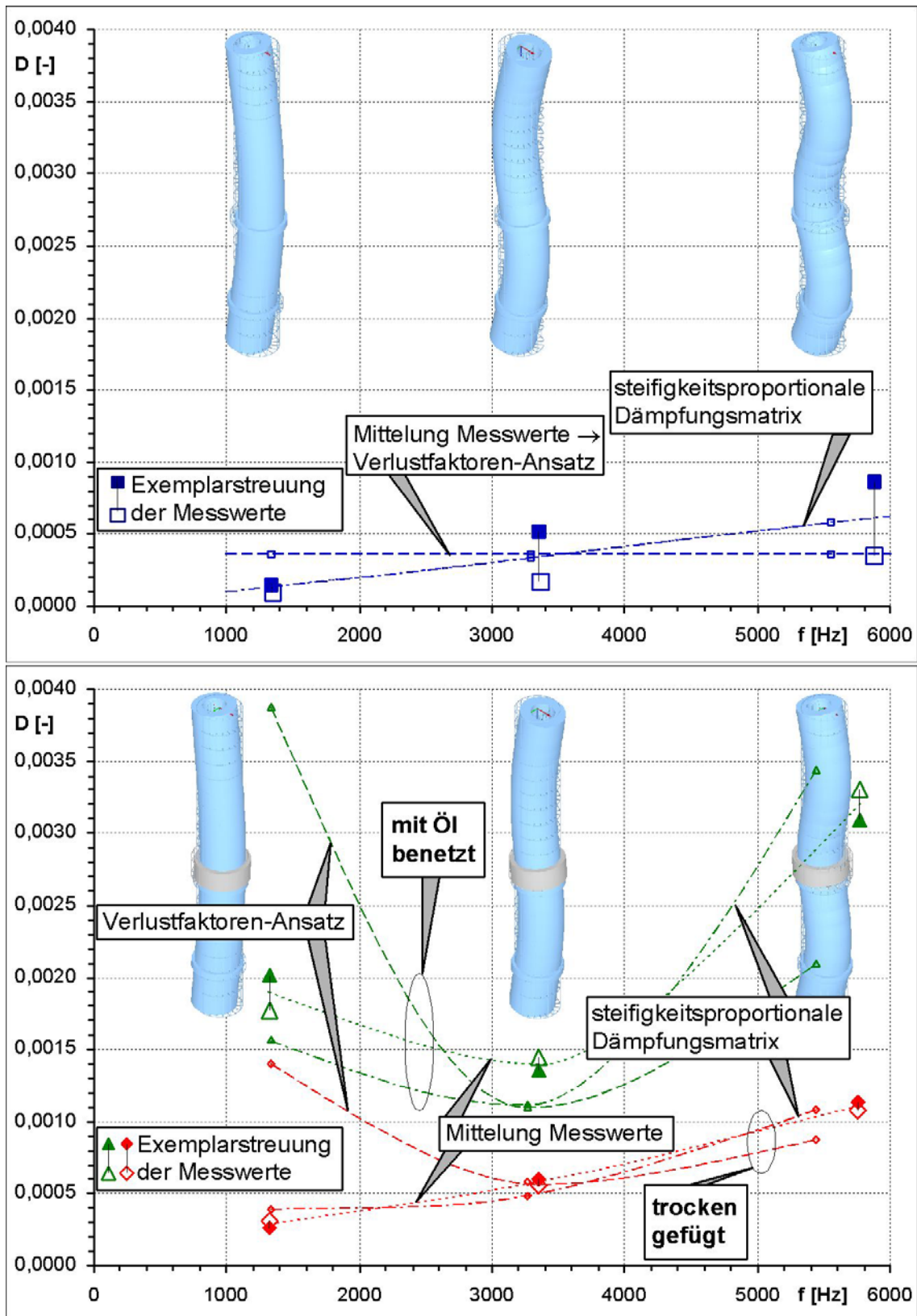


Bild 2: Vergleich der gemessenen Dämpfungsmaße mit den Ergebnissen alternativer Modellansätze – Spindelkörper ohne (oben) bzw. mit Lagerring für zwei unterschiedliche Befetzungszustände des Pressverbandes (unten)

### **4.3.9 Entwicklung, Anwendung und Bewertung von Simulationstechnologien für die aktive virtuelle Werkzeugmaschine**

**Laufzeit** 04/2004 - 03/2006  
04/2007 - 03/2009 (Fortsetzung)

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dipl.-Ing. Holger Rudolph

#### **Zielstellung**

Für die Analyse, Bewertung und Optimierung des Maschinenentwurfs in einem Simulationsmodell ist es erforderlich, die einzelnen, in sich zumeist linearelastischen, Baugruppen unter der Wirkung der Antriebe und des eigentlichen Fertigungsprozesses relativ zueinander bewegen zu können. Diese Relativbewegungen führen zu einer strukturellen Veränderung der gesamten Maschine. Im Forschungsprojekt sollen die Simulationstechnologien aus dem Vorgängerprojekt weiterentwickelt und angewandt werden, um veränderliche Maschinenstrukturen mit großen räumlichen Schwenkbewegungen einer Modellierung und numerischen Lösung zuzuführen. Hierzu sollen die Modellgrundlagen für die Simulation kontinuierlicher Bauteilbewegungen an elastischen, strukturvariablen Modellen erweitert und in einem ausgewählten Softwaresystem umgesetzt werden.

#### **Lösungsweg**

Für die gemäß der Zielstellung erforderliche räumliche Beweglichkeit von Werkzeugmaschinen-Baugruppen wird die Modellfunktionalität für elastische Körper (abgebildet durch ein modal reduziertes Ersatzsystem) mit den aus der Starrkörpermechanik bekannten Berechnungsgrundlagen in einer Modellsynthese verknüpft. Um die Relativbewegungen zwischen den Baugruppen - wie sie insbesondere an Linearführungen auftreten - simulieren zu können, wird die Interaktion zwischen den diskreten, jeweils korrespondierenden Strukturkoordinaten durch einen gleitenden Übergang modelliert.

Bild 1 zeigt dazu die wesentlichen Modellkomponenten einer Hexapod-Bewegungseinrichtung zur Simulation als mechatronisches Gesamtsystem.

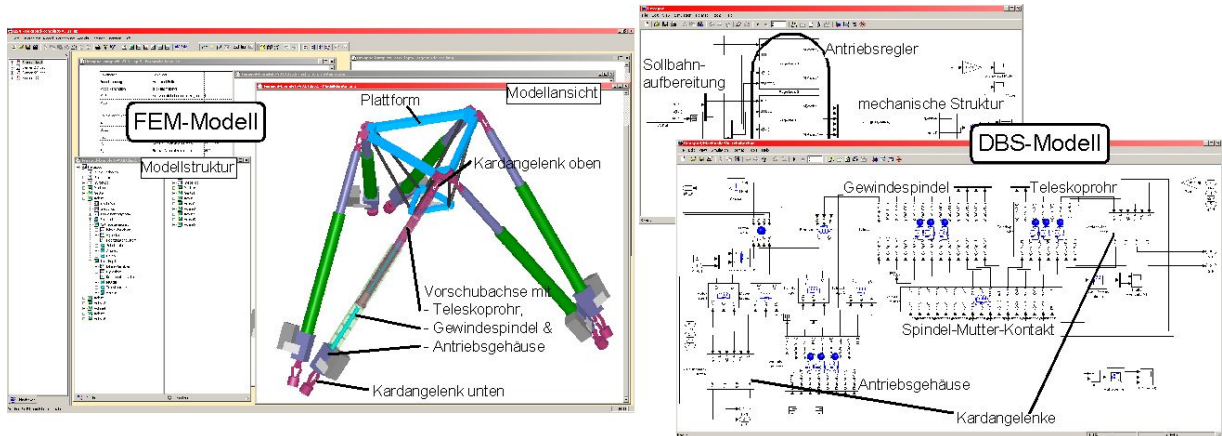


Bild 1: Simulationsmodelle des Hexapoden in FEM und DBS

## Ergebnisse

Die abschließenden Arbeiten befassen sich mit dem Aufbau und der Verifikation von komplexen Maschinenmodellen und der vergleichenden Simulation von Bewegungsvorgängen. Bild 2 zeigt hierzu ausgewählte Ergebnisse der dynamischen Strukturantworten bei definierten Bahnfahrten unter MATLAB/Simulink.

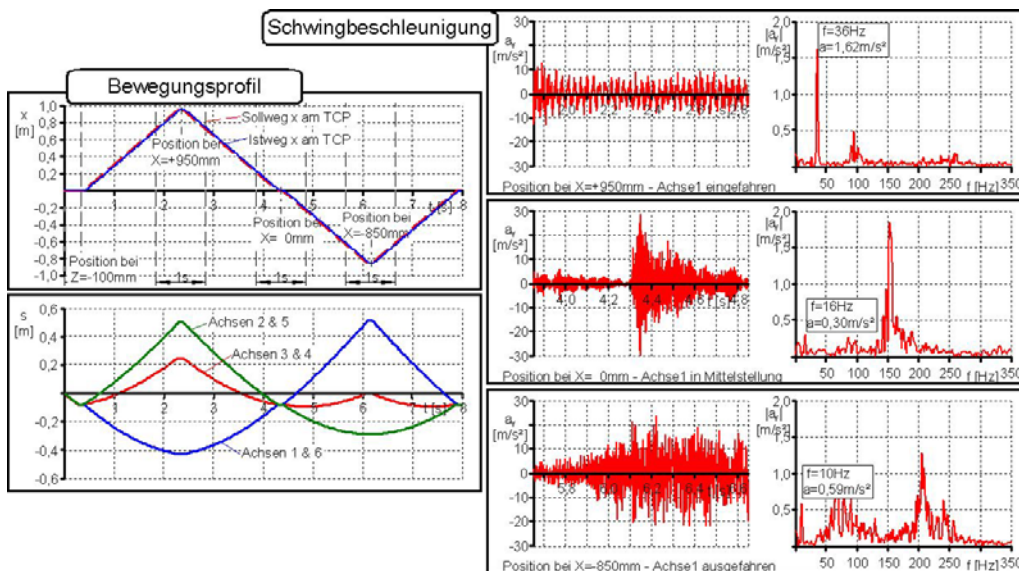


Bild 2: Bewegungsprofil des TCP und der Vorschubachsen sowie Zeitverlauf und Amplitudenspektrum der Schwingbeschleunigung an einer Achse während dieser Bahnfahrt

### **4.3.10 Dynamische Maschinenuntersuchung mittels Experimenteller Modalanalyse**

**Laufzeit** laufend

**Finanzierung** Industrie

**Bearbeiter** Dr.-Ing. Andreas Mühl  
Dipl.-Ing. Michael Löser

#### **Zielstellung**

Das IWM misst und visualisiert im Industriebauftrag an spannenden und umformenden Werkzeugmaschinen sowie an sonstigen dynamisch belasteten Maschinen, Anlagen und Gehäusestrukturen deren Eigenfrequenzen, zugehörige Eigenschwingungsformen sowie Betriebsschwingungsformen, letztere bei Erregung der Maschine durch den Prozess selbst. Zum Analyseumfang gehören, je nach konkreter Aufgabenstellung, die Herstellung kausaler Zusammenhänge zwischen den ggf. auftretenden Fehlern am Werkstück sowie den Begrenzungen der Dynamik in den Bewegungsvorgaben der Maschine einerseits und den gemessenen Eigen- und Betriebsschwingungsformen andererseits. Je nach konkreter Aufgabenstellung werden auf Basis dieser Messungen und Visualisierungen z. B.

- das dynamische Verhalten von Gestell-, Antriebs- und Führungsstrukturen bewertet und Vorschläge zu deren Verbesserung aus strukturdynamischer Sicht erarbeitet,
- dynamisch kritische Komponenten wie z .B. Bestandteile von Getriebezügen während des Betriebes der Maschine oder Anlage identifiziert, deren Verhalten diagnostiziert und Vorschläge zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens erarbeitet.

#### **Lösungsweg**

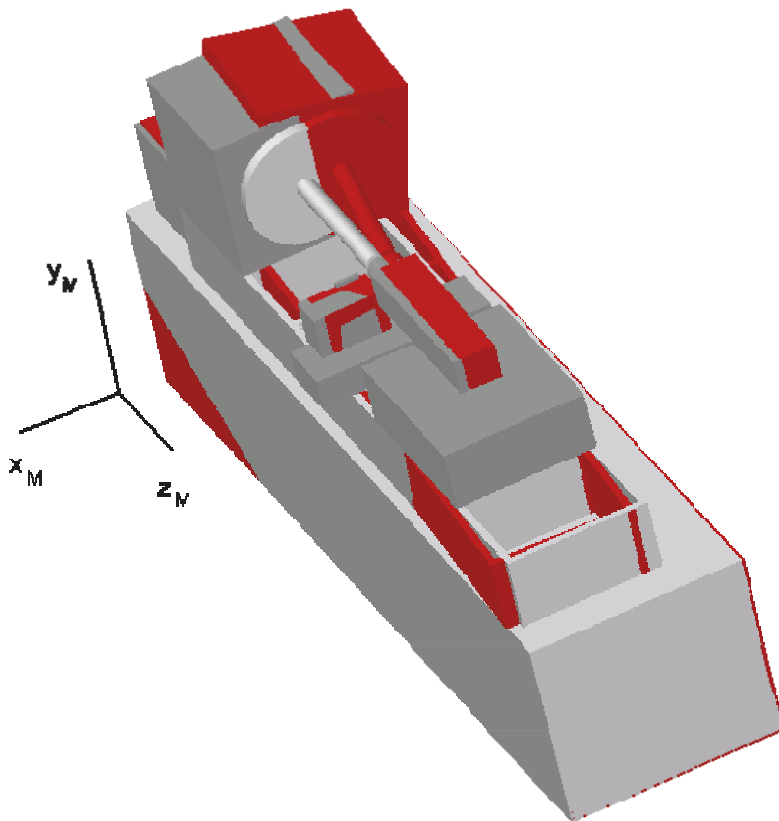
Aufgabenstellungen dieser Art werden mittels experimenteller Modalanalyse und zugehöriger Auswertungen gelöst. Experimentelle Modalanalysen gehören zu den Standard-Aufgabenstellungen am IWM und werden mit entsprechend verfügbarer



Erregungs-, Mess- und Signalverarbeitungstechnik sowie gestützt auf langjährige Erfahrung durchgeführt.

## Ergebnisse

Das *Bild* zeigt eine gemessene und anschließend visualisierte Eigenschwingungsform einer Großdrehmaschine.



*Beispiel einer visualisierten Eigenschwingungsform einer Großdrehmaschine*

### **4.3.11 Abbildung des Umgebungseinflusses in der thermischen Simulation und für die Kompensation thermisch bedingter Wirkpunktabweichungen an Werkzeugmaschinen**

**Laufzeit** 10/2007 - 09/2009

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dr.-Ing. Günter Jungnickel  
Dipl.-Ing. Steffen Rehn

#### **Zielstellung**

Thermische Einflüsse aus der Umgebung, insbesondere in unklimateisierten Werkhallen, führen an Großwerkzeugmaschinen zu relevanten Wirkpunktabweichungen. Bei der Kompensation dieser thermisch bedingten Abweichungen konnte bisher von den Umgebungseigenschaften nur die Lufttemperatur berücksichtigt werden. Die Veränderlichkeit der Strömungsverhältnisse und der Strahlungsumgebung werden nicht erfasst. Ziel des Projektes ist, die Eignung von Wärmestromsensoren zur umfassenden Abbildung des Umgebungseinflusses für die prozessparallele thermische Simulation und Kompensation im Hinblick auf den industriellen Einsatz zu untersuchen.

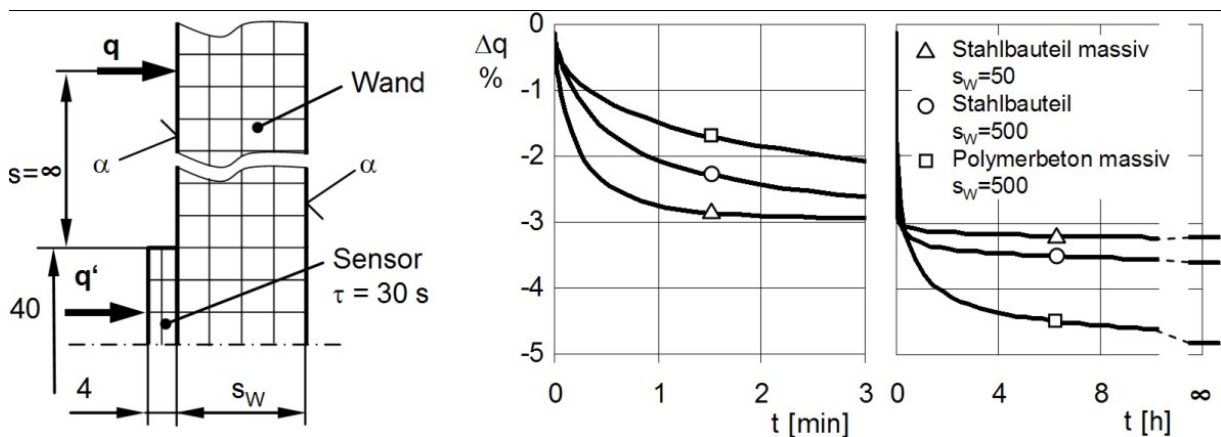
#### **Lösungsweg**

Zunächst erfolgt eine simulationsgestützte Untersuchung von Fehlereinflüssen bei der Wärmestrommessung an Gestellbauteilen von Werkzeugmaschinen. Danach wird die Wärmestrommessung an einem Versuchsstand mit gut beschreibbaren Umgebungseinflüssen getestet. Als Voraussetzung dazu werden Messketten für Wärmeflussmessungen aufgebaut und die Wärmestromsensoren temperatur- und wärmestromabhängig kalibriert. Im Anschluss an den Test erfolgt der Nachweis der verbesserten Umgebungsbeschreibung mittels gemessener Wärmestromwerte. Dabei werden experimentelle Untersuchungen an Gestellbauteilen bei variablen Umgebungsbedingungen durch-

geführt und über die thermische Simulation bei unterschiedlicher Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen ausgewertet.

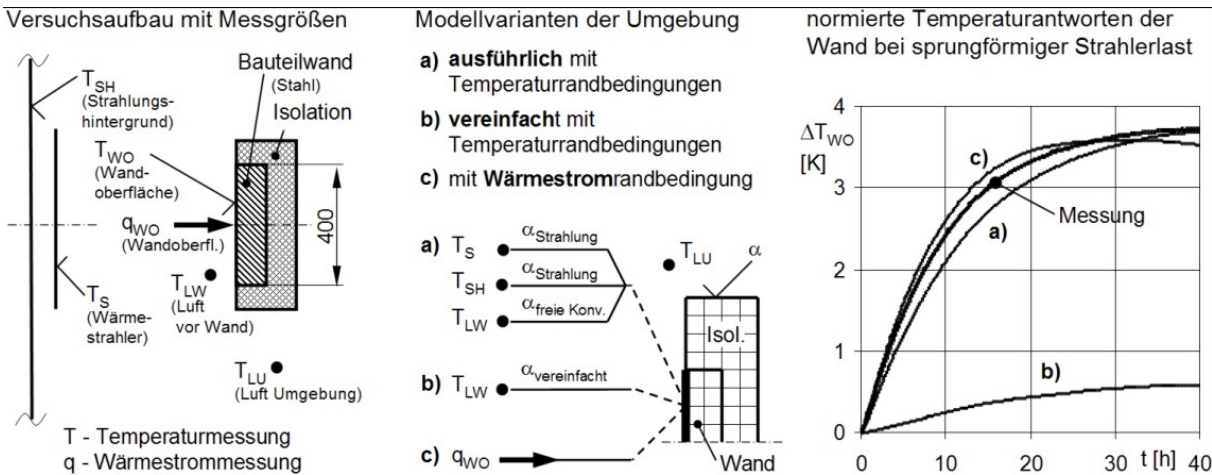
## Ergebnisse

Die flächigen Wärmestromsensoren werden auf der Bauteiloberfläche appliziert. Sie erhalten durch eine gleiche Lackierung die Strahlungseigenschaften der Bauteiloberfläche und nehmen wie diese die ausgetauschte Strahlungswärme mit den im Gesichtsfeld der Fläche liegenden Strahlern auf. Gleichzeitig wirkt auch der konvektive Wärmestrom unter den konkreten Strömungsverhältnissen durch freie und erzwungene Konvektion an der Bauteilwand. Damit werden alle thermisch relevanten Veränderungen in der Umgebung erfasst.



*Bild 1: Behinderung des Wärmestroms durch den Sensor bei sprungförmiger Erhöhung der Lufttemperatur auf der Sensorseite einer Bauteilwand*

Der Wärmestromsensor beeinträchtigt das Wärmestromfeld normal zur Oberfläche, denn er stellt einen zusätzlichen Wärmewiderstand dar. Der Sensor behindert damit den Wärmefluss durch die Wand mit der Wärmestromdichte  $q$ . Es fließt eine gegenüber der Wand verringerte Wärmestromdichte  $q'$  durch den Sensor. Zur Abschätzung des resultierenden Messfehlers wurden simulationsgestützte Untersuchungen bei Variation der Geometrie und der Materialeigenschaften von Bauteilwand und Sensor im praktisch relevanten Bereich durchgeführt (*Bild 1*). Der resultierende Messfehler liegt dabei vorwiegend im unteren einstelligen Prozentbereich.



*Bild 2: Experimentelle Untersuchung der Wärmestrommessung zur Umgebungsbeschreibung mit Auswertung über vergleichende Simulationsrechnungen*

Die Wärmestrommessung wurde mit experimentellen Untersuchungen an einer einfachen Stahlplatte als Bauteilwand in einer definierten gut beschreibbaren Umgebung getestet (Bild 2). Die Bauteilwand wurde mit typischen Umgebungslasten in Form von Konvektion und Wärmestrahlung beaufschlagt. Zum Abschluss erfolgte der Nachweis der Eignung von Wärmestromsensoren zur Abbildung des Umgebungseinflusses bei Werkzeugmaschinen an einem Standerbauteil in einer typischen Hallenumgebung.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass durch die Verwendung gemessener Wärmeströme bei der Beschreibung von hohen und komplex wirkenden Umgebungslasten ein deutlicher Genauigkeitsgewinn gegenüber der bisherigen vereinfachten Beschreibungsform mit Temperaturrandbedingung erzielt werden kann.

So konnten die bei der Beschreibung von hohen Umgebungslasten bisher verbleibenden großen Restfehler im Temperaturfeld um über 50 % verringert werden. Bei niedrigen thermischen Lasten mit weitgehend ausgeglichenen Umgebungstemperaturen ist das bisher genutzte vereinfachte Modell zur Umgebungsbeschreibung gültig und den anderen Beschreibungsformen weitgehend ebenbürtig.

### **4.3.12 Experimenteller Abgleich und Verifizierung des simulativ ermittelten Aufteilungsverhältnisses der Zerspanungsleistung in Span, Werkstück und Werkzeug**

**Laufzeit** 04/2007 - 03/2009  
10/2009 - 09/2011 (Fortsetzung)

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dipl.-Ing. Christian Städel

#### **Zielstellung**

Der Fertigungsprozess stellt im System Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück die größte Wärmequelle dar. Die Prozesswärme und die Fertigungsbedingungen beeinflussen damit wesentlich das thermische Verhalten der Werkzeugmaschine. Bei der Simulation des thermischen Verhaltens konnten diese Bedingungen bisher nur ungenügend berücksichtigt werden. Es wurden bereits parameterabhängige thermische Modelle für die Beschreibung des Fertigungsprozesses bei der Simulation spanender Werkzeugmaschinen erstellt. Diese Modelle liefern die Größe der an der Wirkstelle dissipierten Verlustleistungen und deren Aufteilung in Wärmeströme in Werkstück, Werkzeug und Span. Diese bisher nur simulativ erarbeiteten Modellobjekte sollen experimentell abgeglichen und verifiziert werden.

#### **Lösungsweg**

Mittels Drehbearbeitung werden Versuche an wesentlichen Punkten des Zerspanungs-Parameterfeldes durchgeführt. Die dabei gemessenen Temperaturen dienen dem Abgleich von Parametern der Verlustleistungs- und Wärmestromaufteilungsgleichungen. Mit den korrigierten Simulationsmodellen wird das Aufteilungsverhältnis über die praktisch begrenzten Bereiche der wesentlichen Parameter ermittelt. Durch regressive Auswertung erfolgt abschließend die Anpassung der dimensionslosen Größengleichungen der Modellobjekte. Es wurde unter Beachtung einer Vielzahl von Parametern eine Versuchsplanung

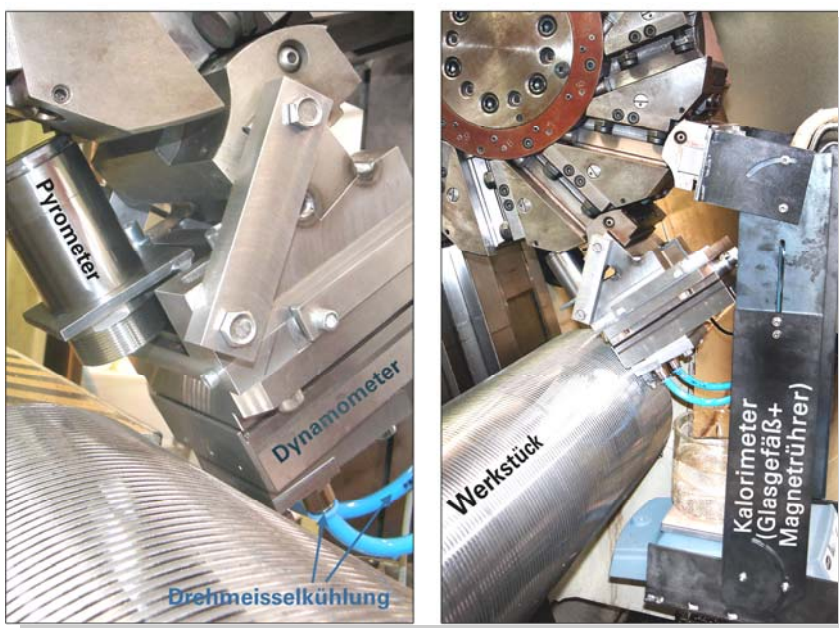
erstellt, die 30 Versuche beinhaltet. Der Einfluss folgender Parameter wird untersucht:

- Schnittgeschwindigkeit  $v_c$
- Spannungsbreite  $b$
- Verschleißmarkenbreite  $VB$
- Wärmeleitfähigkeit des Schneidstoffes  $\lambda_{Schneid}$
- Gesamtleitwert des Drehmeißels zur Umgebung  $L_{Wkzg-U}$

Die messtechnische Erfassung der Wärmeströme geschieht am Werkzeug mittels eingebrachter Thermolemente und am Werkstück durch berührungslose pyrometrische Messung. Die Messung des Wärmestromanteils im Span geschieht unter Nutzung der Kalorimetrie. Zusätzlich werden die entstehenden Zerspankkräfte mittels Dynamometer erfasst, um eine Überbestimmung der Messung zu erzielen. Es ist weiterhin zu erwähnen, dass in diesem Stadium lediglich der ungebundene Orthogonalschnitt untersucht wird. Der Versuchsaufbau wurde bereits entwickelt und in eine CNC-Drehmaschine implementiert.

## Ergebnisse

Durchführung u. Auswertung d. Versuche erfolgen im Jahr 2011.



*Versuchsaufbau zur messtechnischen Erfassung der Wärmestromaufteilung beim Spanen*



### **4.3.13 Kondensation und Freiheitsgrad-Reduktion für thermo-elastische Modelle von Gestellstrukturbauteilen an Werkzeugmaschinen**

**Laufzeit** 03/2010 - 02/2012

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dipl.-Math. Alexander Galant

#### **Zielstellung**

Thermo-elastische Verformungen von spanenden Werkzeugmaschinen (WZM) verursachen einen bedeutenden Teil des Bearbeitungsfehlers am Werkstück. Der Berechnung dieser Verformungen kommt daher im Entwicklungsprozess von WZM eine große Bedeutung zu.

Bei thermo-elastischen FE-Modellierungen großer Strukturen entstehen komplexe, rechenintensive Modelle. Die Verringerung der Rechenzeit ist essentiell für die Designoptimierung sowie für die steuerungintegrierte Korrektur thermischen Verformungen.

Im Forschungsprojekt sollen die Grundlagen geschaffen werden, um durch Anwendung von bekannten und notwendigerweise modifizierten mathematischen Methoden zur Modellordnungsreduktion (MOR) kompakte, strukturerhaltende, untereinander koppelbare thermo-elastische Modelle von Gestellstrukturbauteilen zu erstellen. Das Verfahren soll dabei direkt auf den CAD-FEM-Prozess aufsetzen. Erste Arbeiten zur Kopplung der reduzierten Modelle sind am Ende der Projektlaufzeit geplant.

#### **Lösungsweg**

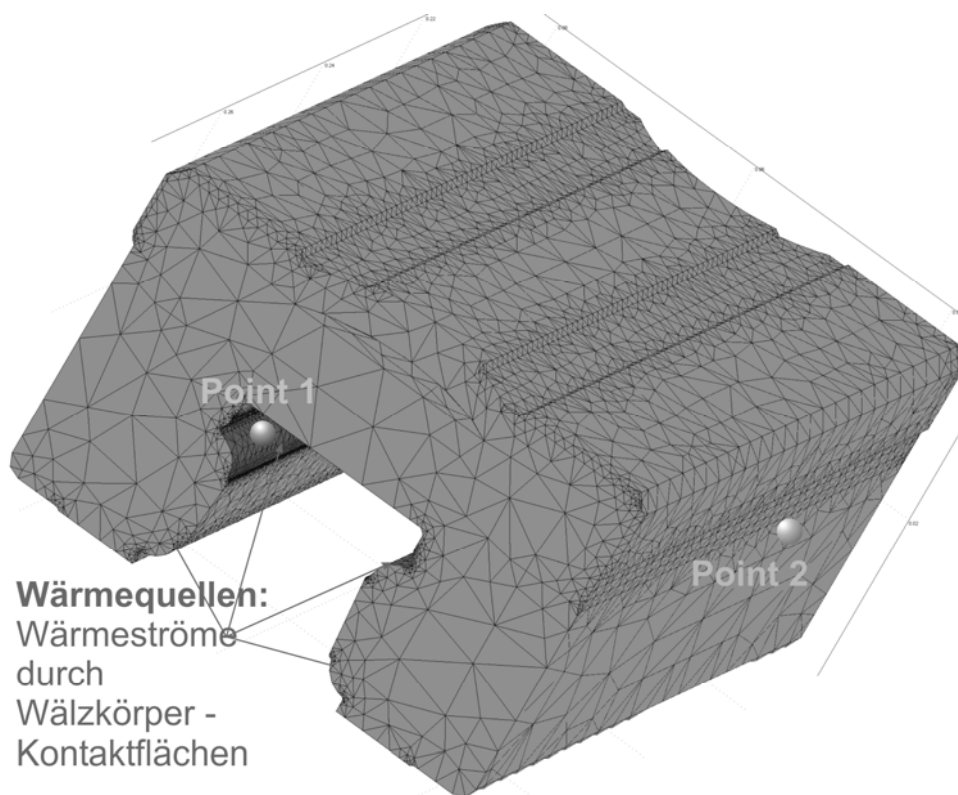
Gemäß der Zielstellung des Projektes wurden im ersten Schritt Recherche und Weiterentwicklung zu mehreren mathematischen MOR-Verfahren (Guyan-Methode, Modale Reduktion, Krylov-Methoden) unter dem Aspekt der Anwendbarkeit für thermo-elastische FE-Modelle von WZM-Komponenten durchgeführt. Die Verfahren wurden in der Matlab-Umgebung implementiert und anhand der Abbildungsgüte sowohl des stationären und

transienten Verhaltens als auch der Übertragungsfunktionen miteinander verglichen. Dabei wurde die Reduktion zunächst auf 2D-Modelle angewandt.

Im zweiten Schritt wurde ein Werkzeug geschaffen, das einen direkten Import sowohl von 2D- als auch 3D-FE-Modellen aus der Ansys-Umgebung in die Matlab-Umgebung ermöglicht. Es wurden kompakte, strukturerhaltende Modelle von 3D-WZM-Komponenten erstellt und dabei weitere Aussagen zur erreichbaren Abbildungsgenauigkeit des transienten und des Beharrungsverhaltens von reduzierten Modellen gewonnen.

## Ergebnisse

*Bild 2* zeigt den Vergleich zwischen einem nicht-reduzierten FE-Modell eines Führungswagens nach *Bild 1* mit ca. 65.000 Freiheitsgraden und dem reduzierten Modell mit 30 Freiheitsgraden. Der Vergleich erfolgte an zwei Referenzpunkten sowohl im Zeit- als auch im Bildbereich.



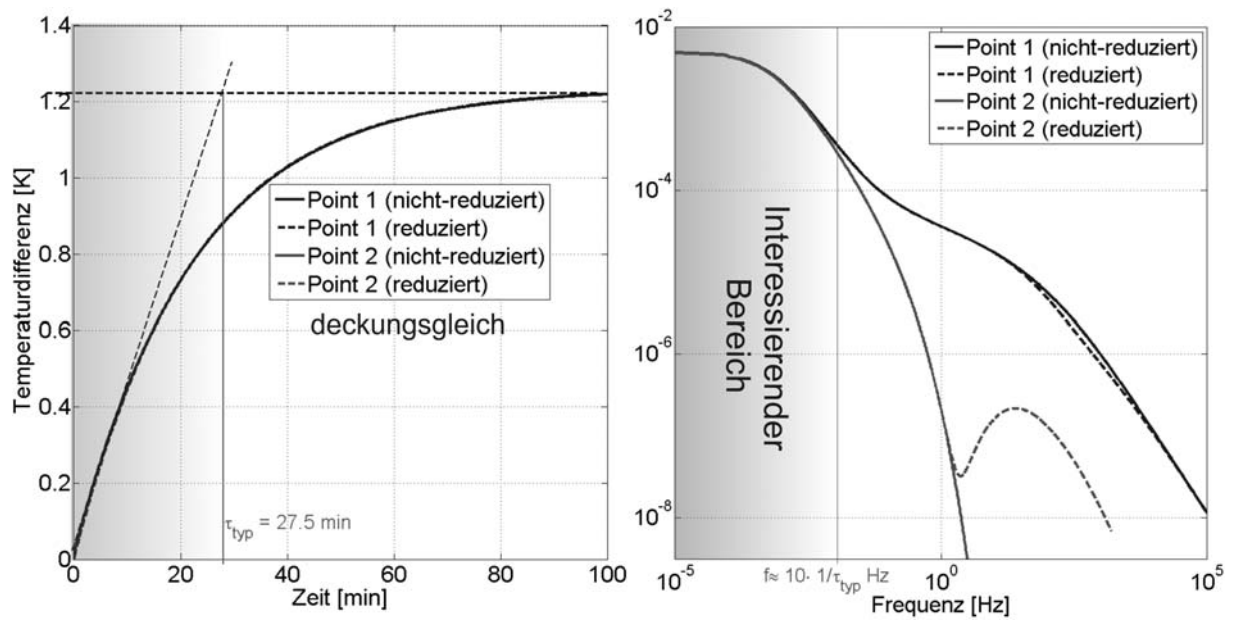


Bild 2: Vergleich des transienten Verhaltens (links) und der Übertragungsfunktionen (rechts) zwischen ANSYS-Modell (ca. 65.000 DOF) und reduziertem Modell (30 DOF)

### **4.3.14 Thermo-elastisches FE-Modell eines 5-Achs-Bearbeitungszentrums**

**Laufzeit** 02/2010 - 10/2010

**Finanzierung** Industrie über GWT-TUD GmbH

**Bearbeiter** Dr.-Ing. Andreas Mühl  
Dipl.-Ing. Christian Städel

#### **Zielstellung**

Für ein Bearbeitungszentrum ist eine Analyse der Wärmequellen in der Maschine und der dadurch bedingten thermischen Verlagerungen durchzuführen. Ziel ist es, ein für die Maschinensteuerung zu handhabendes Korrelationsmodell zu generieren, welches aus gemessenen Temperaturen an der realen Maschine thermisch bedingte Verlagerungen der Wirkstelle berechnet und die entsprechenden Achssollwerte entgegengerichtet korrigiert. Dabei sind auch die Ergebnisse messtechnischer Untersuchungen zu berücksichtigen.

#### **Lösungsweg**

Zur Verwirklichung des genannten Ziels wurden durch den Projektpartner verschiedene Versuche durchgeführt, die thermische Belastungen in den Einzelachsen als auch kombinierte Lastfälle mit Wechsel der Umgebungsbedingungen beinhalteten. Durch das IWM wurde ein FE-Modell mittels der Software ANSYS® erstellt, das mit den Ergebnissen dieser Versuche bezüglich Temperaturen und Verlagerungen abgeglichen wurde. Dabei umfasst das FE-Modell:

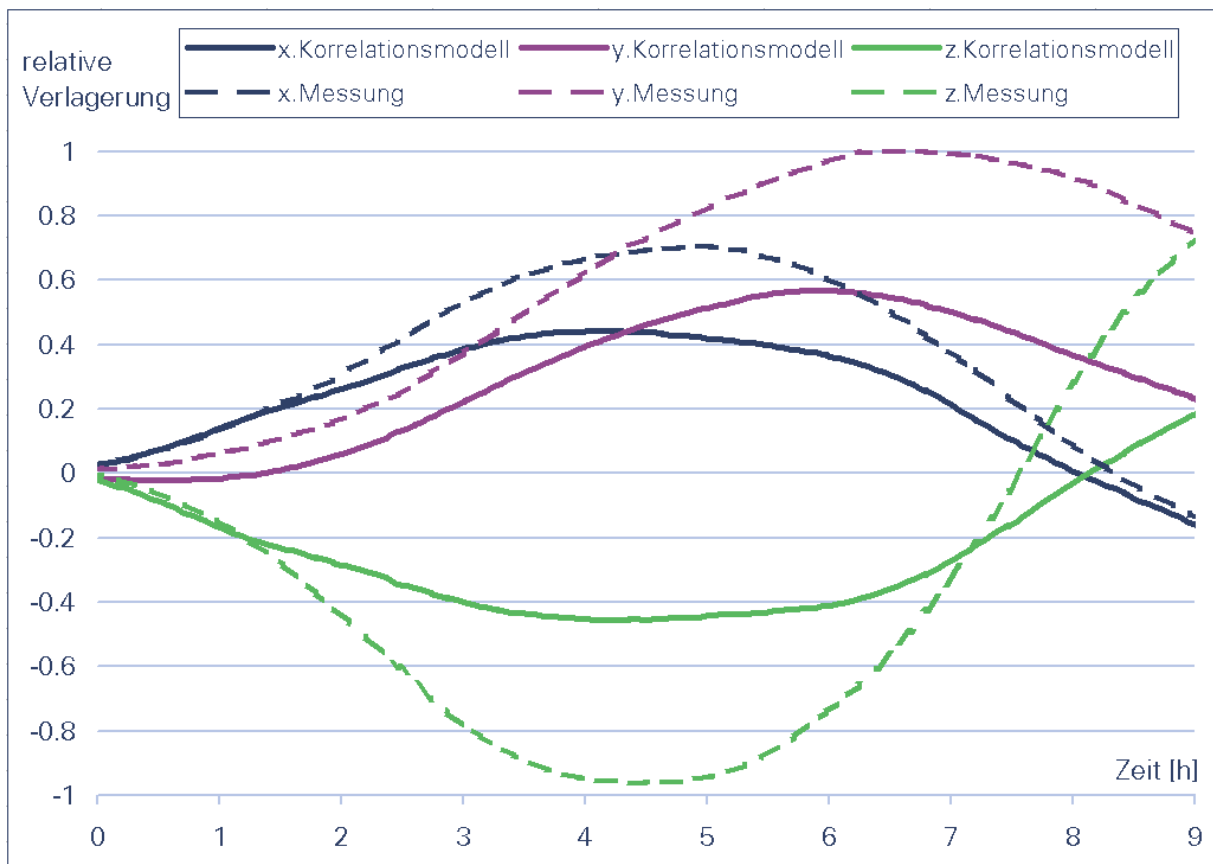
- die thermischen Lasten (Wärmequellen: Motoren, Führungs- und Lagerungselemente, in denen Wärme aufgrund von Reibung entsteht),
- die Materialparameter der einzelnen Baugruppen,
- die Wärmeabgabe an die Umgebung,
- die Wärmeabgabe an innere Wärmekapazitäten sowie
- die Wärmeabgabe an die Kühl- und Kühlschmierkreisläufe der Maschinen.

Neben der Tatsache, dass mit diesem Modell Temperaturfelder und Verlagerungen in der Struktur berechnet und sichtbar gemacht werden können, ist es auch möglich, die Anzahl der Versuche auf simulativem Wege zu vergrößern.

Im Weiteren wurde aus dieser breiten Datenbasis (Temperaturen und Verlagerungen aus Messung und Simulation) ein in der NC-Steuerung einfach zu implementierendes Korrelationsmodell gebildet, das zwischen charakteristischen Temperaturzuständen an einer endlichen Anzahl von Temperaturmessstellen und Verlagerungen des TCP relativ zum Tisch vermittelt.

## Ergebnisse

Mit dem erstellten Korrelationsmodell ist eine Vorhersagegenauigkeit der thermo-elastischen Verformungen der Maschine und der dementsprechenden Verlagerungen am TCP über ein großes Lastfallspektrum von ca. 50 % erreichbar.



*Gemessene und vorhergesagte Wirkpunktverlagerungen für einen Lastfall*

### **4.3.15 Entwicklung eines prozessaktiven Werkzeugsystems für die Formgebung komplexer Topologie-Hohlprofile aus textilverstärkten Verbundwerkstoffen mittels Heißpressen (ToHoP)**

<b>Laufzeit</b>	04/2007 - 03/2010
<b>Finanzierung</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
<b>Bearbeiter</b>	Dr.-Ing. Andreas Mühl Dipl.-Ing. Steffen Rehn Dipl.-Ing. Sebastian Kalisch
<b>Kooperation</b>	TU Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) ONI Temperiertechnik Rhytemper GmbH Hofmann & Engel Produktentwicklungs GmbH MITRAS Composites Systems GmbH Dieffenbacher GmbH + Co. KG Peguform GmbH

#### **Zielstellung**

Im Rahmen des Projektes werden Technologien für eine Prozesskette zur Herstellung komplex gekrümmter Hohlprofile mit variablem Querschnitt und belastungsangepassten Stegen (sog. Topologie-Hohlprofile) entwickelt. Die Prozesskette umfasst das Flechten der textilen Preforms (Basis: Glasfaser-Polypropylen-Hybridgarn) und das Heißpressen zum konsolidierten Verbund-Bauteil.

Die Besonderheit der Anforderung an das Werkzeug besteht darin, dass innenliegende Hohlräume ausgeformt und auch von innen temperaturgeführt werden müssen.

Der Schwerpunkt der Arbeiten am IWM ist die realitätsnahe Simulation der thermischen Vorgänge beim Heizen und Kühlen der Preform im prozessaktiven Werkzeugsystem. Die Ziele sind die Bewertung von unterschiedlichen Temperierstrategien nach



den Kriterien Temperierzeit, Energieeffizienz und Gleichmäßigkeit der Temperaturführung im Verbund.

## **Lösungsweg**

Im ersten Schritt wurde eine Modellbibliothek für transiente Temperaturberechnungen mithilfe von thermischen Knotenpunktmodellen erarbeitet. Mit diesem Modellierungsansatz konnten in der frühen Entwurfsphase des Werkzeuges schnell prinzipielle Aussagen zu Temperierzeiten und zur energetischen Effizienz unterschiedlicher Grobentwürfe gemacht werden.

In einem zweiten Schritt wurde die Detaillierung des Werkzeuges mit geometrisch höher aufgelösten thermischen FE-Modellen begleitet. Beide Berechnungsverfahren erfordern eine Beschreibung des nichtlinearen thermischen Materialverhaltens der textilen Preform. Hierzu wurden Modellansätze entwickelt, die den thermischen Leitwert und die thermische Kapazität des textilen Werkstoffs in Abhängigkeit der Temperatur und des druckabhängigen Bauschverhaltens beschreibt. Zur Validierung dieses thermischen Werkstoffmodells wurde ein Versuchsstand aufgebaut, mit dem das Bauschverhalten bestimmt werden kann.

Basierend auf diesen Untersuchungsergebnissen wurde das FE-Modell des Konsolidierungsprozesses an den praktischen Aufbau des Werkzeugsystems angepasst. Anhand von experimentell ermittelten Temperatur-Zeit-Verläufen wurde die Prognosefähigkeit des angepassten FE-Modells quantitativ bewertet. Ebenso wurden mit Hilfe dieses Modells Temperiervarianten hinsichtlich der Taktzeit und der Energieeffizienz untersucht.

## **Ergebnisse**

*Bild 1* zeigt die FE-Berechnung der Temperaturen des Topologie-Hohlprofils im Werkzeug am Ende der Aufheiz-Phase.

In *Bild 2* sind der gemessene und der simulierte Temperatur-Zeit-Verlauf in der Mitte des Steges dargestellt.

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung.

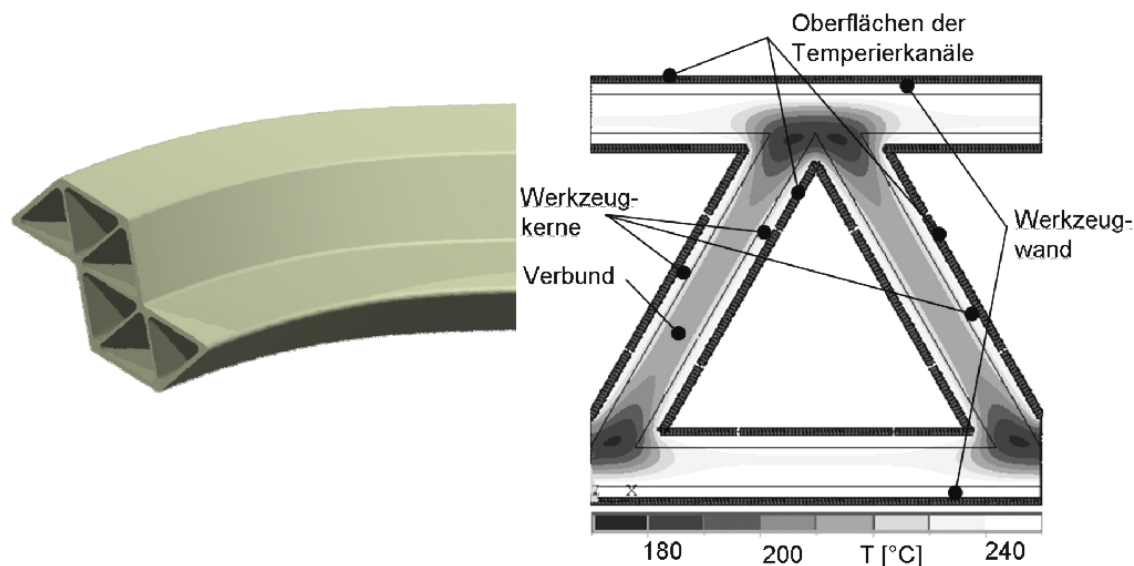


Bild 1: Topologie-Hohlprofil sowie Temperaturfeld des Hohlprofils und angrenzender Werkzeugbereiche, hier: mit fluidischer Heizung von innen und außen

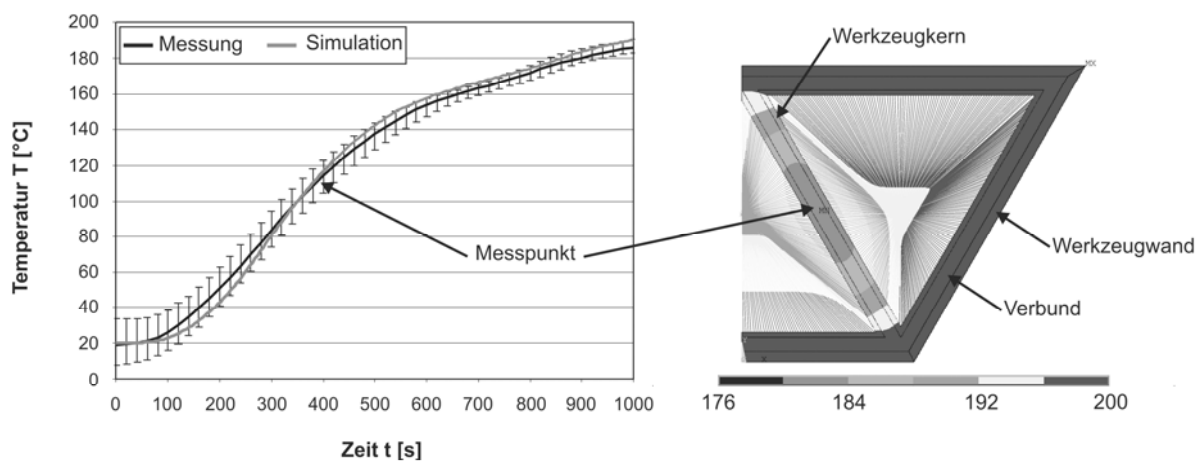


Bild 2: Gemessener und simulierter Temperatur-Zeit-Verlauf und das zugehörige Temperaturfeld am Ende der Aufheizphase, hier: fluidische Heizung von außen, statischer Luftdruck von innen

### **4.3.16 Entwicklung der Grundlagen für die simulationsgestützte Analyse von Profilschieneführungen**

**Laufzeit** 01/2007 - 05/2009

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dipl.-Ing. Lars Neidhardt  
Dr. rer. nat. Hannes Weishart

#### **Zielstellung**

Bei der Gestaltung der Hauptfunktionselemente von Profilschieneführungen (PSF) sind die Belastungen beim Verfahren des PSF-Wagens bzw. der -Schiene von großer Bedeutung. Sowohl mit dem Einsatz virtueller als auch mit dem Einsatz experimenteller Methoden können diese Belastungen z. Z. noch nicht ausreichend genau ermittelt werden. Daraus ergaben sich für das Projekt folgende Hauptzielstellungen:

1. Entwicklung von Verfahren zur virtuellen, simulationsgestützten Analyse von Kugel-PSF.
2. Validierung von Modellierungsvarianten für Kugel-PSF.
3. Experimente zum Abgleich der Parameter von Kugel-PSF-Modellen und
4. Untersuchung von Gestaltungsvarianten des Wälzkörperein- und Auslaufes auf Basis der virtuellen, simulationsgestützten Analyse von Kugel-PSF und deren vergleichende Bewertung anhand relevanter Kriterien.

#### **Lösungsweg**

- Ermittlung von Kennfeldern für die auf Wälzkörper einwirkenden Rückstellkräfte bei geschmiertem Wälzkontakt für relevante Geschwindigkeiten.
- Organisation des Austauschs der ermittelten Belastungs- und Bewegungsgrößen zwischen den Simulationselementen.
- Geometriebeschreibung für die relevanten Teile der zu analysierenden Kugel-PSF.

- Integration von Methoden für die Kollisionserkennung und Durchdringungs-Berechnung in die Simulationsmodelle.
- Berücksichtigung realer Exemplargeometrien (Toleranzen) in den Simulationsmodellen.
- Integration von Beschreibungsmöglichkeiten der elastischen Eigenschaften der Hauptfunktionselemente von PSF.
- Konzipierung, Gestaltung, Fertigung und Aufbau eines Versuchsstandes zum Abgleich der Parameter der aufzustellenden Simulationsmodelle.
- Durchführung von Versuchen zum Abgleich der Parameter der aufzustellenden Simulationsmodelle.
- Exemplarische Untersuchung von Möglichkeiten zur Gestaltung des Wälzkörperein- und Auslaufes mit dem Ziel der Verringerung der auf die Wälzkörper einwirkenden Kräfte.

## **Ergebnisse**

Aus der Analyse der relevanten Verhaltensbereiche und Mechanismen in einer Kugelprofilschienenführung wurde eine Grundstruktur des Modells abgeleitet, welche weiter in einzelne Teilmodelle diversifiziert wurde (*Bild 1*). Als relevante Einflüsse fanden in das Modell Eingang:

- Geometrie der Wälzkörper, der schienenseitigen u. wagenseitigen Laufbahn (hier speziell der Umlauf mit Ein- u. Auslaufzone).
- Nichtlineare Steifigkeit der Wälzkörper, des Wagens, der Schiene sowie des Schmierfilms.
- Trägheiten der Wälzkörper.
- Vorgänge in der Kontaktzone zwischen Wälzkörper und PSF-Wagen bzw. -Schiene.
- Vorgänge in der Kontaktzone zwischen den Wälzkörpern.
- Vorspannung der Wälzkörper.
- Äußere Kraft in Fahrerrichtung zur Dedizierung einer Wagen-geschwindigkeit.

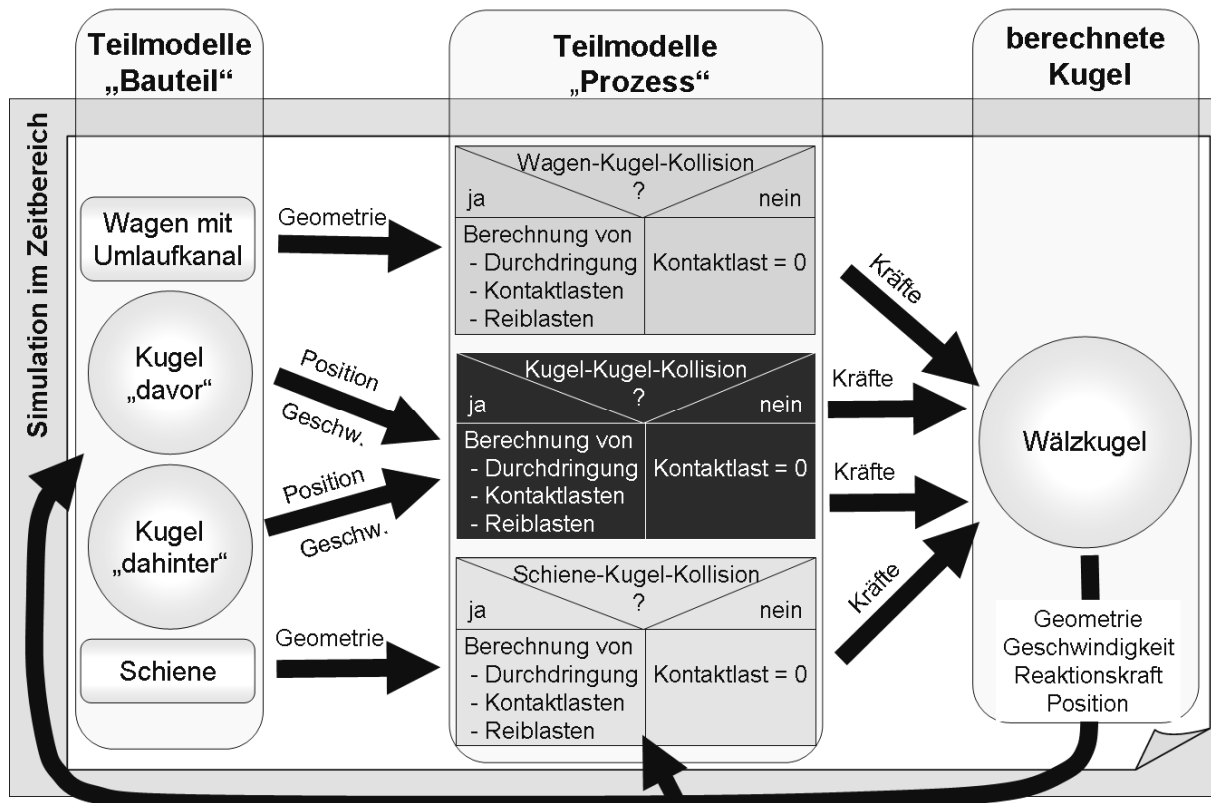


Bild 1: Aufbau des Simulationsmodells mit den einzelnen Teilmodellen und deren Beziehungen zueinander

Die Kennfelder für die auf die Wälzkörper einwirkenden Rückstellkräfte bei geschmiertem Wälzkontakt sowie die Schmierfilmdicke wurden mit einem gekoppelten CFD-Struktur-Modell berechnet. Diese Kennfelder, ergänzt um Reibungs- und Dämpfungskräfte, bilden im PSF-Modell die Basis der Teilmodelle "Prozess".

Die Realisierung des Gesamtmodells und die Simulation im Zeitbereich erfolgten mittels Erweiterungsmodul Simulink® zur Software MATLAB® von The MathWorks™, Inc. Es wurde ein Umlauf, bestehend aus 22 Kugeln, eines Kugelschienenführungswagens BG 25 (R1665..2) von Bosch-Rexroth nachgebildet. Die mit einem Versuchsstand ermittelten Geschwindigkeits-Zeit-Verläufe dieses mit konstanter Kraft angetriebenen PSF-Wagens wurden zur Kalibrierung des Modells herangezogen. Damit konnte eine hervorragende Übereinstimmung der Simulationsdaten mit den Messergebnissen erzielt werden (Bild 2).

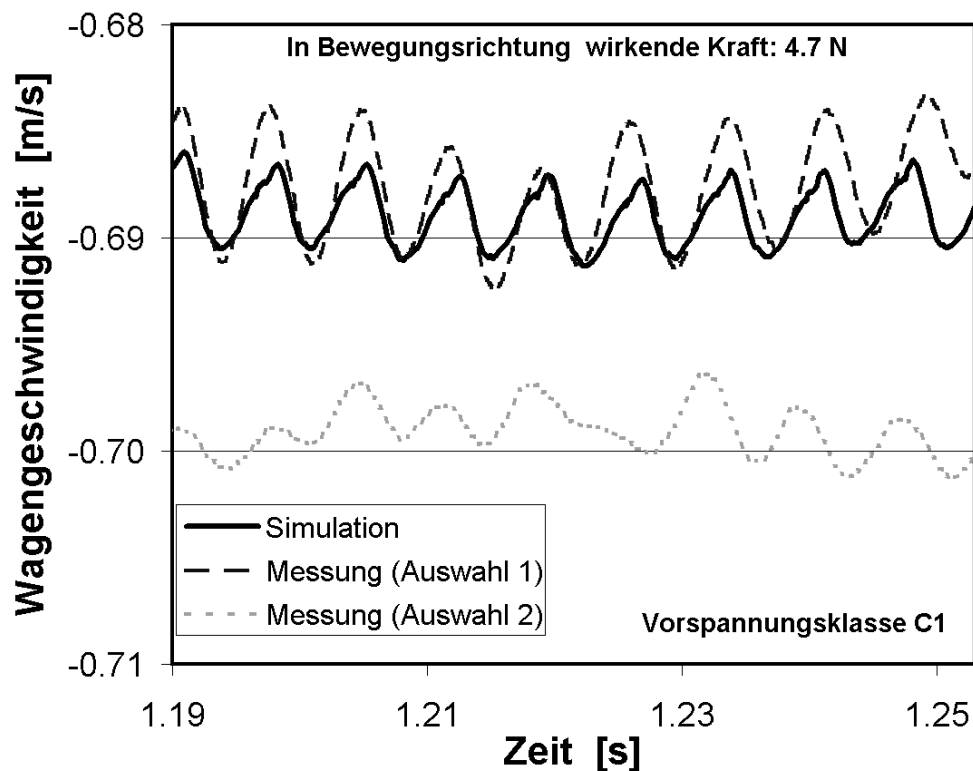


Bild 2: Vergleich der experimentell bestimmten und des simulierten Geschwindigkeit-Zeitverlaufs eines PSF-Wagens

Die Berechnung der auf die Wälzkugeln wirkenden Rückstellkräfte zeigte, dass die größte Belastung im Einlaufbereich des PSF-Wagens, kurz vor dem Übergang zum Eingriff (linearer Innenbereich), auftritt (Bild 3). Die an dieser Stelle wirkenden Spitzenbelastungen steigen mit zunehmender Wagengeschwindigkeit.

Schließlich wurden die Auswirkungen exemplarischer Geometrieänderungen im Einlaufbereich des PSF-Wagens auf die Wälzkörperkräfte untersucht. Der Einlaufbereich wurde hierzu linear modelliert. Es zeigte sich, dass sowohl eine Verlängerung des Einlaufbereiches, als auch eine Reduktion der Höhe des Einlaufbereiches zu reduzierten Kugelbelastungen führen.



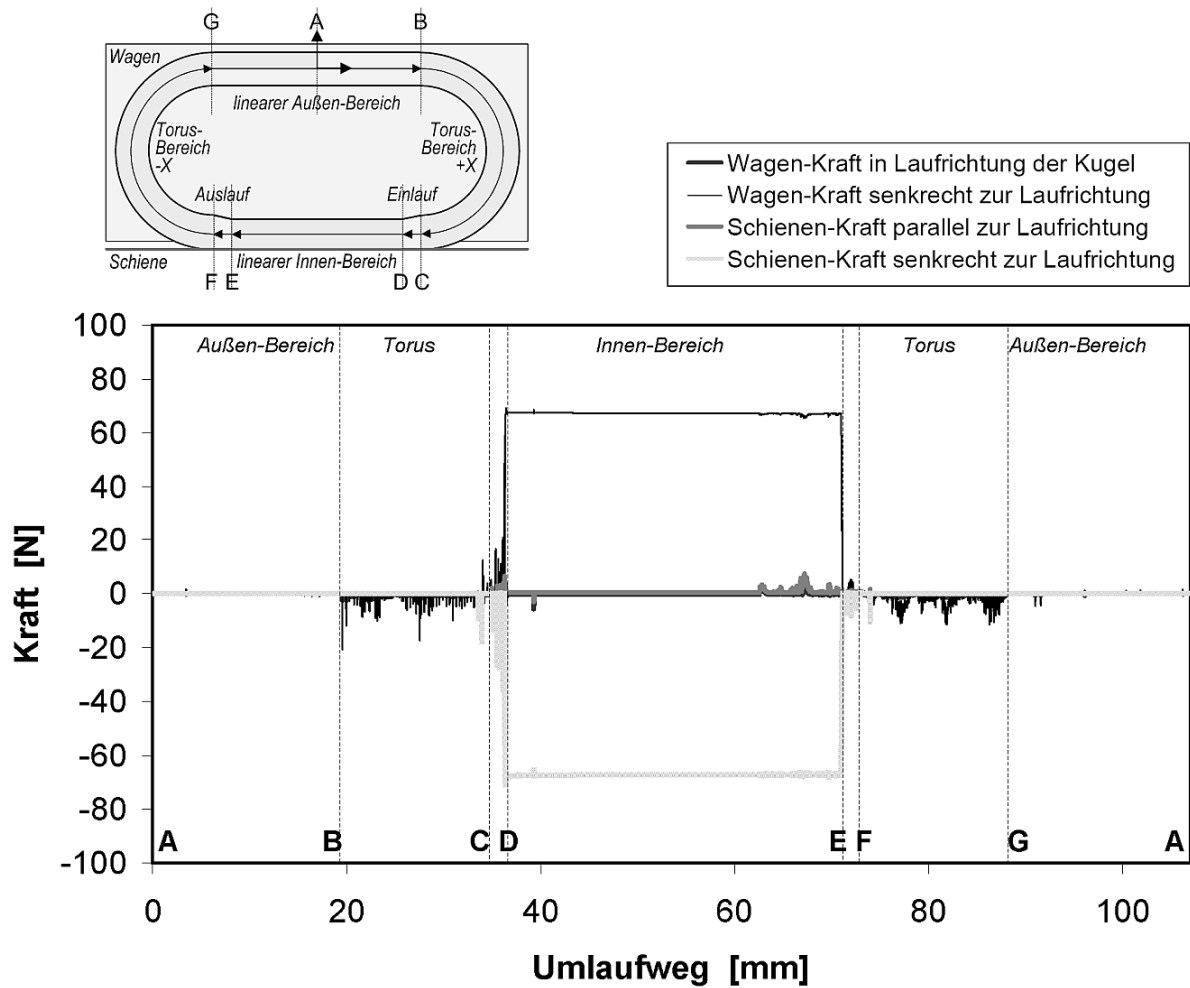


Bild 3: Simulationsergebnis: Rückstellkräfte von Wagen und Schiene, die auf eine Wälzkugel bei ihrem Umlauf durch den PSF-Wagen einwirken

### **4.3.17   Objektivierung der Verfahrensgrundlagen für die experimentelle Ermittlung der dynamischen Tragzahl von Profilschienenführungen**

**Laufzeit**           03/2006 - 02/2008  
                          12/ 2009 - 05/ 2011 (Fortsetzung)

**Finanzierung**   Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter**       Dipl.-Ing. Sven Krihning

#### **Zielstellung**

Die dynamische Tragzahl einer Profilschienenführung (PSF) ist der wesentliche Kennwert für die Berechnung ihrer Lebensdauer unter einer zu erwartenden äußeren Belastung.

Die Ermittlung dynamischer Tragzahlen von PSF erfolgt in der Regel auf Basis der mit Laufversuchen generierten Ausfalllaufwerte von PSF-Prüflingen bei, im Idealfall, konstanter Prüfkraft. Dabei führen im Wesentlichen exzentrischer Prüfkraftangriff, asymmetrische Trägheitsverteilung, positionsvariable Geometriefehler von Prüflingen und Versuchstand sowie positionsvariable Steifigkeiten des Versuchstandes zu nicht idealen Prüfbelastungen im verspannten System aus Versuchstand und PSF.

Ziel der Projektfortführung ist es daher, Gesamtsysteme aus den möglichen Konfigurationen von Versuchstand und Prüflings-PSF anhand des Kriteriums geringer Toleranzen der ermittelten dynamischen Tragzahlen vergleichend zu bewerten. Zu den dabei relevanten Versuchsbedingungen, den Einflussgrößen und den Auswirkungen auf experimentell ermittelte dynamische Tragzahlen sollen quantifizierte Aussagen ermittelt werden, auf deren Basis eine objektive Bewertung möglich ist.

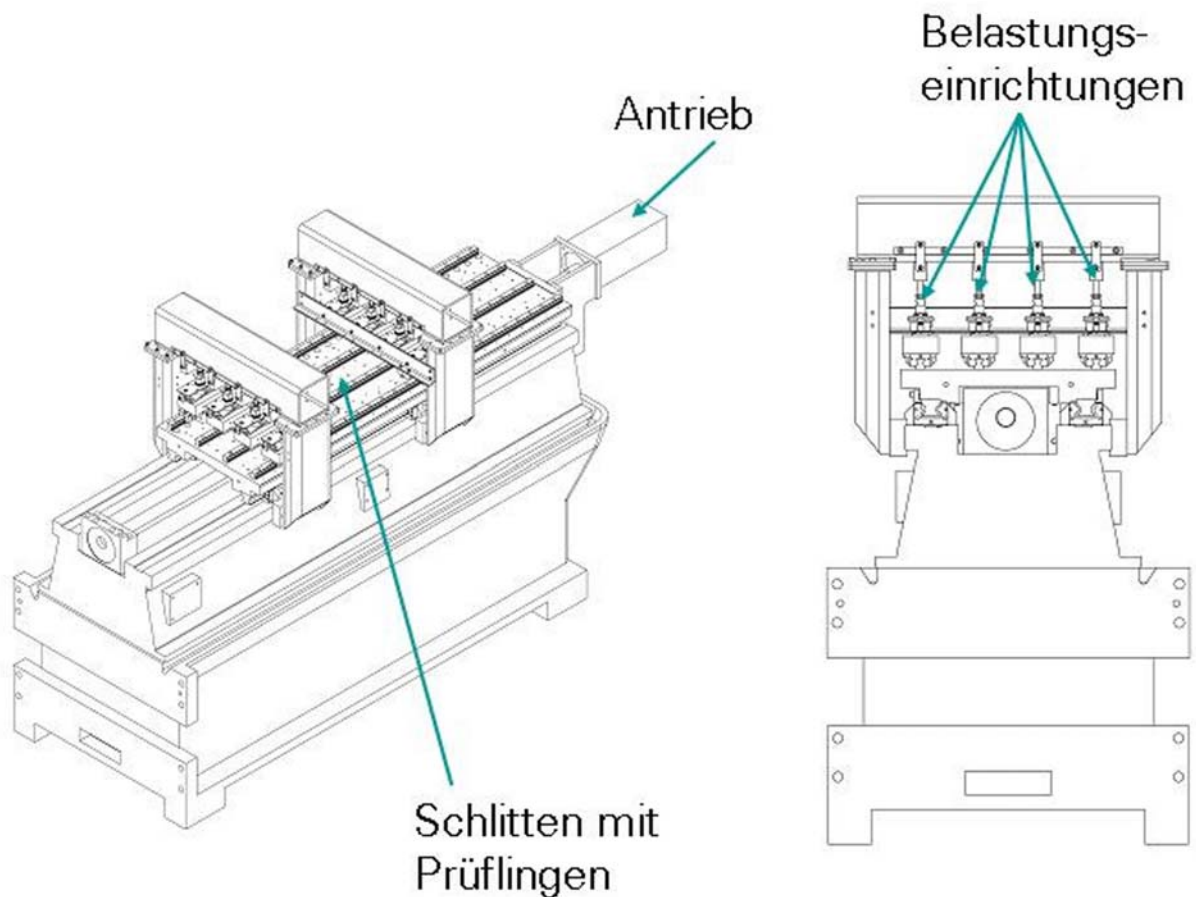
#### **Lösungsweg**

- Experimentelle Ermittlung dynamischer Lastgrößen zur Bewertung relevanter Konfigurationen von PSF-Prüflings- und Versuchstandsbauförmungen.

- Analytische Ermittlung dynamischer Lastgrößen zur Bewertung relevanter Konfigurationen von PSF-Prüflings- und Versuchsstandsbauformen.
- Analytische Ermittlung von Größen zur Bewertung relevanter Konfigurationen von PSF-Prüflings- und Versuchsstandsbauformen.
- Gesamtbewertung der experimentellen Ermittlung von dynamischen Tragzahlen von PSF.

## Ergebnisse

Für die Untersuchung der PSF im Versuchsstand mit bewegtem Prüflingswagen wird der bereits vorhandene Versuchsstand entsprechend umgerüstet und in Betrieb genommen (*Bild 1*).



*Bild 1: Versuchsstand mit bewegter Prüflingsschiene*

Es wurden Laufversuche an Profilschienenführungen der Baugröße 25 der Bauarten X und O durchgeführt (*Bild 2*). Dabei wurde der Laufweg bis zum Versagensfall (Ermüdungsschaden) ermittelt.

Die Untersuchungen sind gegenwärtig noch nicht abgeschlossen, da die tatsächlich erreichten Laufwege ca. 2 ... 3mal höher sind als die berechneten nominellen Laufwege.



*Bild 2: Laufversuche auf dem Versuchsstand mit bewegter Prüflingsschiene*

### 4.3.18 FEM-Analyse der Vergleichsspannung im Querschnitt von Profilschienenführungen der Bauarten X und O bei mittiger Belastung

**Laufzeit** 05/ 2010 – 06/ 2010

**Finanzierung** Industrie

**Bearbeiter** Dipl.-Ing. Sven Krihning

#### Zielstellung

Es sollten die maximalen Vergleichsspannungen eines Querschnittes (senkrecht zur Verfahrrichtung) des Wälzkontaktes (exemplarisch eine Wälzkörperebene) von Profilschienenführungen der Bauarten X und O ermittelt und bewertet werden.

#### Lösungsweg

Die Vergleichsspannungen nach *von Mises* wurden mittels FEM berechnet (*Bild 1*). Ergänzend wurden diese Werte mit den Ergebnissen der analytischen Berechnung nach *Hertz* verglichen.

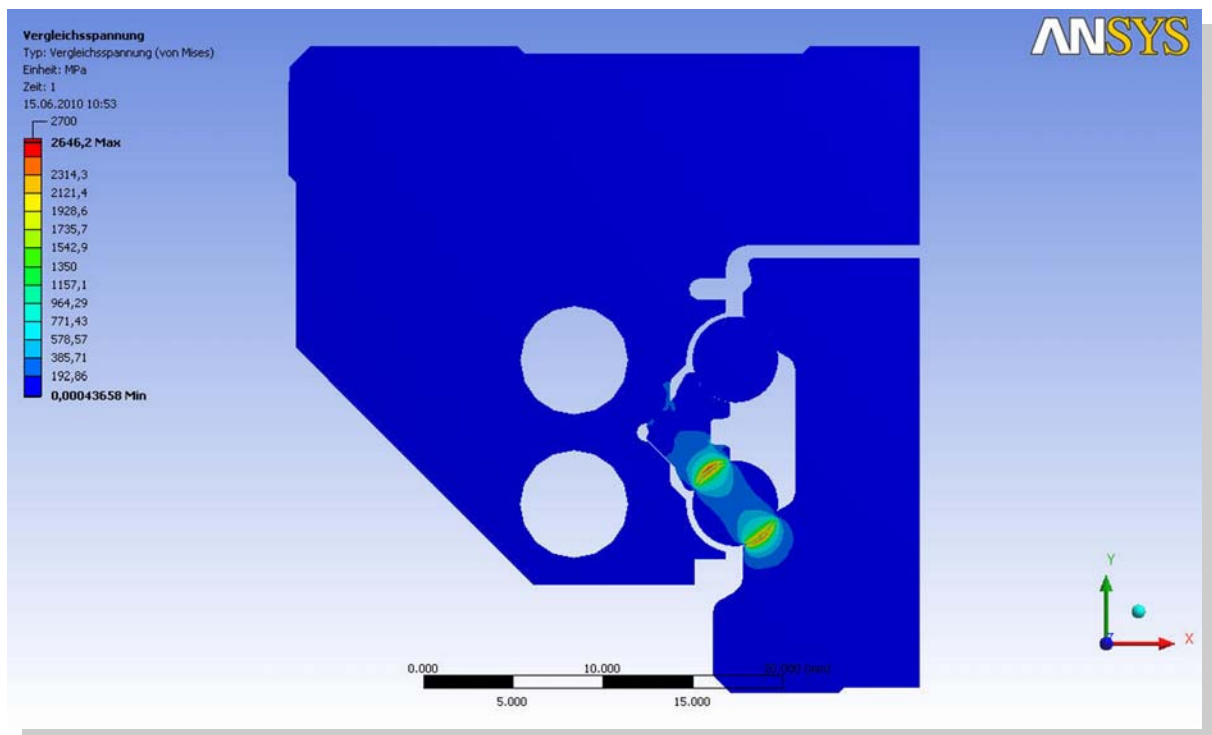
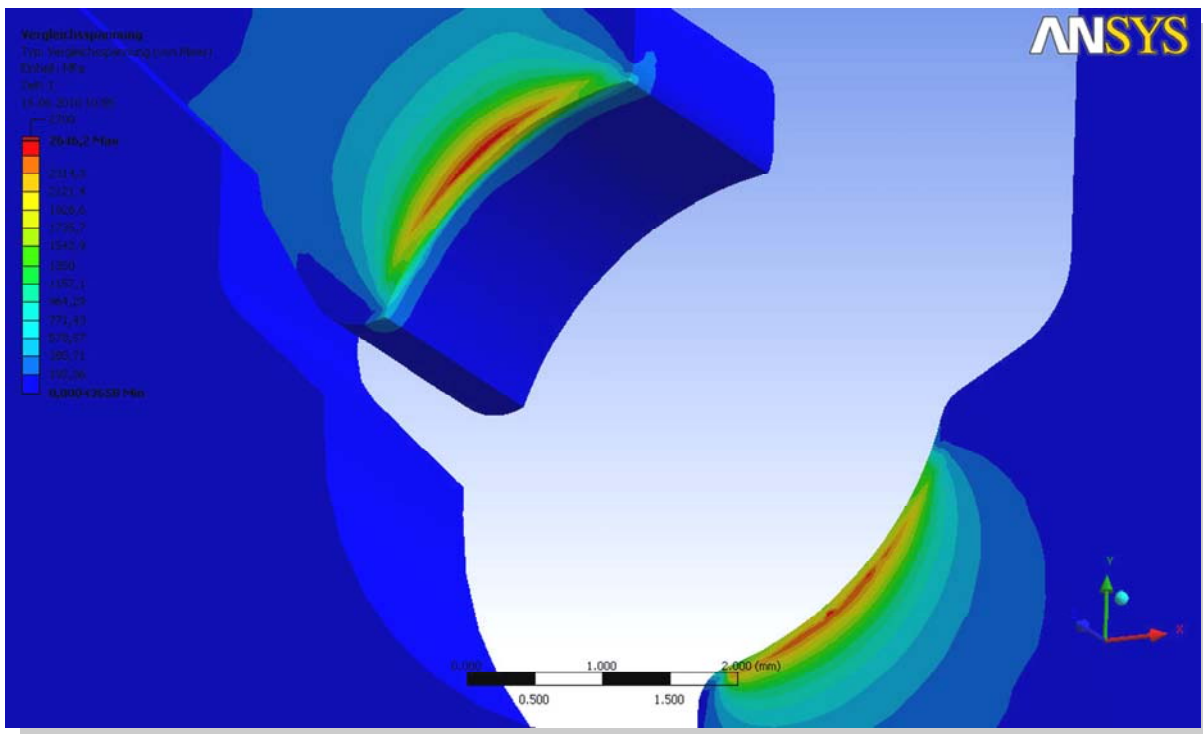


Bild 1: Belastetes Viertelmodell der Bauart O

Die Detailansicht zeigt, ob in den belasteten Laufrillen Kantenlauf zu erwarten ist (*Bild 2*).



*Bild 2: Detailansicht der Laufrillen im PSF-Wagen*

## Ergebnisse

Für Modelle der Baugröße 25 der Bauarten X und O wurden die Vergleichsspannungen am Wälzkontakt bei unterschiedlichen Belastungen ermittelt.

Für die gewählten Modellannahmen, Randbedingungen und Modellparameter sowie für eine ideal mittige statische Belastung haben die FEM-Berechnungen gezeigt, dass bei Belastungen von 0 ... 100 %  $C_{50B}$  der Wälzkontakt der PSF die Last sicher in die Führungsschiene überträgt. Es gab keine Hinweise auf unzulässige Spannungen in den Walzkontakten.

Bei der höchsten Belastung von 100 %  $C_{50B}$  konnte außerdem nachgewiesen werden, dass an den Rändern der Laufrillen des Wagens und der Schiene kein Kantenlauf auftritt.



Die Modellberechnungsergebnisse zeigen damit, dass die für die Gültigkeit des allgemein anerkannten Lauf-Belastungs-Zusammenhanges

$$L_{90} = \left( \frac{C}{F} \right)^a \cdot L_B$$

vorauszusetzenden Bedingungen:

- Belastung unterhalb der statischen Tragzahl  $C_0$
- keine Kantenläufer, d. h. Wälzkörper-Laufbahn-Kontakte am Laufbahnrand bzw. darüber hinaus,

auch für Prüflasten von  $C_{50B}/2$  mit ausreichender Sicherheit gewährleistet sind.

### **4.3.19 Konstruktion, Fertigung und Montage eines Prüfstandes für Profilschienenführungen nach dem Prinzip bewegte Schienen**

**Laufzeit** 07/2010 - 02/2011

**Finanzierung** Industrie

**Bearbeiter** Dipl.-Ing. Sven Krihning

#### **Zielstellung**

Unter Nutzung der Erfahrungen aus dem in Pkt. 4.3.17 beschriebenen DFG-Projekt war ein Lebensdauerversuchsstand für Profilschienenführungen (PSF) nach dem Prinzip "**bewegte Schiene**" zu konstruieren, zu fertigen, zu montieren und in Betrieb zu nehmen.

#### **Umsetzung**

Der entwickelte Prüfstand ermöglicht normgerechte Versuchsbedingungen nach DIN 631.

Er ist dazu mit Kraftsensoren an jedem Prüfling (Wagen) sowie mit Ölschmierung ausgestattet.

Fertigstellung und Übergabe an den Auftraggeber erfolgen voraussichtlich 02/2011.

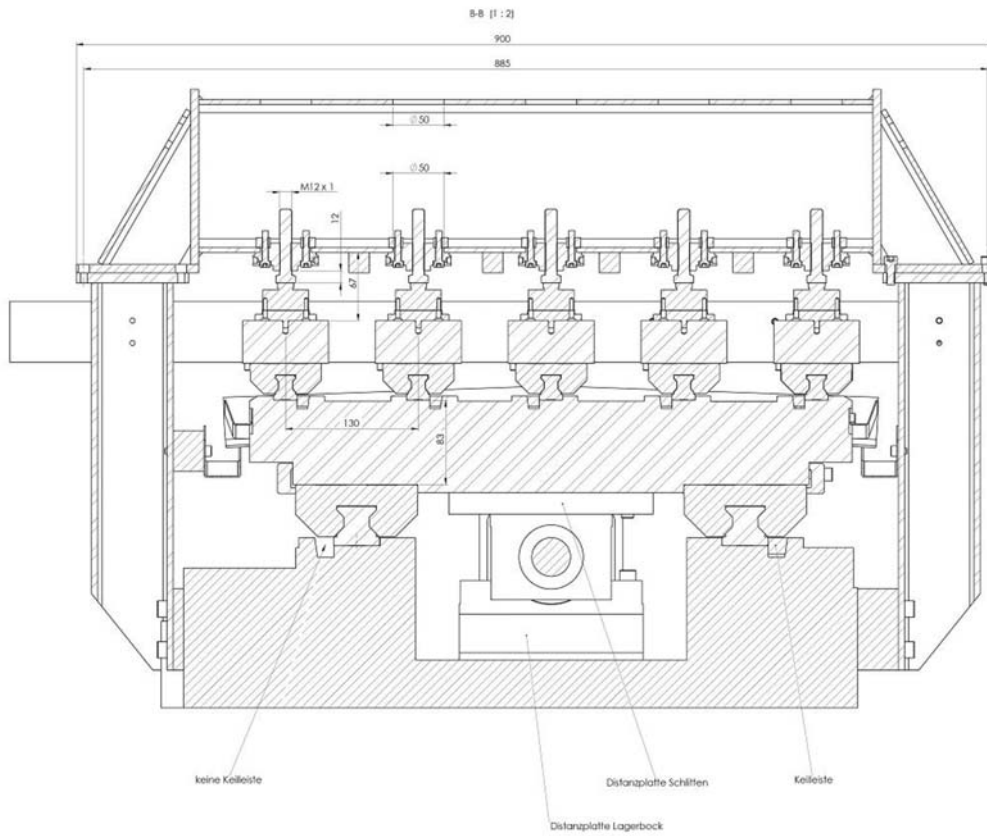


Bild 1: Schnittdarstellung des Prüfstandes

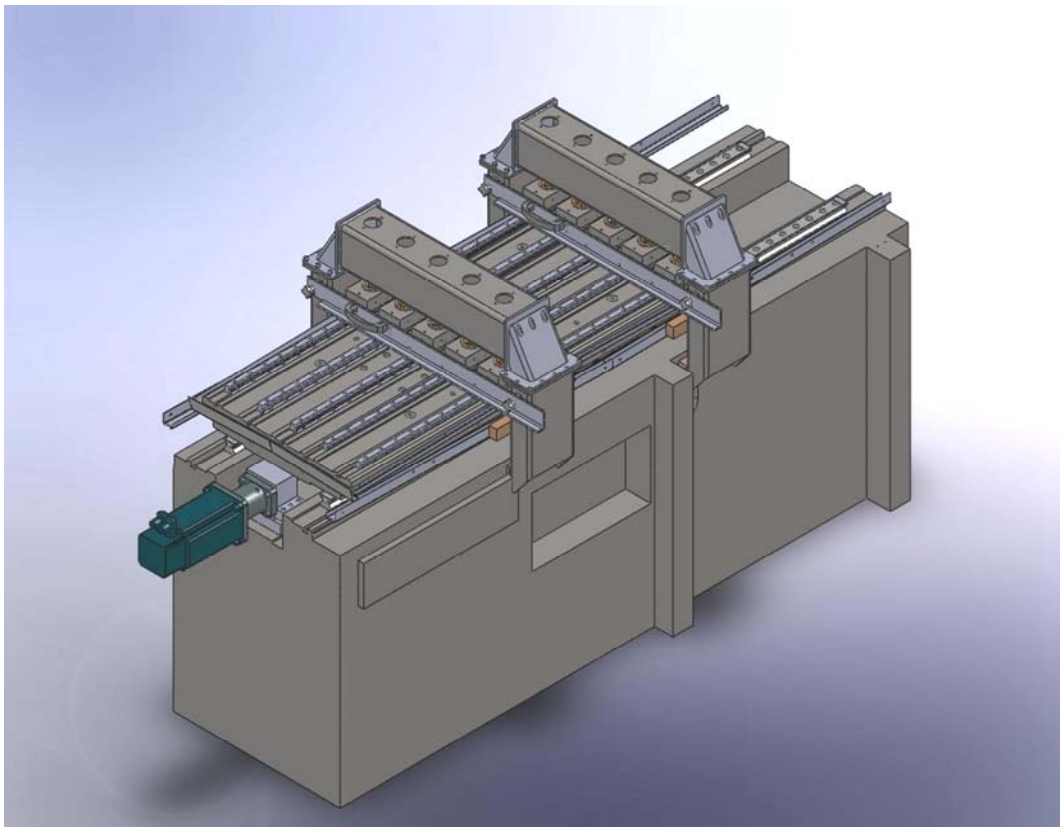


Bild 2: Ansicht des PSF-Prüfstandes mit bewegten Schienen

## 4.4 AG Steuerungstechnik

### 4.4.1 Grundlagen für den Einsatz exzentrischer Gelenke in parallelkinematischen Werkzeugmaschinen

**Laufzeit** 01/2009 - 04/2011

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dr.-Ing. Bernd Kauschinger  
Dipl.-Ing. Mirko Riedel

#### Zielstellung

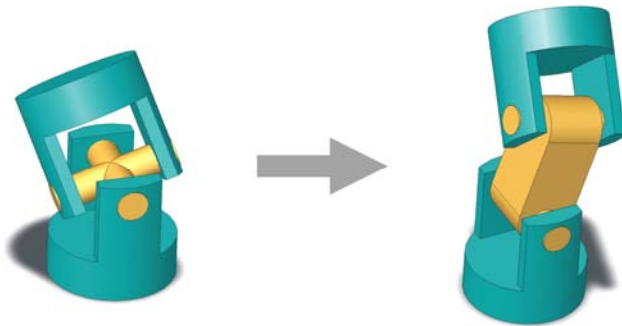
Parallelkinematische Werkzeugmaschinen besitzen Vorteile gegenüber seriellen Kinematiken bezüglich Steifigkeit und Bewegungsdynamik. Ihre Anwendungsbreite ist jedoch eingeschränkt. Zu den Ursachen dafür zählen die noch nicht wirtschaftliche Beherrschung der Bewegungsgenauigkeit sowie der begrenzte Arbeitsraum. In beiden Fällen stellen die Gelenke entscheidende Schwachstellen dar.

Für Gelenke an Parallelkinematiken wird gefordert, dass sich die Gelenkdrehachsen in einem Punkt schneiden. Dadurch vereinfacht sich einerseits das kinematische Modell, das für die Ansteuerung benötigt wird. Andererseits werden aber durch diese Forderung die konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten im Gelenk stark eingeschränkt. In der Konsequenz stellen hohe Gelenksteifigkeit und große Schwenkwinkel gegensätzliche Forderungen dar, so dass Kompromisse bei der Gelenkgestaltung und -fertigung unvermeidlich sind. Optimierte Lösungen führen zu sehr teuren Spezialgelenken, deren Einsatz nur in begrenztem Maße wirtschaftlich ist.

Das Ziel des Vorhabens ist deshalb die Verbesserung der Anwendungseignung von Parallelkinematiken durch die Beseitigung gelenkspezifischer Begrenzungen mit Hilfe einer alternativen Gelenkbauform, die die genannten Defizite umgehen kann.

## Lösungsweg

Der im Vorhaben verfolgte Lösungsansatz besteht darin, die bisher übliche Forderung nach sich schneidenden Gelenkdrehachsen aufzulösen (*Bild 1*). Dadurch erweitern sich die konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten im - hier als *exzentrisch* bezeichneten - Gelenk.



*Bild 1: Lösungsansatz: Übergang vom konventionellen zum exzentrischen Kardangelen*

Der kollisionsfreie Bauraum für die Lagerung der Gelenkachsen wird größer. Dadurch lassen sich große Schwenkwinkel in allen Gelenkachsen realisieren. Gleichzeitig wird eine kompaktere Gestaltung (vor allem des Kardankreuzes) möglich, so dass hohe Gelenksteifigkeiten und große Schwenkwinkel nicht mehr gegensätzliche Forderungen sind. Konstruktive Vereinfachungen im Gelenk lassen zusätzlich eine Senkung von Fertigungsaufwand und Herstellkosten und damit auch einfache und preiswerte Bauformen erwarten. Die komplexere kinematische Transformation ist mit heutiger Rechentechnik unproblematisch zu berechnen. Der Lösungsansatz folgt damit in konsequenter Weise dem Konzept der einfachen Bauart, nach dem am IWM Dresden der Hexapod FELIX entwickelt wurde.

Die dem Vorhaben zugrunde liegende Idee exzentrischer Gelenkdrehachsen ist prinzipiell nicht neu. Für den Einsatz solcher Gelenke in parallelkinematischen Werkzeugmaschinen fehlen bisher jedoch theoretische, konstruktive und anwendungsspezifische Grundlagen. Diese werden im Rahmen des Vorhabens erarbeitet und durch Untersuchungen am

Einzelgelenk, an den Stabachsen und am Gesamtsystem praktisch überprüft.

Für den Einsatz exzentrischer Gelenke in Parallelkinematiken besteht Untersuchungsbedarf speziell in den Bereichen kinematisches Modell, Schwenkbereich und Singularitäten, Lastbedingungen und Steifigkeit, Genauigkeitsbedingungen, konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten im Gelenk, Konsequenzen für Inbetriebnahme und Montage von Stabachsen und Gesamtstruktur, steuerungstechnische Konsequenzen, Aufwand und Kosten für Fertigung, Montage, Wartung und Reparatur sowie Einsatzgrenzen und -potentiale. Daraus ergeben sich die inhaltlichen Schwerpunkte für das gesamte Vorhaben, wobei sich das Arbeitsprogramm in zwei Hauptabschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt legt den Fokus auf das Einzelgelenk. Der zweite Abschnitt fokussiert dann auf das exzentrische Gelenk als Komponente von Stabachse und Gesamtsystem. Der hier bearbeitete erste Abschnitt hat folgende inhaltlichen Schwerpunkte:

- Berechnungsgrundlagen für exzentrische Gelenke
- Genauigkeitsbedingungen an exzentrischen Gelenken
- Auslegung und konstruktive Gestaltung exzentrischer Gelenke
- Untersuchungen an Einzelgelenken

Das Vorhaben beschränkt sich bewusst auf die Betrachtung von Gelenken mit zwei Drehfreiheitsgraden (Kardangelenke,  $f = 2$ ). Die in Parallelkinematiken (speziell Hexapoden) außerdem eingesetzten Kugelgelenke mit  $f = 3$  realisieren in der Regel den zusätzlichen Drehfreiheitsgrad um die Stablängsachse und können daher als Erweiterung eines Kardangelenks angesehen werden, was die Anwendbarkeit der erwarteten Ergebnisse nicht einschränkt.

## **Ergebnisse**

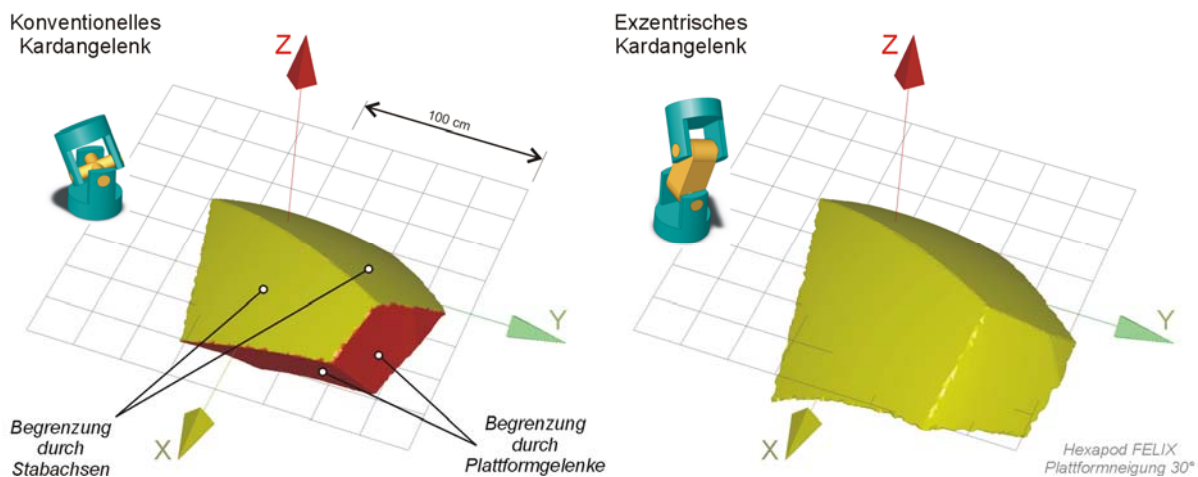
Gegenüber konventionellen Gelenken muss bei exzentrischen Gelenken die Größe der Exzentrizität in der kinematischen Transformation berücksichtigt werden. Andernfalls resultieren





sukzessive Verfeinerung ermittelt. Als Parameter können dabei die Orientierungswinkel der Plattform variiert werden. Die Punkte auf der Arbeitsraumgrenze werden mit einem iterativen, bisektionalen Suchverfahren bestimmt.

Dadurch genügt eine implizite Beschreibung des Arbeitsraumes (z. B. in Form eines Algorithmus), die lediglich eine binäre Aussage darüber liefern muss, ob eine Pose innerhalb oder außerhalb des Arbeitsraumes liegt. Im vorliegenden Fall wird dafür auf den bereits vorhandenen Algorithmus zur Endlagenüberwachung aus der Hexapod-Steuerung zurückgegriffen. Dieser Algorithmus liefert zusätzlich eine Aussage über die Begrenzungsursache, die sich über geeignete Farben ebenfalls visualisieren lässt. Am Beispiel des Hexapod FELIX zeigt sich, dass insbesondere bei größeren Orientierungswinkeln der Plattform die Arbeitsraumbegrenzung durch zu kleine Gelenkschwenkwinkel, maßgeblich der Handgelenke (plattformseitig), verursacht wird (*Bild 3 links*). Hier sind mit exzentrischen Gelenken deutliche Verbesserungen möglich (*Bild 3 rechts*).



*Bild 3: Analyse des verfügbaren Arbeitsraumes mit konventionellen (links) und exzentrischen (rechts) Gelenken*

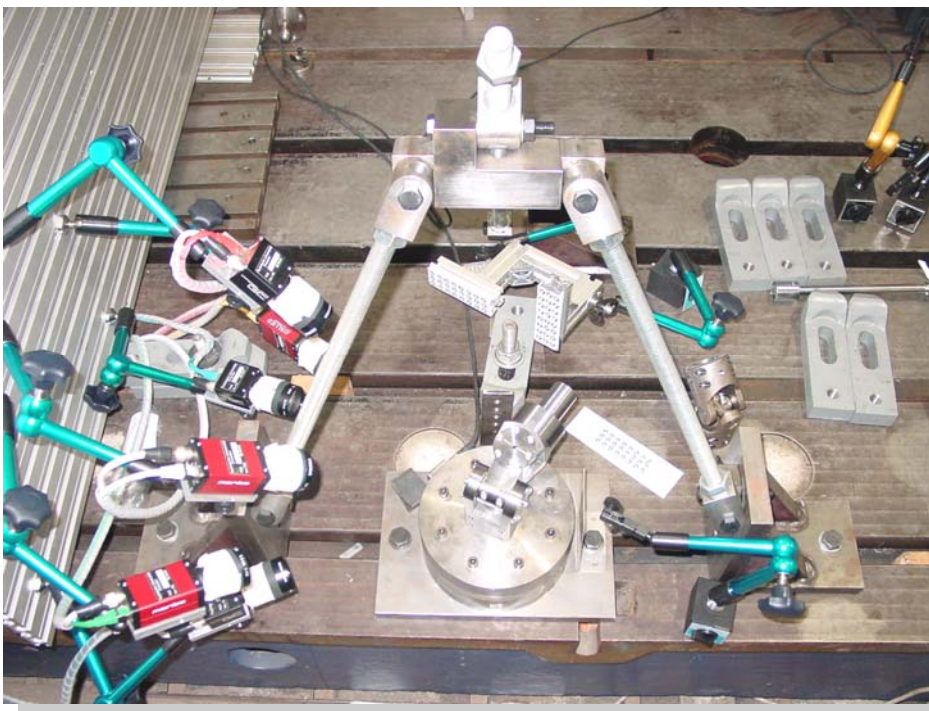
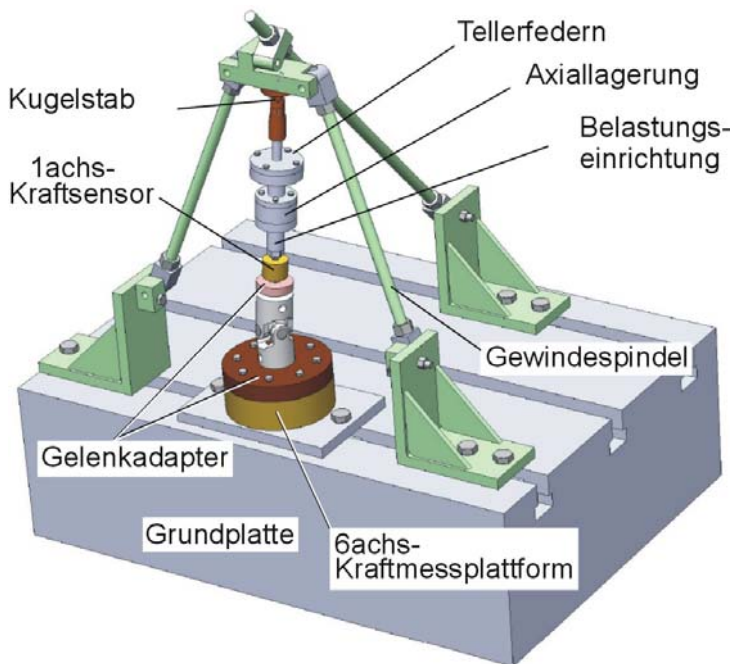
Ausgehend von den theoretischen Untersuchungen erfolgten Konstruktion, Fertigung und Montage von verschiedenen Gelenkvarianten. Dabei wurden unterschiedliche Wälzlagerarten (Kegelrollenlager, Schrägkugellager, Dünnring-Schrägkugellager) verwendet, die sich jeweils Vorspannen und dadurch spielfrei

einstellen lassen. Gelenkgröße und mechanische Schnittstelle zur Gelenkanbindung in die Struktur wurden dabei so gestaltet wie beim konventionellen Kardangelenke, welches die Vergleichsbasis für die experimentellen Untersuchungen liefert. Die mit diesen exzentrischen Gelenken realisierbaren Schwenkwinkel betragen in jeder Drehachse unabhängig voneinander jeweils  $\pm 85^\circ$ . Prinzipiell wären auch noch größere Werte realisierbar. In der praktischen Anwendung stellt sich jedoch bei einem Gelenkschwenkwinkel von  $90^\circ$  eine Struktursingularität ein, die zu einer unerwünschten Verklemmung der Struktur führen kann und somit unbedingt vermieden werden muss.



*Bild 4: Konventionelles Kardangelenke und neu entwickelte exzentrische Gelenke*

Für die experimentelle Untersuchung der schwenkwinkelabhängigen Gelenksteifigkeit an verschiedenen GelenkbaufORMen wurde ein spezieller Gelenkprüfstand entwickelt, konstruiert und aufgebaut (*Bild 5*). Er ermöglicht eine definierte Lasteinleitung in das zu untersuchende Gelenk und die Messung der daraus resultierenden Gelenkverlagerungen. Auf diese Weise kann für beliebige Schwenkwinkel-Kombinationen die Gelenksteifigkeit bestimmt werden.



*Bild 5: Gelenkprüfstand als CAD-Modell (oben) und während der Inbetriebnahme (unten)*

Die Verlagerungsmessung am Gelenkprüfstand erfolgt dabei mit Hilfe von Kameras auf Basis der Nahbereichsphotogrammetrie. Auf diese Weise können die Verlagerungen der einzelnen Gelenkkomponenten unter Last in allen 6 Freiheitsgraden erfasst und damit die Gelenkverlagerungen detailliert analysiert werden.



## 4.4.2 Grundlagen für den effizienten Einsatz mehrachsiger interpolierender Servoantriebe in Verarbeitungsmaschinen

**Laufzeit** 10/2010 - 09/2012

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dr.-Ing. Bernd Kauschinger  
Dr.-Ing. Andreas Mühl  
Dipl.-Ing. Olaf Holowenko

**Kooperation** TU Dresden, Professur für  
Verarbeitungsmaschinen/Verarbeitungstechnik  
(VM/VAT)

### Zielstellung

Der Einsatz von Servoantrieben in Verarbeitungsmaschinen besitzt große Potentiale gegenüber konventionellen Antriebslösungen. Durch komplexere Bewegungen der Antriebe kann die Anzahl bewegter Bauteile reduziert werden. Die hohe Flexibilität bei der Bewegungsvorgabe vereinfacht nicht nur die Formatanpassung (Umrüstung) sondern ermöglicht auch die Adaption der Bewegungen an variierende Bedingungen im laufenden Prozess. Die bisher erreichte Bewegungsgüte ist jedoch noch unbefriedigend, speziell bei schnellen mehrachsigen Bewegungen. Eine Ursache dafür liegt im Bewegungsdesign. Relevante Einflüsse, wie das Maschinen- und Prozessverhalten, werden dabei noch unzureichend berücksichtigt. Das Vermögen der Verarbeitungsmaschine wird dadurch nicht ausgenutzt. Für die Erstellung optimierter Bewegungsvorgaben fehlen jedoch geeignete Methoden und Werkzeuge sowie geeignete Modelle von Verarbeitungsprozessen. Anteil und Stärke der wirkenden Einflüsse variieren mit der Taktrate (Arbeitsgeschwindigkeit) der Verarbeitungsmaschine. Entsprechend ist zu erwarten, dass sich optimale Bewegungsvorgaben jeweils abhängig von der Taktrate unterscheiden. Die Taktrate für die Einzelmaschine wird dabei üblicherweise von der übergeordneten Gesamtanlage bestimmt. Zur Maximierung der Ausbringung wäre es deshalb wünschens-

wert, die Bewegung der Einzelmaschine jeweils taktratenabhängig optimal vorgeben zu können. Bisher bekannte Steuerungsansätze ermöglichen eine solche Funktionalität jedoch nicht. Ziel des Vorhabens ist die Erschließung der Potentiale von Servoantrieben für Anwendungen in Verarbeitungsmaschinen. Dadurch sollen höhere Ausbringungen sowie flexible Bewegungsanpassungen ermöglicht werden.

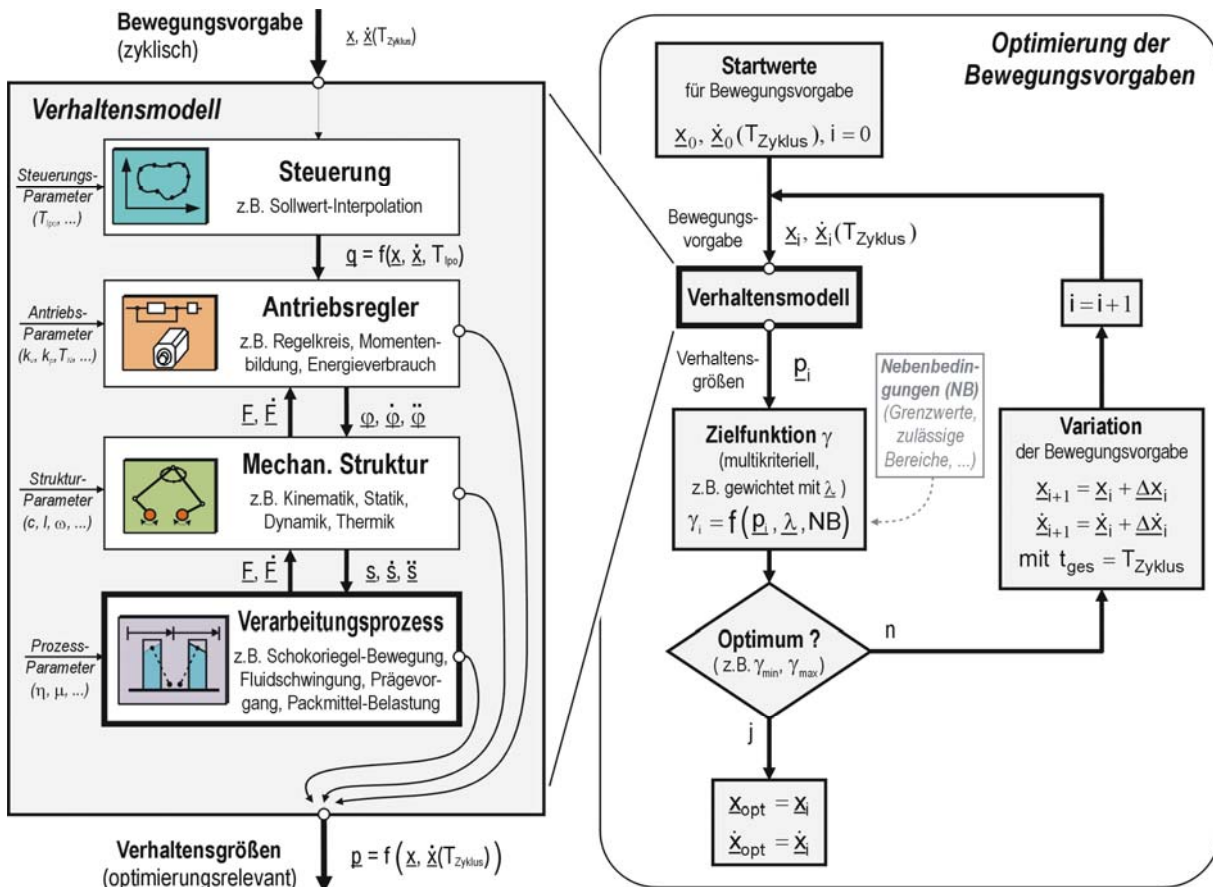


Bild 1: Optimierungsansatz für Bewegungsvorgaben an Verarbeitungsmaschinen

## Lösungsweg

Inhaltlich gliedert sich das Vorhaben in zwei Schwerpunkte, die vom VM/VAT und vom IWM bearbeitet werden. Dabei sollen Möglichkeiten und Grenzen des verfolgten Ansatzes zur Bewegungsplanung für Verarbeitungsmaschinen untersucht, bewertet sowie beispielhaft nachgewiesen und demonstriert werden. Inhaltlicher Schwerpunkt des VM/VAT ist die Ermittlung taktratenabhängig optimaler Bewegungsvorgaben für Verarbei-



tungsmaschinen. Charakteristisch dafür sind zyklische Bewegungen. Dabei werden Bewegungsanforderungen aber nur punkt- bzw. abschnittsweise gestellt. Deshalb soll bei der Optimierung nicht nur das Geschwindigkeitsprofil sondern auch die Bahngeometrie variiert werden. Dafür wird ein modellbasierter Optimierungsansatz entwickelt und untersucht, der die modulare Einbeziehung aller relevanten Verhaltensinflüsse gestattet (Bild 1). Für Funktionsnachweis und Demonstration des Ansatzes sollen Modelle von repräsentativen Verarbeitungsprozessen erarbeitet werden. Inhaltlicher Schwerpunkt des IWM ist die effiziente Abarbeitung taktratenabhängiger Bewegungsvorgaben in der Steuerung. Gegenüber bekannten Ansätzen soll dabei der Bedarf für zeitkritische Steuerungsfunktionalität minimiert werden. Dafür werden die Bewegungsvorgaben mit einem splinebasierten Ansatz vollständig im zeitunkritischen Bereich aufbereitet.

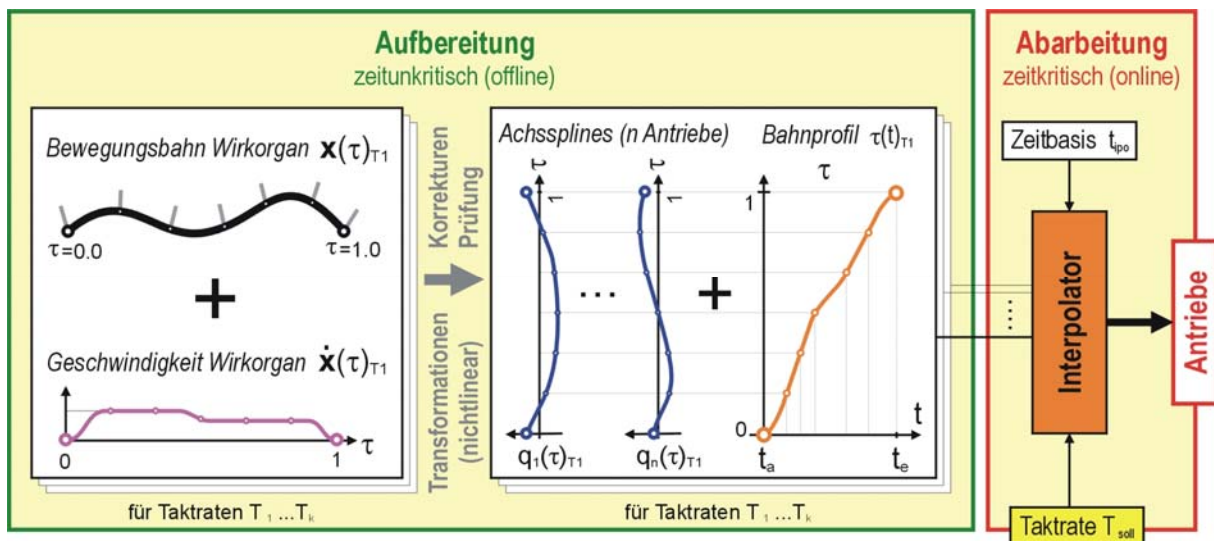


Bild 2: Verfolgter Ansatz zur Bewegungsausführung in der Steuerung

Darin eingeschlossen sind nichtlineare Koordinaten- und Achstransformationen, Bewegungskorrekturen sowie Endlagen- und Kollisionsprüfungen. Basierend darauf werden für den zeitkritischen Bereich der Steuerung Funktionen zur effizienten Interpolation der Bewegungen mit Berücksichtigung einer Taktratenvorgabe entwickelt und untersucht (Bild 2). Die zu

entwickelnde Steuerungsfunktionalität ist eine Voraussetzung für Funktionsnachweis und Demonstration des Ansatzes. Hierfür werden jeweils die theoretischen Grundlagen erarbeitet und verifiziert.

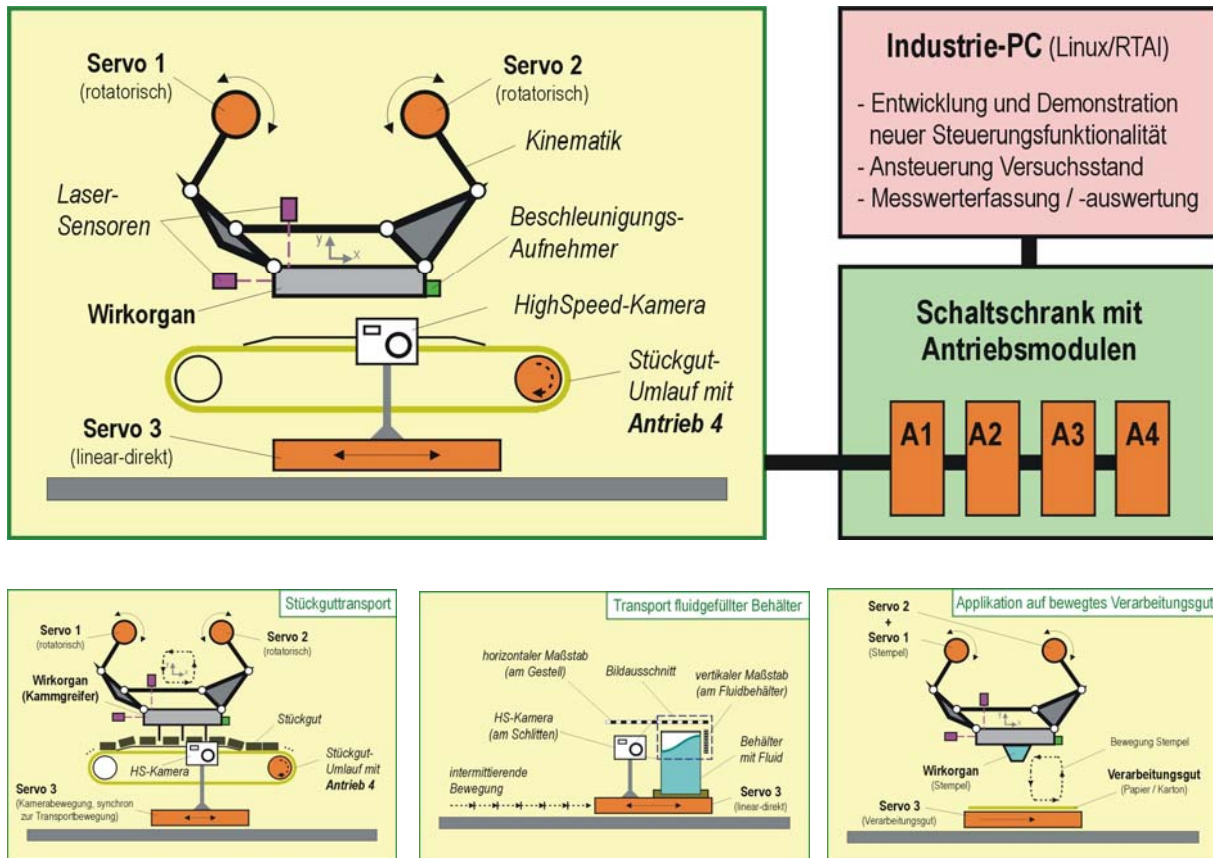


Bild 3: Versuchsstandkonzept (oben) und Analyse verschiedener Prozessklassen (unten)

Darüber hinaus erfolgen Konstruktion, Aufbau (VM/VAT) sowie Steuerungsanbindung und Inbetriebnahme (IWM) eines Versuchsstandes (Bild 3). Die Betrachtungen beschränken sich in diesem Zeitraum zunächst auf eine repräsentative Klasse von Verarbeitungsprozessen, und zwar den innermaschinellen Transport kleinformatiger Stückgüter.

Darauf aufbauend ist die Übertragung der erarbeiteten Grundlagen auf weitere Klassen von Verarbeitungsprozessen vorgesehen. Dann sollen zusätzlich der intermittierende Transport offener fluidgefüllter Behälter (Schwappverhalten) sowie das Applizieren auf gleichförmig bewegtes Verarbeitungsgut betrach-

tet werden. Anschließend werden spezifische Möglichkeiten und Grenzen des verfolgten Bahnplanungs- sowie Steuerungsansatzes untersucht und bewertet.

## **Ergebnisse**

Die ersten Arbeiten beinhalten die konstruktive Gestaltung sowie Fertigung, Aufbau und Inbetriebnahme des Versuchsstandes. Weiterhin erfolgte die Spezifikation und Beschaffung der dafür erforderlichen Antriebs-, Steuerungs- und Messtechnik.

### 4.4.3 **Wirtschaftliche Posemessung an Werkzeugmaschinen mit einem photogrammetrischen Messsystem**

<b>Laufzeit</b>	07/2010 - 06/2012
<b>Finanzierung</b>	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
<b>Bearbeiter</b>	Dipl.-Ing. Mirko Riedel Dr.-Ing. Bernd Kauschinger

#### **Zielstellung**

Der wachsende Bedarf für 5- und 6achsige Prozessbewegungen (z. B. Freiformflächenbearbeitung) bedingt den verstärkten Einsatz von Bewegungseinrichtungen mit mehr als 3 Achsen, größeren Arbeitsräumen und erweitertem Bewegungsvermögen.

Zur Abnahme und Bewertung der Bewegungsgenauigkeit dieser Maschinen wird neben achsspezifischen Kenngrößen auch die Vermessung der räumlichen Bewegungsgenauigkeit in allen 6 Freiheitsgraden gefordert. Dafür bisher eingesetzte Messsysteme (z. B. Lasertracker) sind jedoch sehr teuer und können den Arbeitsraum nicht immer geschlossen erfassen, zudem sind die Messungen zeitaufwändig und erfordern qualifiziertes Fachpersonal.

Eine Alternative dazu bieten photogrammetrische Messverfahren, wobei die Messgenauigkeit bisher verfügbarer Systeme mit zueinander fixierten Messkameras schlechter und der vermessbare Arbeitsraum durch Anzahl und Anordnung der Kameras fest vorgegeben ist. Eine frei konfigurierbare Anordnung einer beliebigen Anzahl von Kameras ermöglicht höhere Messgenauigkeiten und einen anpassbaren Arbeitsraum durch eine maschinen- und messaufgabenspezifisch optimierbare Messkonfiguration. Dies führt jedoch zu einer komplizierteren Einrichtung, Kalibrierung und Bedienung derartiger Messsysteme, was deren Werkstatttauglichkeit und Automatisierbarkeit begrenzt. Ziel des Vorhabens ist die Erschließung der Potentiale eines frei konfigurierbaren photogrammetrischen Messsystems zur hoch genauen Vermessung der Bewegungs-

genauigkeit in 6 Freiheitsgraden im Arbeitsraum einer Werkzeugmaschine. Die dafür erforderlichen Grundlagen sollen im Rahmen dieses Vorhabens erarbeitet und verifiziert werden.

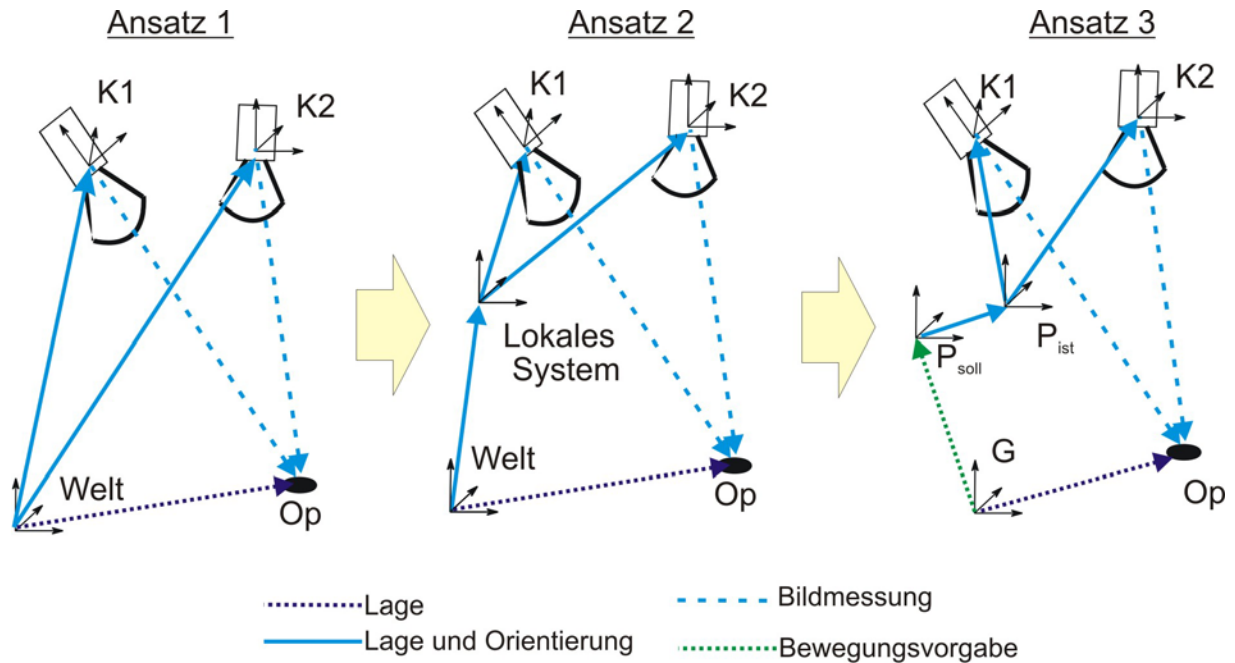


Bild 1: Messmodell mit unterschiedlichen Ansätzen

## Lösungsweg

Der Lösungsansatz besteht darin, die Messkameras und zu erfassenden Marken sowohl direkt an zu vermessenden Maschinenbaugruppen als auch frei im Arbeitsraum anzuordnen und gemeinsam in einer Bündelblockausgleichung auszuwerten. Dabei werden neben photogrammetrischen Zusammenhängen auch kinematische Verkopplungen von relativ zueinander bewegten Baugruppen sowie Steuerungsinformationen in einem Messmodell zusammengeführt (Bild 1). Die Messkonfiguration (Anzahl u. Anordnung der Kameras u. Messmarken) wird im Vorfeld hinsichtlich der modellintern erreichbaren Messgenauigkeit sowie des erfassbaren Messbereiches maschinen- und messsystemspezifisch angepasst und optimiert. Arbeitsschwerpunkte sind Methoden zur Integration der zu vermessenden Maschinenstruktur und ihres Bewegungsvermögens in ein erweitertes Messmodell sowie Methoden für die Optimierung von Anordnung und Blickfeld der Kameras auf der Basis dieses Modells.

Anhand experimenteller Untersuchungen verschiedener Messsystemkonfigurationen werden die Funktion des verfolgten Lösungsansatzes nachgewiesen sowie Möglichkeiten und Grenzen eines solchen Posemesssystems demonstriert und bewertet.

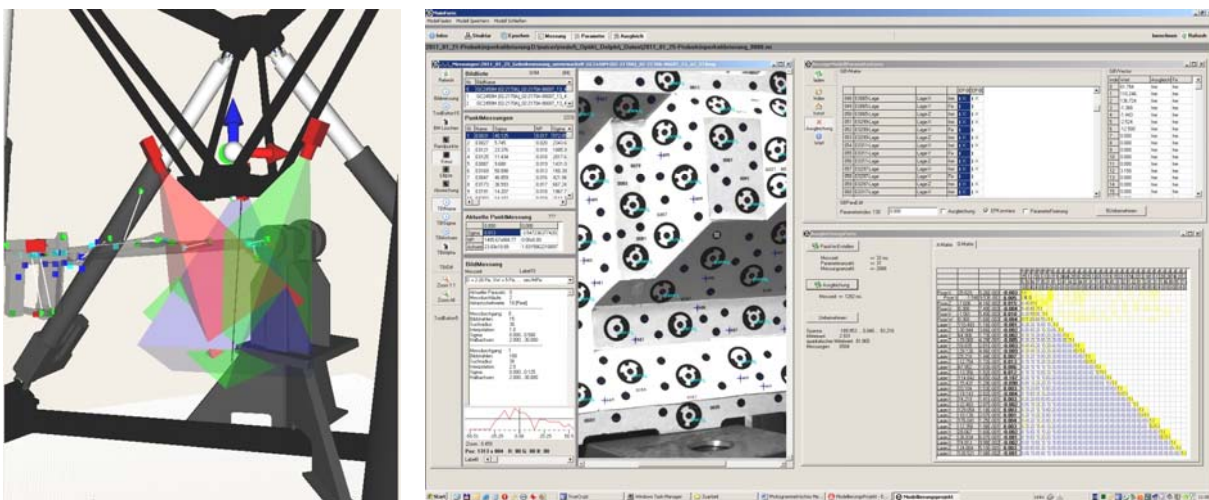
Als Demonstrator dient eine am IWM vorhandene sechsachsige Bewegungseinrichtung.

## Ergebnisse

Kern der Arbeiten im ersten Arbeitsschritt ist die Zusammenfassung und Anpassung der theoretischen photogrammetrischen Grundlagen und Methoden zur Modellerstellung und Auswertung der Posemessung in verschiedenen Konfigurationen.

Dafür wurde eine Software entwickelt, in der unterschiedlichste Messkonfigurationen erstellt, Bilder zugeordnet, die Bildmessungen durchgeführt und einer Bündelblockausgleichung zugeführt werden können (*Bild 2*).

Die Bündelblockausgleichung ist ebenfalls in der Software integriert und ermöglicht eine Identifikation der Modellparameter (räumliche Koordinaten der Messmarken, Lage und Orientierung der Kameras sowie Abbildungseigenschaften der Kameras) auf Basis von numerischen nichtlinearen Optimierungsverfahren.



*Bild 2: Software zur Erstellung von Messkonfigurationen und zur Bündelblockausgleichung*



#### **4.4.4 Entwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Konzeption eines neuen Verfahrens und dessen Umsetzung in ein Schleifzentrum**

**Laufzeit** 01/2008 - 12/2009

**Finanzierung** BMWi  
über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsgemeinschaften "Otto von Guericke" (AiF) PRO INNO II  
Kooperationsprojekt "Entwicklung von Verfahren und Anlage zur Automatisierung manueller Schleifoperationen zu Oberflächenverbesserung von Turbinenschaufeln"

**Bearbeiter** Dr.-Ing. Volker Möbius  
Dr.-Ing. Bernd Kauschinger  
Dipl.-Ing. Mirko Riedel

**Kooperation** MAB Maschinen- und Anlagenbau GmbH,  
Radebeul  
a&a technologies GmbH, Bremen

#### **Zielstellung**

Turbinenschaufeln sind High-Tech-Erzeugnisse für extreme Belastungen, bei denen Formgenauigkeit und Oberflächenrauheit direkt auf die Leistungseffizienz des Endproduktes Turbine wirken. Nach der spanenden Herstellung auf 5-D-Fräsmaschinen wird deshalb z. Z. in einem manuellen Arbeitsgang an einer Bandschleifmaschine die gefräste Oberfläche in den Rauheitswerten verbessert. Das Projekt will die manuell geführte komplexe Relativbewegung zwischen dem Werkstück Turbinenschaufel und dem Schleifband mit einer parallelkinematischen Bewegungseinrichtung mit sechs Freiheitsgraden (Hexapod) sowie einer zusätzlichen Drehachse an der Werkstückaufnahme ablösen. Optische Messeinrichtungen sollen die optimale geometrische Orientierung beim Schleifprozess sowie die Ergebniskontrolle der geschliffenen Oberfläche ermöglichen.

Der Hexapod soll zusätzlich Handling-Operationen ausführen.

## **Lösungsweg**

Die Lösungskonzeption des Projektes stützt sich auf folgende Strategie:

- Verbindung der Bewegungsmöglichkeit einer Parallelkinematik in sechs Freiheitsgraden mit prozessaktiver Sensorik.
- Einbeziehung optischer Verfahren für die Identifikation der Werkstücklagen für automatische Beschickungsvorgänge sowie für die Beurteilung des Arbeitsergebnisses.

Die beabsichtigte technologische Entwicklung und deren Umsetzung in eine Arbeitsstation begründet sich dabei in folgenden Kernelementen:

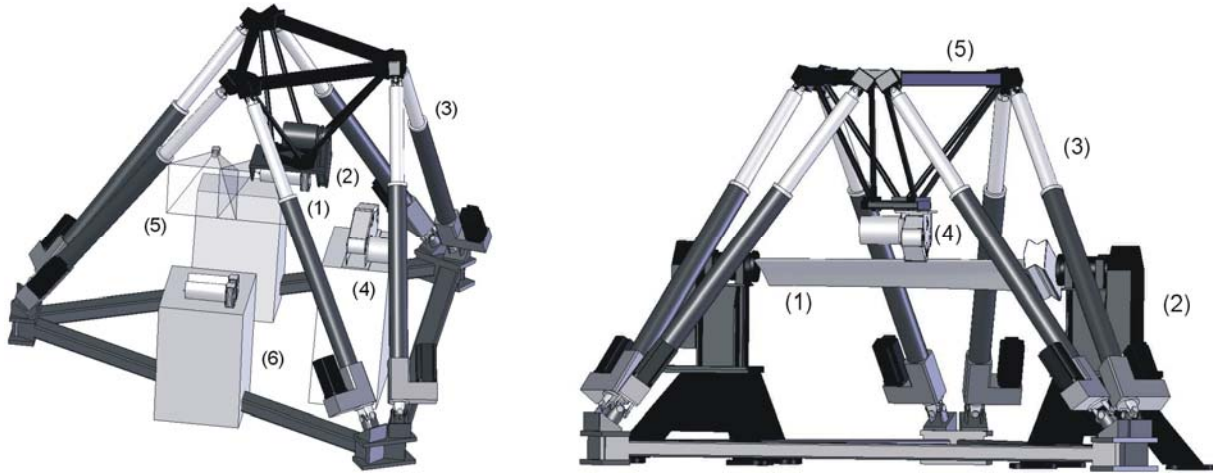
1. Nutzung der Eigenschaften einer Parallelkinematik:  
Bewegungsmöglichkeit in sechs Freiheitsgraden sowie relativ hohe Steifigkeit und Bewegungsgenauigkeit.
2. Integration der im Prozess ermittelten Bearbeitungskräfte in die modellgestützte Verfahrenssteuerung.
3. Integration optischer Messeinrichtungen.

*Bild 1* zeigt dafür mögliche prinzipielle Anordnungen und Konfigurationen. Darin sind:

- (1) Werkstück Turbinenschaufel,
- (2) Aufnahmeeinrichtung für die Turbinenschaufel,
- (3) Bewegungseinrichtung Parallelkinematik,
- (4) Schleifwerkzeug,
- (5) Anordnungsraum für die optische Messeinrichtung und
- (6) Bereitstellungsplatz für Werkstücke.

Bei beiden Ausführungen ist in die Aufnahme-Einrichtung eine aktive Drehachse integriert, so dass sieben Bewegungsachsen durch die Steuerung zu koordinieren sind. Bei kleineren Schaufeln bis ca. 360 mm Baulänge soll mit bewegtem Werkstück und stationär angeordneten Werkzeugen gearbeitet werden (*Bild 1 links*), bei größeren Werkstückabmessungen und entsprechend größeren Massen wird ein Aufbau mit bewegtem

Werkzeug und stationärem, nur mit der Drehachse verbundenem Werkstück favorisiert (*Bild 1 rechts*). Als Demonstrator diente die Ausführung in *Bild 1 links*.



*Bild 1: Konfigurationen einer Parallelkinematik für das Schleifen von Turbinenschaufeln;  
links: bewegtes Werkstück, rechts: bewegtes Werkzeug*

Das entwickelte Schleifzentrum weist folgende wesentlichen Merkmale auf:

- Erweiterung der Bewegungsmöglichkeit des Hexapod in sechs Freiheitsgraden um eine aktive Drehachse (360°) für den Schaufelrohling.
- Stationäre Anordnung von mehreren Schleifwerkzeugen mit unterschiedlicher Körnung im Arbeitsraum.
- Genaue Lagereferenzierung des Werkstückes in der Maschine mit optischen Messeinrichtungen.

## **Ergebnisse**

Im ersten Schritt wurden potentielle Anwender und realisierte Technologien analysiert. Weiterhin wurde eine Turbinenschaufel als Demonstrator ausgewählt (*Bild 2*) und weitere untersetzende Informationen zur manuellen Arbeitstechnologie sowie ein Muster einschließlich Aufnahme (Original-Spanneinrichtung des Herstellers) übergeben (*Bild 2 rechts*). Zur Präzisierung der Automatisierungstechnologien für die Demonstrator-Turbinenschaufel

wurde nach manuellem Test die Werkzeugauswahl getroffen. Es werden Bandschleifeinrichtungen und Schleifbänder unterschiedlicher Körnungen und Bindungen eingesetzt. Die Turbinenschaufel wird an der bewegten Hexapodplattform aufgenommen. Die zusätzliche Drehachse liegt horizontal an der Plattform. Die Werkzeuge sind ortsfest im Bewegungsraum angeordnet. Der Hexapod bewegt die Turbinenschaufel relativ zum jeweiligen Werkzeug. Für Schrupp- und Schlichtoperationen sowie für die verschiedenen Formelemente sind sechs verschiedene Werkzeuge erforderlich. In der Testphase wurde mit drei Arbeitsstationen begonnen, an denen unterschiedliche Schleifbänder und Schleifscheiben untersucht wurden.



*Bild 2: Sortiment Turbinenschaufeln (links)  
und Demonstratorschaufel mit Aufnahme (rechts)*

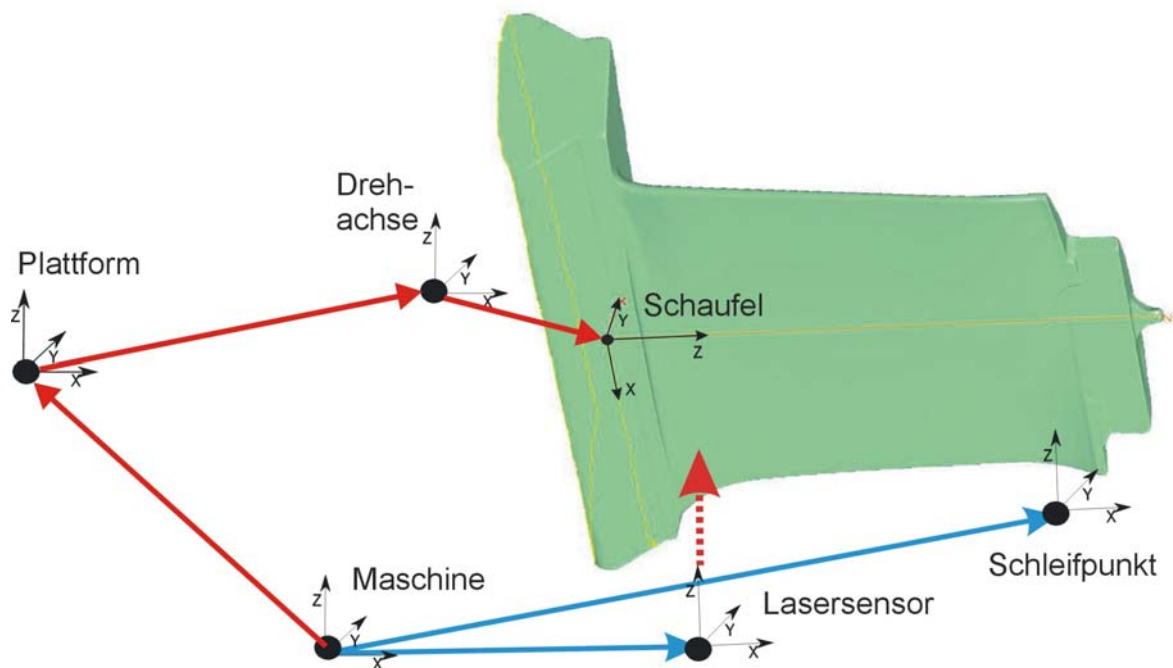
*Bild 3* zeigt die Realisierung für die siebente Achse, die aus Sicht der Steuerung eine redundante Drehachse darstellt. Merkmale sind eine kräftige Lagerung mit geringer Bauhöhe, geringe Auskragung bezogen auf die Plattform und eine zu den anderen sechs Bewegungsachsen analoge Antriebsstruktur (Stellmotor mit rotatorischem Messsystem und Zahnriemen).

Weiterhin ist in *Bild 3* die Anordnung der Schleifwerkzeuge im Arbeitsraum zu erkennen.



*Bild 3: Drehachse für die Turbinenschaufel (links)  
und deren Anordnung an der Plattform (rechts)*

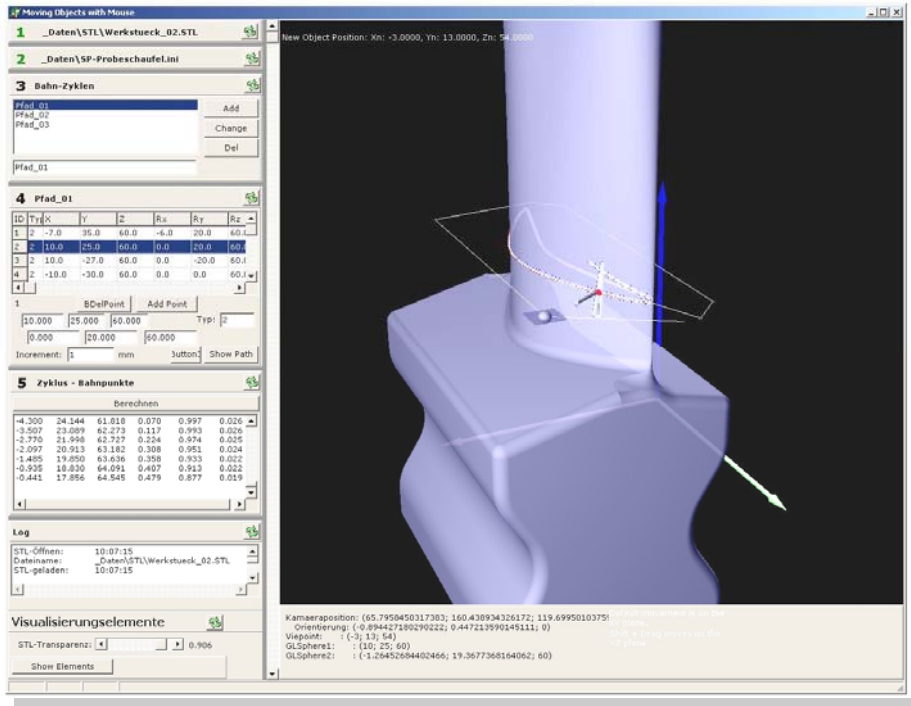
Zur Referenzierung der Turbinenschaufel im Arbeitsraum der Maschine wurden die Drehachse, die Schaufelaufnahme und die Turbinenschaufel mit Hilfe eines Punktlaserscanners eingemessen. Die entsprechenden Lagebezüge sind schematisch in *Bild 4* dargestellt.



*Bild 4: Lagebezüge der Turbinenschaufel an der Hexapod-Plattform*



Zur Erzeugung der Schleifbahn wurde eine Software (*Bild 5*) entwickelt, mit deren Hilfe aus einer gegebenen CAD-Geometrie der Turbinenschaufel die Kontaktkoordinaten des Schleifwerkzeuges an der Schaufeloberfläche sowie die daraus resultierenden Bewegungsvorgaben der Maschine abgeleitet werden.



*Bild 5: Bahnplanung für Schleifzyklen*

Die Anlage wurde abschließend in Betrieb genommen und alle zur Verfügung stehenden Turbinenschaufeln erfolgreich geschliffen (*Bild 6*). Damit sind die Voraussetzungen für eine Verifikation der erreichten Schleifergebnisse beim Hersteller geschaffen.



*Bild 6: Schleifvorgang*



## 4.5 AG Umformtechnik

### 4.5.1 Entwicklung und Bewertung von Simulationstechnologien für die Blechumformung unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Maschine/Werkzeug und Prozess/Werkstück

**Laufzeit** 01/2006 - 03/2011

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)  
SPP 1180 Prognose und Beeinflussung der Wechselwirkungen von Strukturen und Prozessen

**Bearbeiter** Dr.-Ing. Hajo Wiemer  
Dr.-Ing. André Hardtmann  
Dipl.-Ing. Lars Penter  
Dipl.-Ing. Sebastian Kriechenbauer

#### Zielstellung

Um bereits in der Planungsphase die Qualität und Wirtschaftlichkeit des Blechumformprozesses wesentlich verbessern zu können, müssen bei der Prozesssimulation praktisch relevante Einflüsse wie Stößelkipfung, Querversatz, Werkzeugdeformation, Hubzahlerhöhung, Auftreffstoß und Schnittschlag mit berücksichtigt werden.

Ziel des Vorhabens ist deshalb die Schaffung eines umformtechnischen Gesamtmodells, welches die Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen Maschine/Werkzeug und Prozess/Werkstück sowie deren wesentliche Einflussgrößen beschreibt. Es erweitert die Aussagefähigkeit der bisherigen Prozessanalyse, da es die Randbedingungen von Maschine und Werkzeug mit einbezieht, was beim derzeitigen Stand der Simulation aufgrund der isolierten Modellierung nicht realisiert wird.

Die Prognosefähigkeit des erweiterten Umformprozessmodells wird an einem Beispielwerkstück, welches begleitend zur Modellbildung in einer Experimentiereinrichtung gefertigt wird, untersucht und bewertet.

## Lösungsweg

- Modellierung der quasistatischen elastischen Maschineneinflüsse
- Modellierung der quasistatischen elastischen Einflüsse von Zieheinrichtungen und Werkzeugführungen
- Modellierung der quasistatischen elastischen Werkzeuginflüsse
- Entwicklung der Experimentiereinrichtung
- Modellberechnungen und begleitende Experimente
- Ergebnisdarstellung und -bewertung

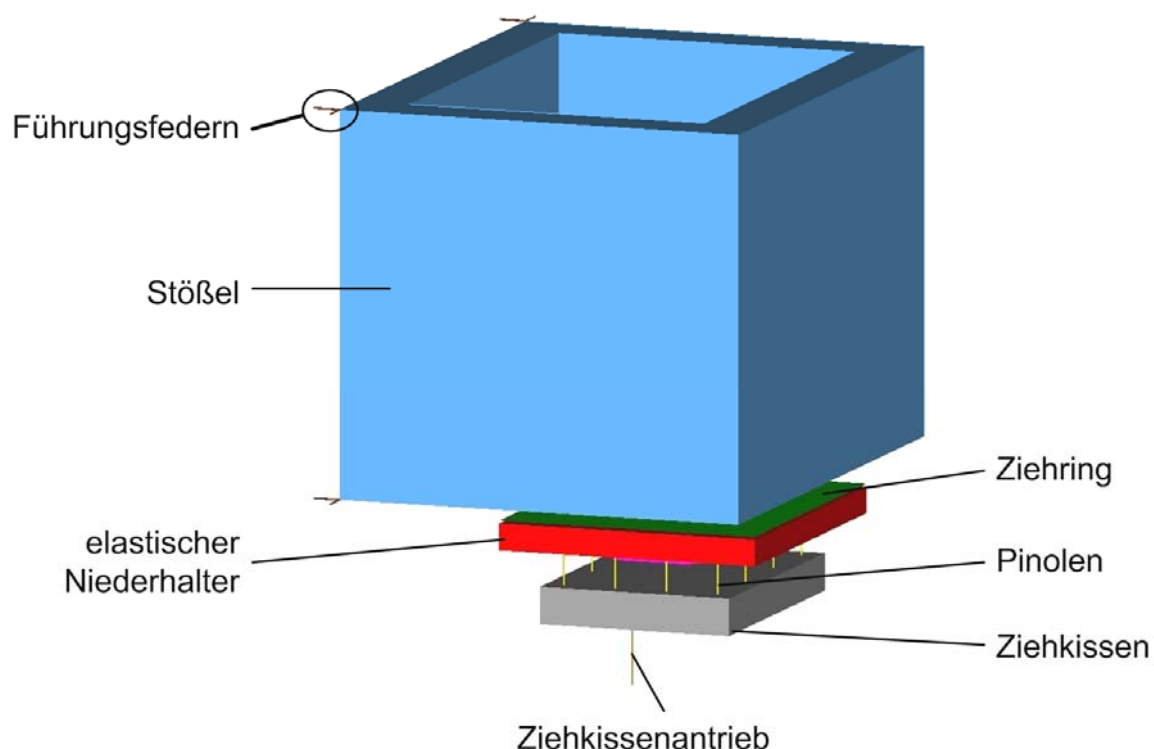
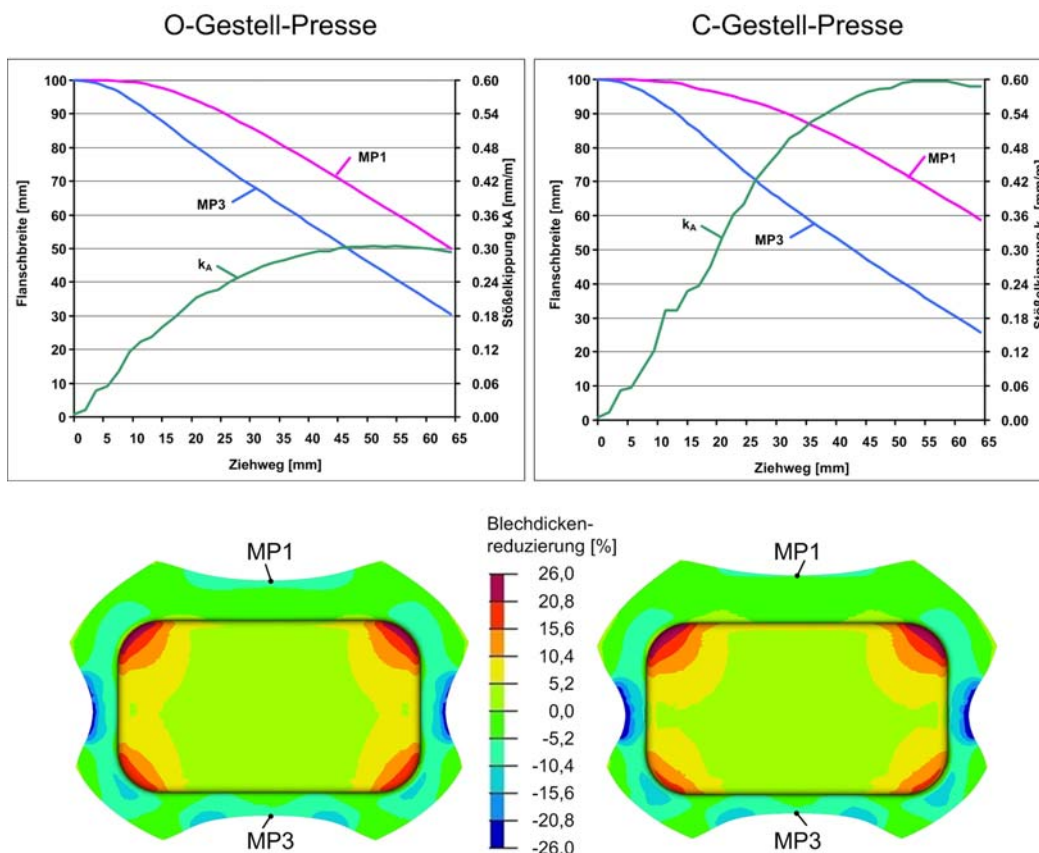


Bild 1: Erweitertes Prozessmodell einer C-Gestell-Pressen

## Ergebnisse

Ausgehend von den relevanten Einflüssen aus Werkzeug, Presse und Zieheinrichtung auf den Umformprozess wurden bei Variation der Pressenstruktur entsprechende Teilmodelle entwickelt, welche das bisherige FEM-Modell des Umformprozesses erweitern (*Bild 1*).

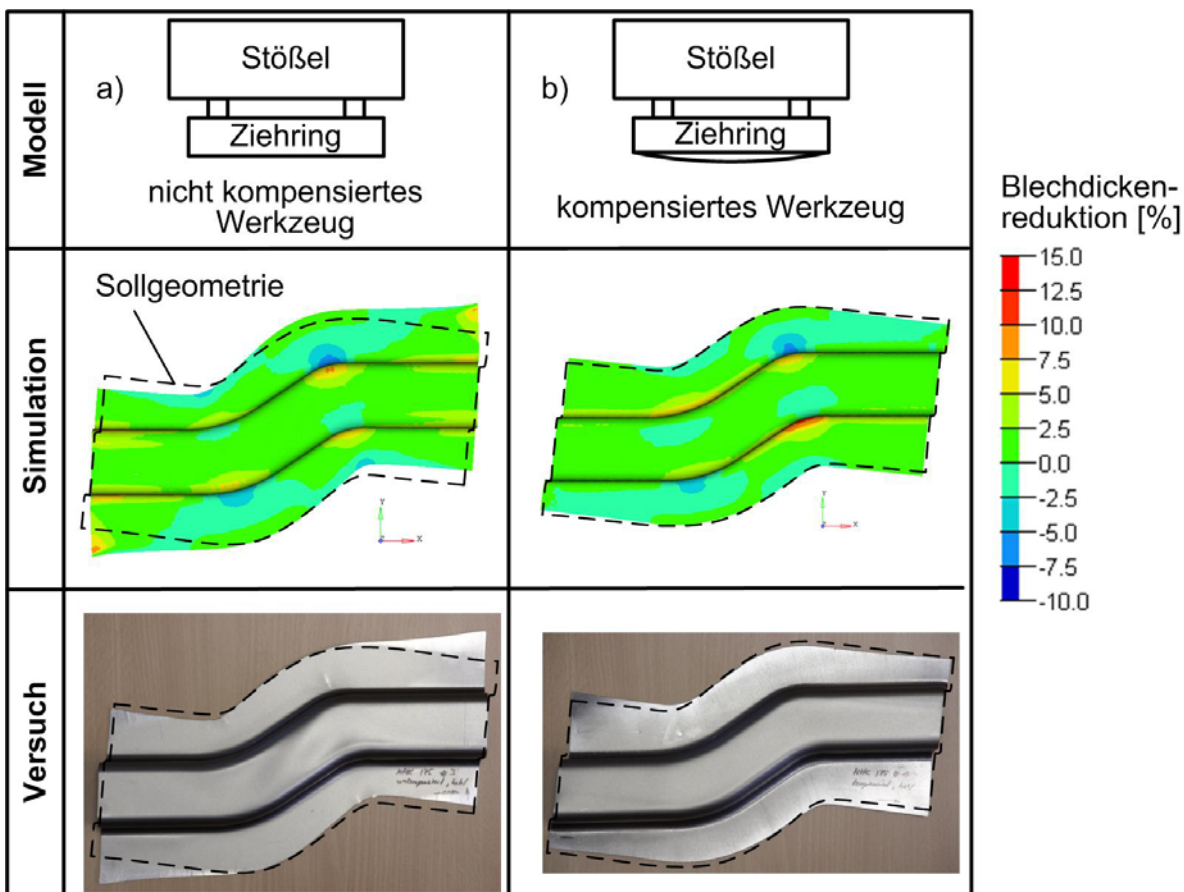
Der Vergleich der Simulationsergebnisse der erweiterten Umformprozessmodelle mit den Ergebnissen der bisherigen Modellierung zeigt, dass mit um die Einflüsse der Presse und Zieheinrichtung erweiterten Umformprozessmodellen maschinenbedingte Einflüsse auf das Ziehergebnis sichtbar gemacht werden können. Damit steht prinzipiell ein Gesamtmodell des Umformprozesses zur Verfügung, um sowohl Einflüsse unterschiedlicher Presseneigenschaften (*Bild 2*) als auch verschiedener Ziehkissenkonfigurationen und -einstellungen in der Prozessplanung zu berücksichtigen.



*Bild 2: Simulationsergebnisse des erweiterten Prozessmodells für zwei Pressenkonfigurationen*

Parallel zu den Arbeiten der Modellbildung wurde eine Experimentierumgebung zur experimentellen Validierung der Simulationsergebnisse entwickelt und gebaut. Beim Vergleich der Simulationsergebnisse mit denen der experimentellen Untersuchungen konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden.

Die Modellierung der elastischen Werkzeugeigenschaften wurde bei der Simulation der Umformung des Benchmarkteils "S-Rail" durchgeführt. Mithilfe eines entwickelten Kompensationsalgorithmus konnten die elastischen Verformungen bei der Werkzeuggestaltung so berücksichtigt werden, dass eine hinreichende Bauteilqualität erreicht wird (*Bild 3*).



*Bild 3: Vergleich der a) nicht kompensierten und b) kompensierten Ziehringgeometrie in Simulation und Experiment anhand der erzielten Werkstückgeometrie*

## 4.5.2 Untersuchung von Berechnungsmodellen und des Deformationsverhaltens für das inkrementelle Umformverfahren Axialprofilrohrwalzen (APRW)

**Laufzeit** 07/2008 - 03/2010

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dipl.-Ing. André Hardtmann

**Kooperation** TU Dresden, Institut für Festkörpermechanik  
TU Dresden, Institut für Formgebende  
Fertigungstechnik

### Zielstellung

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Weiterentwicklung, Erprobung und Validierung der in der ersten Antragsphase am Institut für Festkörpermechanik (IFKM) entwickelten Berechnungsverfahren für das Umformverfahren Axialprofilrohrwalzen (APRW). Voraussetzung bilden Auswahl, Bewertung und Validierung geeigneter FE-Modelle unter dem Aspekt der speziellen Anforderungen des APRWs. Dazu sind die bisherigen Modelle hinsichtlich ihrer Realitätsnähe und ihrer Prognosefähigkeit weiter zu optimieren. Zu diesem Zweck sind zur Vereinfachung angenommene Randbedingungen und Symmetrieeigenschaften auf ihre Zulässigkeit hin zu überprüfen, ggf. aufzuheben und durch geeignetere zu ersetzen.

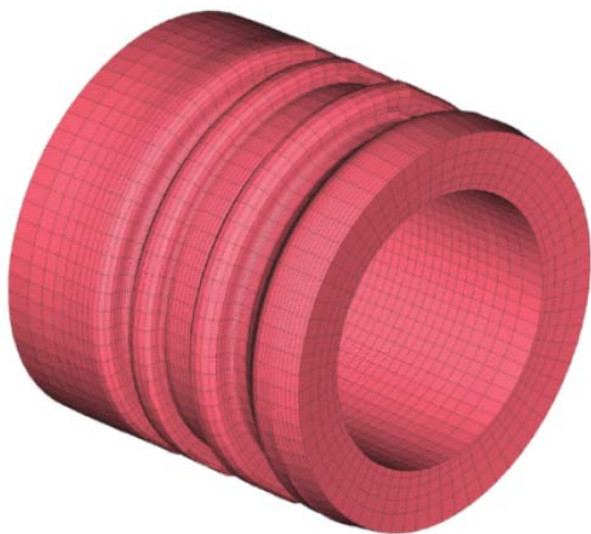
Weiterer zentraler Untersuchungsschwerpunkt ist die Modellierung komplizierter geometrischer Profileigenschaften einschließlich der Untersuchung von deren Auswirkungen vor allem auf die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse sowie auf Rechengeschwindigkeit und Speicherbedarf.

Um die Genauigkeit und Prognosefähigkeit des FEM-Prozessmodells entscheidend zu verbessern, müssen diese elastischen Randbedingungen in einem umformtechnischen Gesamtmodell berücksichtigt werden. Vorhandene Ansätze sind auf ihre Übertragbarkeit und Anwendbarkeit für die Simulation des

APRWs zu prüfen und zu bewerten. Mit einem ausgewählten Ansatz wird ein umformtechnisches Gesamtmodell für das APRW zur Simulation der elasto-statischen Einflüsse aus Maschine und Werkzeug erstellt und bewertet.

## Lösungsweg

- Weiterentwicklung und Optimierung des FE-Modells zum APRW
- Modellierung komplizierter Profilgeometrien - Vernetzungsstrategien (*Bild 1*)
- Parameteridentifikation für das Fließ- und Reibverhalten bei großen lokalen plastischen Dehnungen
- Qualifizierung des Prozessmodells durch Berücksichtigung elasto-statischer Maschinen- und Werkzeugeinflüsse



*Bild 1: Kontursensitives Remeshing bei der Simulation des APRW*

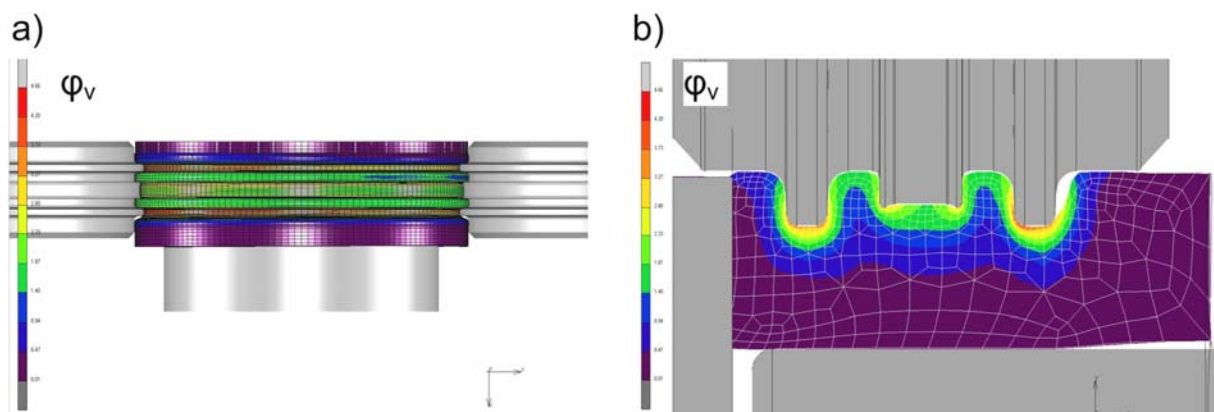
## Ergebnisse

Wie bei allen inkrementellen Umformverfahren erfordert das Ringwalzen lokal an der Kontaktstelle eine sehr feine Diskretisierung, während für den Restkörper eine sehr grobe Unterteilung ausreicht. Die Anwendung der in kommerziellen Programmsystemen implementierten Substrukturtechniken für lineare Superelemente war in der ersten Antragsphase nicht erfolgreich, da - bedingt durch die ständige örtliche Änderung der



Kontakt- und damit der Umformzone - der Berechnungsaufwand zur Kondensation der Steifigkeitsmatrix des gerade in Umformung befindlichen Rohrsegmentes auf die externen Elementfreiheitsgrade größer ist als bei einem vollständig fein diskretisierten Modell. In diesem Arbeitspunkt wird die Senkung der Elementanzahl durch intelligente Vernetzungsstrategien als Lösungsansatz gesehen. Durch die Festlegung von definierten Zonen feinerer Neuvernetzung, werden in der Kontakt- bzw. Umformzone die kleinen Elementgrößen verwendet, die zur Berechnung der lokalen plastischen Verformungen und damit der resultierenden Geometrien notwendig sind.

Im erarbeiteten Demonstrationsmodell wurde hierzu eine neue Vernetzungsstrategie "Template Ring Meshing" (*Bild 1*) erfolgreich zur Anwendung gebracht. Diese Technologie war entscheidend, um bei der Simulation des Walzens von Getrieberingen (*Bild 2*) die Rechenzeit je nach Größe und Detaillierungsgrad um ca. 50 % zu senken.



*Bild 2: Simulation des Werkstoffflusses beim APRW/WE einer Schaltmuffe*

*a) Draufsicht, b) Schnitt in XY-Ebene*

Für ein ganzheitliches Simulationsmodell ist die Verkopplung der Teilsysteme Maschine und Prozess erforderlich. Zur Modellierung relevanter Maschineneigenschaften wurde die quasistatische Kopplung von FEM-Prozessmodell und Maschinenmodell gewählt (*Bild 3*). Diese Kopplungsstufe stellt die Erweiterung des FEM-

Prozessmodells - im Sinne eines integrierten FEM-Modells - durch Beruckichtigung der statischen Maschineneigenschaften (als reduzierte, ersetzende Beschreibung) in direkter Rückwirkung auf die geometrischen Randbedingungen der FEM-Simulation dar.

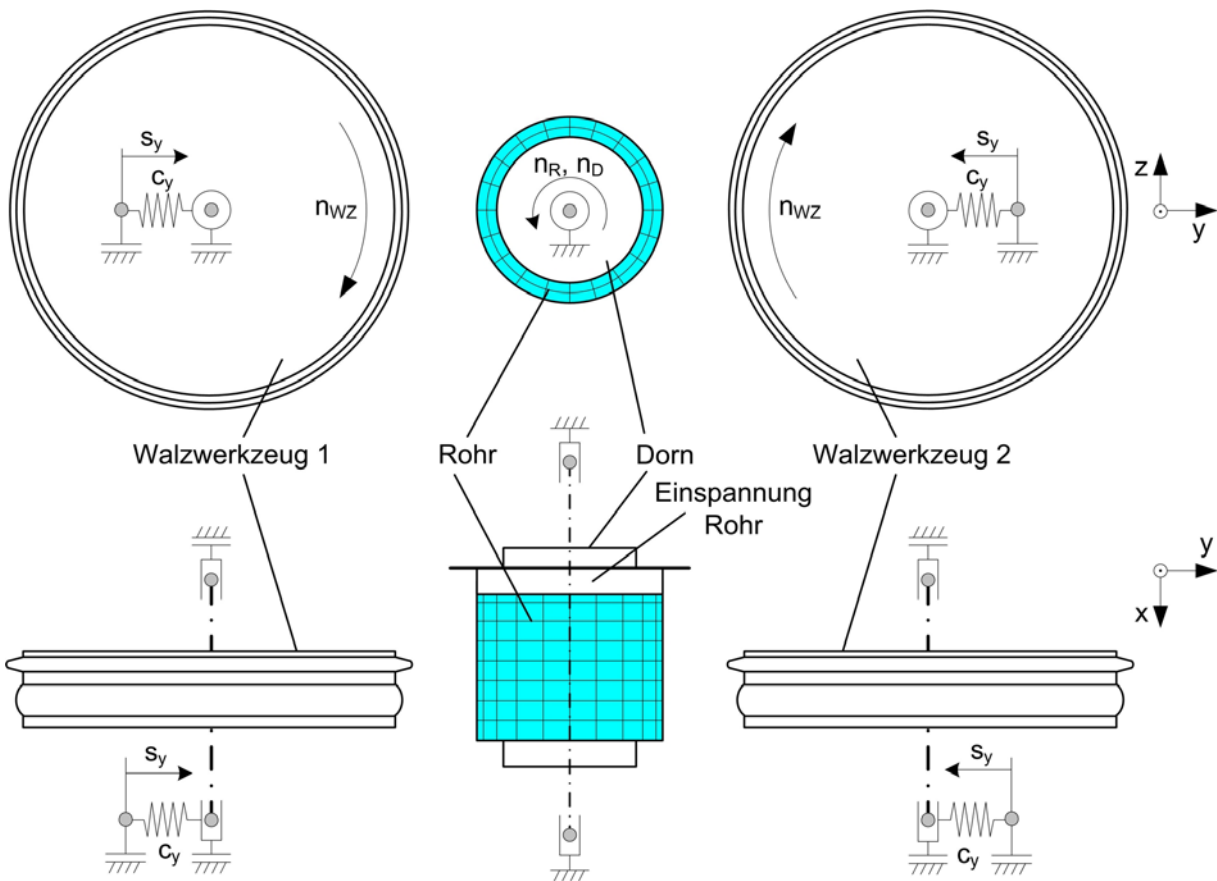


Bild 3: Erweiterte Prozessmodellierung des APRW/WE

Beispielhaft wurde am Simulationsmodell für die Herstellung eines Kugellagerinnenringes der Einfluss des elasto-statischen Verhaltens, d. h. der Auffederung der Walzvorruchung, auf den Werkstofffluss demonstriert. Hinsichtlich der realitätsnahen Ermittlung des für eine vollständige Profilausfullung notwendigen Walzenvorschubs konnte die Modellgenauigkeit wesentlich verbessert werden.

### 4.5.3 CAE-Methoden in der Einarbeitungsphase der Blechumformung

**Laufzeit** 10/2008 - 12/2010

**Finanzierung** BMWi  
über die Arbeitsgemeinschaft industrieller  
Forschungsgemeinschaften "Otto von Guericke"  
(AiF), Europäische Forschungsgesellschaft für  
Blechverarbeitung e. V. (EFB)

**Bearbeiter** Dr.-Ing. André Hardtmann  
Dipl.-Ing. Sebastian Kriechenbauer

**Kooperation** Dr.-Ing. Dietmar Süße  
TU Dresden, Institut für Festkörpermechanik  
(IFKM)  
Dr.-Ing. Christine Schöne  
TU Dresden, Institut für Maschinenelemente und  
Maschinenkonstruktion (IMM)

#### Zielstellung

An die Maßhaltigkeit von umgeformten Blechteilen und damit an die Werkzeugqualität werden ständig höhere Anforderungen gestellt. Ursachen für Maßabweichungen, die letztlich meist zur Nacharbeit an den Umformwerkzeugen führen, resultieren maßgeblich aus den elastischen Maschinen- und Werkzeuginflüssen. Diese Einflüsse werden in der derzeit üblichen Werkzeugauslegung nicht berücksichtigt, was mit großer Wahrscheinlichkeit die zur Nacharbeit führenden Differenzen zwischen CAD- und eingearbeiteter Geometrie des Werkzeuges verursacht.

Im Bereich des Werkzeugbaus werden zudem Potenziale zum schnelleren Serienanlauf und zur Kostensenkung in der Verkürzung des Einarbeitungsprozesses gesehen. Deshalb stehen Forderungen nach entsprechender Absicherung der Werkzeugkonstruktion mittels einer prognosesicheren und damit notwendig qualitativ erweiterten numerischen Simulation. Dieses Ziel soll im Vorhaben durch den Ansatz erreicht werden,

wesentliche bisher notwendige "Nacharbeiten" vorab in der Werkzeugplanungsphase im Virtuellen zu berechnen und damit bereits bei der Herstellung des "Rohwerkzeuges" zu berücksichtigen. Die Geometrie des Rohwerkzeuges soll damit wesentlich näher an der des Fertigwerkzeuges liegen. Damit soll der notwendige Nacharbeitsaufwand verringert werden (Bild 1).

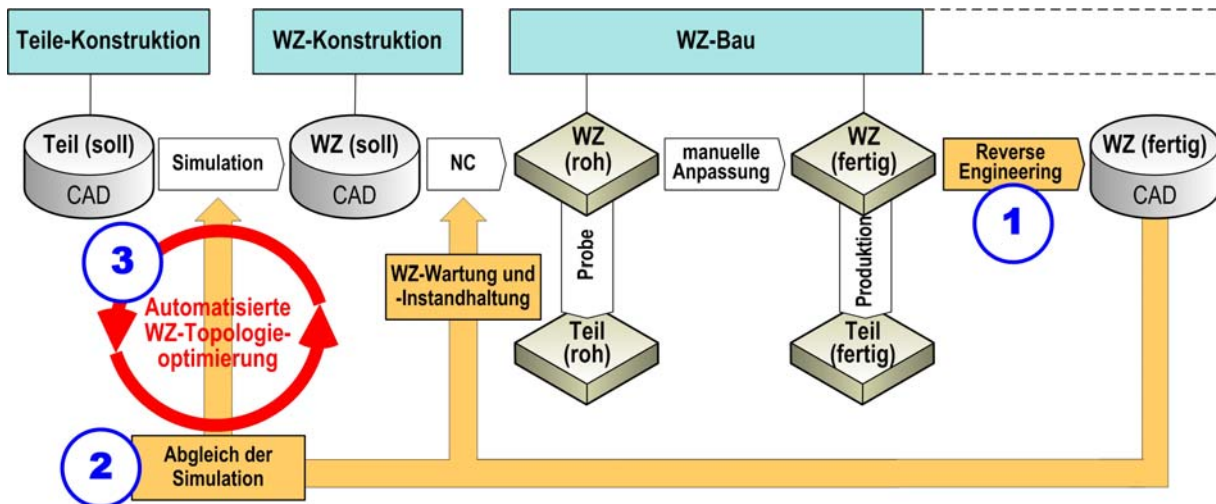


Bild 1: Ablauf vom Blechteil bis zum fertigen Umformwerkzeug und Einordnung der Forschungsschwerpunkte

1. Reverse Engineering zur Rückführung von Messdaten
2. Abgleich und Nachrechnung mit der Simulation und
3. Automatisierte Anpassung der Werkzeugtopologie (virtuelles Tuschieren)

## Lösungsweg

Lösungsansatz ist die Verknüpfung der Umformprozesssimulation unter Berücksichtigung der Maschineneinflüsse mit innovativer Mess- und Auswertetechnik, um die der Simulation zugrunde liegenden Modelle weiterzuentwickeln und damit die Einarbeitung von Umformwerkzeugen wissenschaftlich durchdringen und effektivieren zu können. Das bedeutet:

- Mittels Reverse Engineering soll die "erweiterte Methodenplanung" am realen Einarbeitungsprozess nachgewiesen werden, was bisher nicht erfolgte.
- Mit dem Vergleich der Simulations- und Messergebnisse wird die Realitätsnähe der untersuchten Modelle bewertet.

- Mit der Weiterentwicklung von zur Rückfederungskompensation verwendeten Optimierungsalgorithmen auf die Problematik der Werkzeugeinarbeitung soll die Anpassung der Werkzeugtopologie durch neue Softwarefunktionalität automatisiert ablaufen.

Schwerpunkt der Arbeiten am IWM ist die Weiterentwicklung der FEM-basierten Prozesssimulation zum Umformprozess.

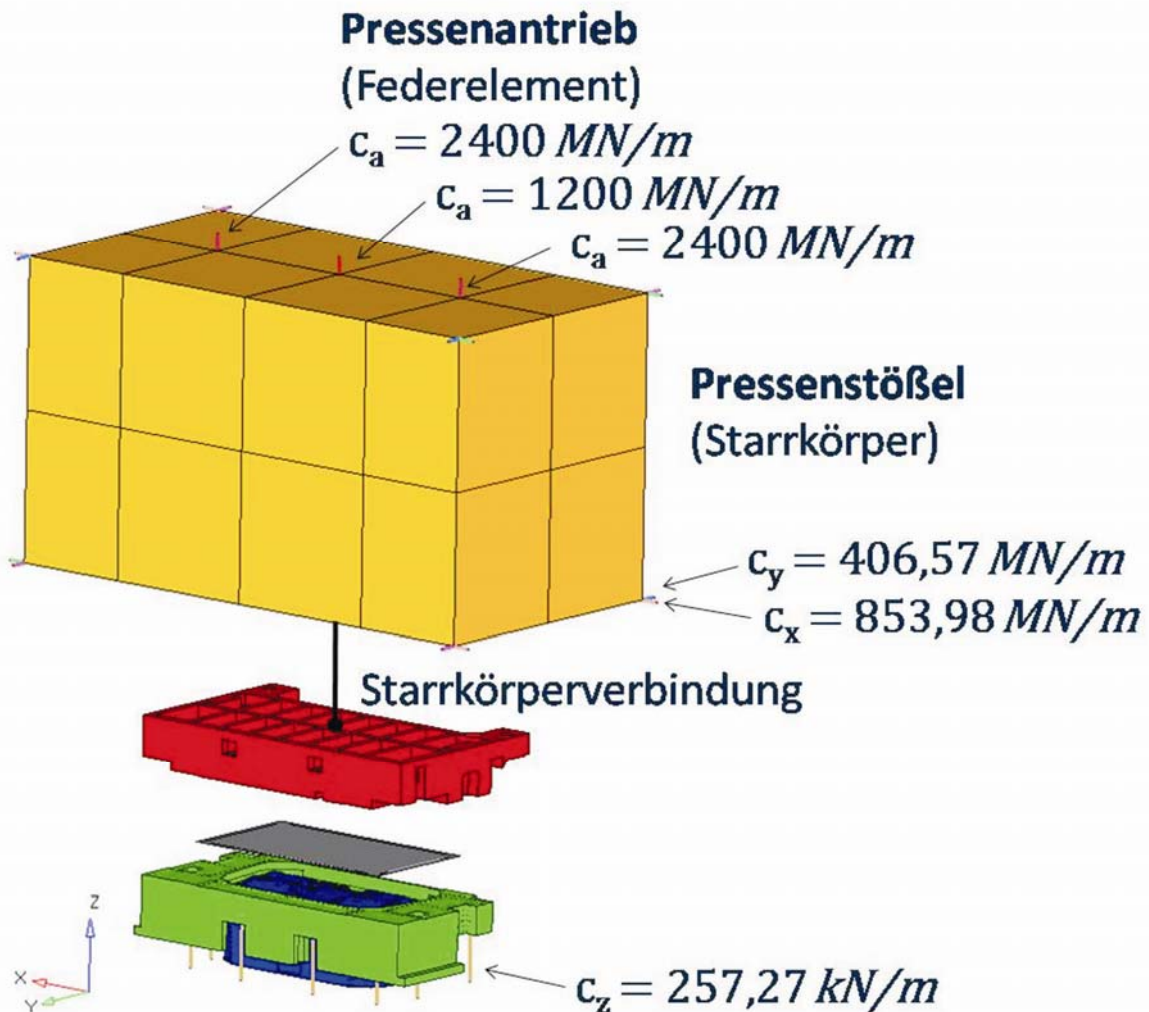
## **Ergebnisse**

Das Vorhaben leistet für die Weiterentwicklung der Simulation von Umformprozessen einen wichtigen Beitrag zur Ermittlung von Randbedingungen und technologischen Parametern bei der Werkzeugentwicklung. Damit kann eine hohe Prozesssicherheit und ein hohe Qualität in Bezug auf die Maßhaltigkeit des umgeformten Bleches gewährleistet werden. Mit einer verbesserten Prognosefähigkeit bei Simulation von Blechumformprozessen kann die Zeit bis zum Serienanlauf verkürzt werden, da der manuelle Aufwand bei der Werkzeugeinarbeitung vermindert wird.

Es wurde eine Methode zur Berücksichtigung von elastischen Werkzeugen bei der Umformsimulation vorgestellt, mit der Rechenzeit eingespart werden kann ohne die Ergebnisgenauigkeit signifikant einzuschränken. Die Methode hat den Vorteil, dass Wirkflächen der Werkzeuge bei der Modellerstellung unkompliziert ausgetauscht oder verändert werden können, ohne dass eine aufwändige Neuvernetzung des gesamten Werkzeuges notwendig ist.

Für die Berücksichtigung der genauigkeitsbestimmenden Einflussgrößen wurde das FEM-Prozessmodell um die elastostatischen Werkzeug- und Maschineneigenschaften erweitert. Dazu wurden reduzierte Modellansätze verwendet, die das reale Verhalten ausreichend genau beschreiben. Die vollständige Modellerweiterung umfasst auch die Abbildung realer Werkzeugwirkflächen durch optische Flächenmessdaten im FEM-Prozessmodell. Dadurch können Effekte der manuellen Werkzeugeinarbeitung und Verschleißerscheinungen im Produk-

tionsprozess bei der Simulation berücksichtigt werden. Das erweiterte Prozessmodell mit der Parametrierung der genauigkeitsbestimmenden Kenngrößen der Pressmaschine nach DIN 55189 ist in *Bild 2* dargestellt.

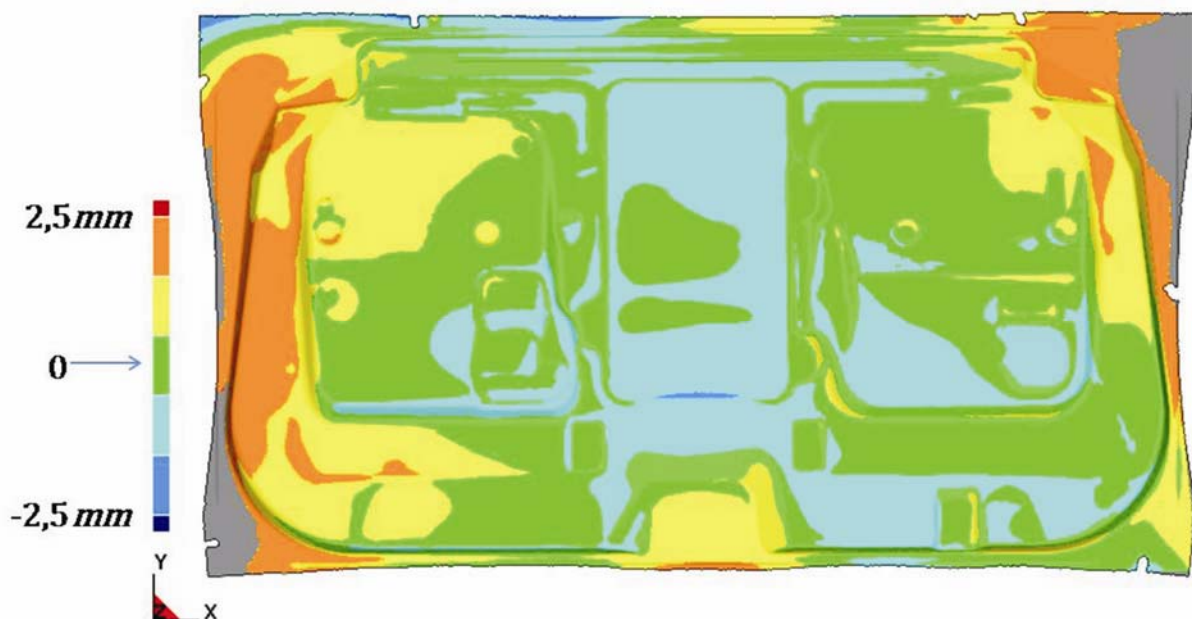


*Bild 2: Erweitertes FEM-Prozessmodell mit Berücksichtigung der elasto-statischen Eigenschaften von Maschine und Werkzeug nach DIN 55189*

Die entwickelten Prozessmodelle wurden an einem Praxisbauteil verifiziert. Dabei konnte mit jeder Modellerweiterung die Abweichung zum realen Umformergebnis vermindert werden. Der flächenhafte 3D-Vergleich (*Bild 3*) zwischen dem Ergebnis des vollständig erweiterten Prozessmodells und dem gemessenen Realbauteil zeigt eine gute Übereinstimmung.



Im FEM-Prozessmodell wurden elasto-statische Werkzeug- und Maschineneigenschaften berücksichtigt sowie die Werkzeugoberfläche durch optische Messdaten abgebildet. Durch die relativ geringe Abweichung beim 3D-Vergleich wird die Notwendigkeit und Effektivität der erweiterten FEM-Prozessmodelle nachgewiesen. In weiteren Forschungsarbeiten sind jedoch die Methoden zur Modellerstellung effizienter zu gestalten.



*Bild 3: 3D-Vergleich zwischen optischer Messung und Simulationsergebnis des vollständig erweiterten Prozessmodells mit eingescannten Wirkflächen am rückgefederten Bauteil*

#### 4.5.4 Simulation von Ziehkisseneinflüssen im FEM-Prozessmodell

**Laufzeit** 04/2009 - 03/2011

**Finanzierung** BMWi  
über die Arbeitsgemeinschaft industrieller  
Forschungsgemeinschaften "Otto von Guericke"  
(AiF), Europäische Forschungsgesellschaft für  
Blechverarbeitung e. V. (EFB)

**Bearbeiter** Dipl.-Ing. Lars Penter

**Kooperation** Dipl.-Ing. Harald Lohse  
TU Dresden, Institut für Fluidtechnik (IFD)

#### Zielstellung

Ziel dieses Projektes ist es, die Teilmodelle Prozess, Ziehkissenmechanik und das reduzierte Modell der Ziehkissenhydraulik, -steuerung und -regelung in einer FEM-Umgebung zusammenzuführen und damit deren Einfluss auf die Teilequalität mittels Prozesssimulation berechnen und bewerten zu können.

#### Lösungsweg

Im Verlauf der Projektbearbeitung sollen zunächst die Teilmodelle der Ziehkissenmechanik erstellt, parametrisiert und evaluiert werden. Anschließend soll ein reduziertes Signalmodell der Ziehkissenhydraulik, -steuerung und -regelung mittels eines selbstprogrammierbaren Materialmodells in eine FEM-Umgebung implementiert werden. Das reduzierte Signalmodell wird vom Projektpartner erstellt, parametrisiert und mit Messwerten abgeglichen.

*Bild 1* illustriert die Teilmodelle und stellt deren wesentliche Merkmale dar.

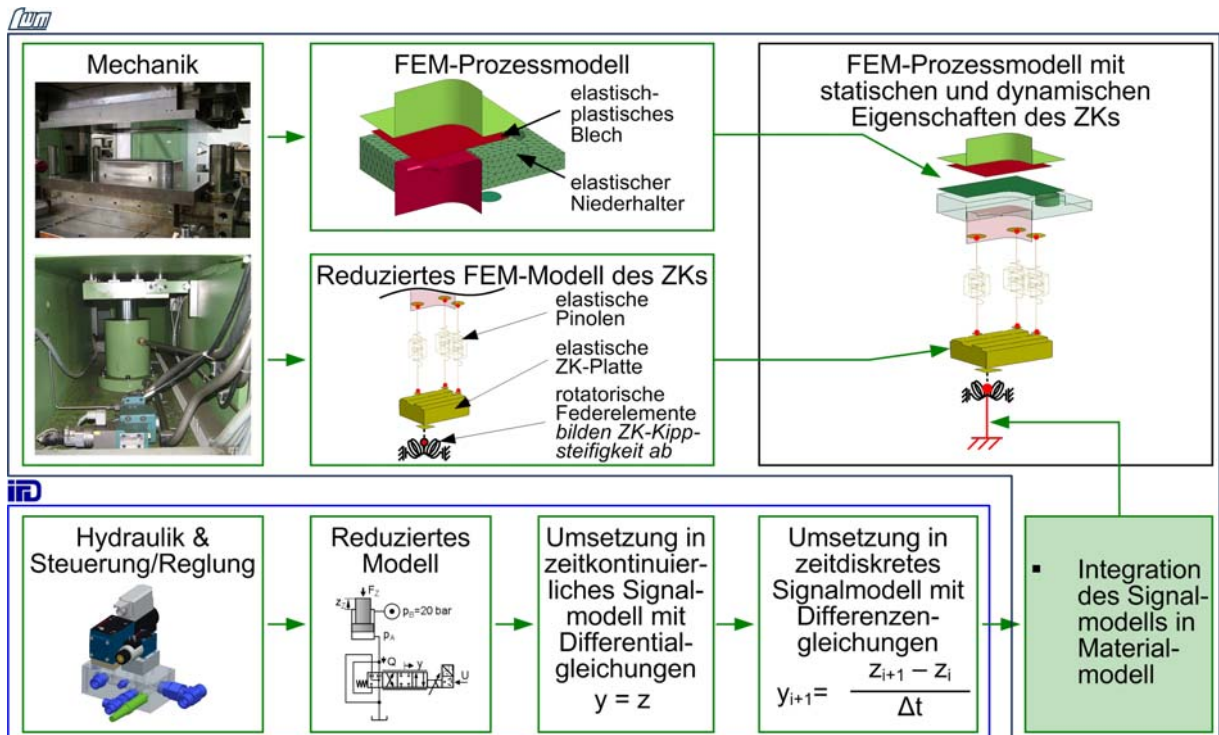


Bild 1: Zusammenführung der Teilmodelle zu einem Gesamtmodell in der FEM-Prozesssimulation

## Ergebnisse

Das neue Materialmodell Hydraulik-Steuerung-Regelung (HSR-Modell) ist für diskrete Balkenelemente konzipiert. Es wurde in der Programmiersprache FORTRAN erstellt und mit dem FEM-Code LS-DYNA verschmolzen. Damit ist es als eigenständiges Materialmodell in dieser FEM-Umgebung verfügbar. Die dazugehörigen Materialparameter (z. B. Kolbenflächen, Volumen, Öl-Kompressionsmodul, Reglerverstärkungen) werden über eine entsprechende Materialkarte im Pre-Prozessor definiert.

Bild 2 rechts zeigt den Aufbau des FEM-Modells zur Evaluierung des neuen Materialmodells. Ziehring und Niederhalter sind als Starrkörper modelliert und besitzen einen Freiheitsgrad in z-Richtung. Das Blech dient zur Formulierung des Kontaktes zwischen den beiden Starrkörpern.

In Bild 2 links sind die berechneten Verläufe der Niederhalterkraft für einen Beispielhub der Pressmaschine ohne Werkstück mit einem vorgegebenen Sprung der Sollkraft von 200 kN auf 250 kN dargestellt. Die Übereinstimmung der Niederhalterkraftverläufe

zeigt die Funktionsfähigkeit des in die FEM-Umgebung integrierten Modells der Zieheinrichtung.

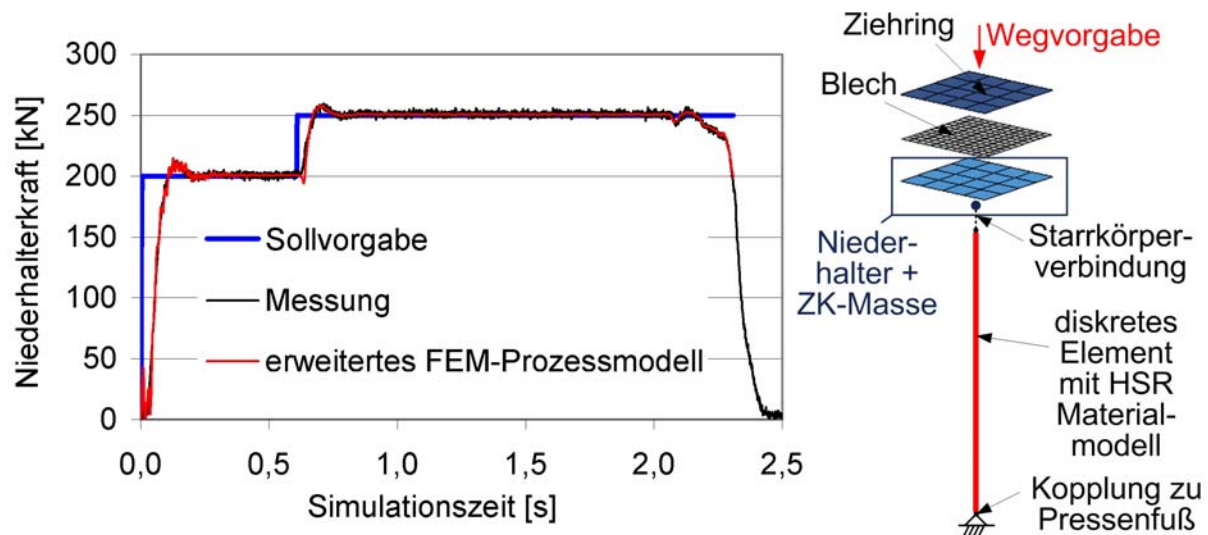


Bild 2: links: Niederhalterkraftverlauf für Messung u. FEM-Modell, rechts: FEM-Modell mit Eigenschaften der Ziehkissenhydraulik, -regelung und -steuerung

In einem weiteren Schritt wurde das HSR-Modell in ein FEM-Tiefziehprozessmodell integriert.

Bild 3 rechts zeigt den Aufbau des FEM-Prozessmodells. Dabei wurde aus Gründen der Recheneffizienz die doppelte Symmetrie des Werkzeuges ausgenutzt.

In Bild 3 links sind die Verläufe der Niederhaltersollkraft und -istkraft sowie die Positionen von Stößel und Niederhalter dargestellt.

Deutlich wird, dass mit dem neuen Modell auch der Auftreffschlag des Ziehringes auf den Niederhalter und die damit verbundene Kraftüberhöhung in der Kontaktzone simuliert werden kann.

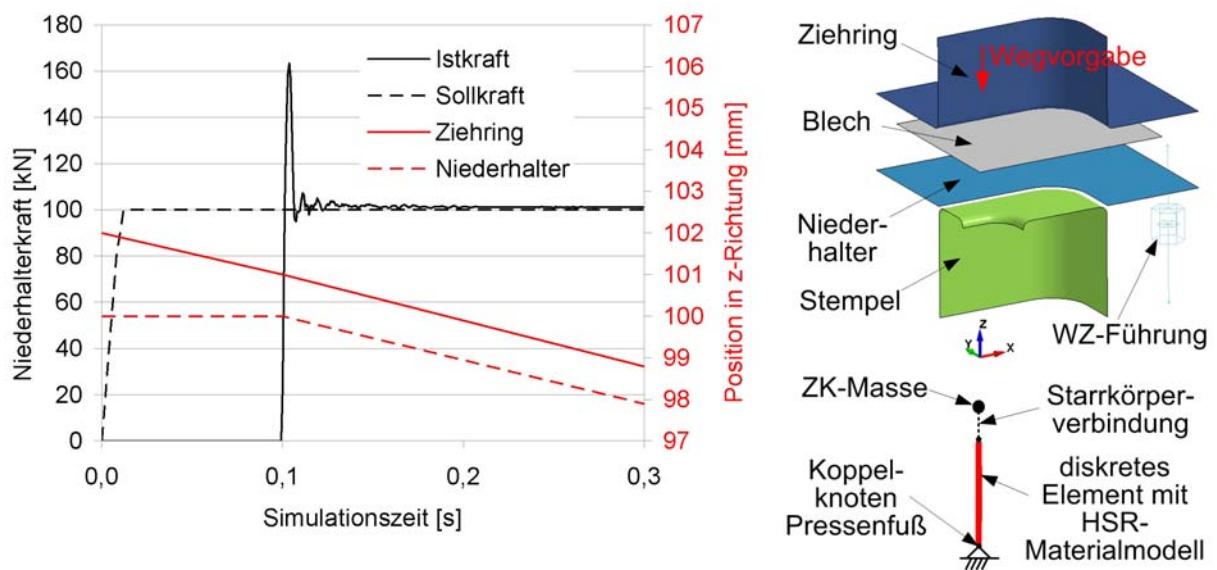


Bild 3: links: simulierter Niederhalterkraftverlauf während Auftreffstoß, rechts: FEM-Modell

## 4.5.5 Modellverarbeitungsprozess für eine effektive endkonturnahe Fertigung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen - EFFEKT

### Teilprojekt Preformhandling

<b>Laufzeit</b>	04/2009 - 03/2011
<b>Finanzierung</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
<b>Bearbeiter</b>	Dipl.-Ing. Mirko Riedel Dipl.-Ing. Christian Friedrich Dipl.-Ing. Christer-Clifford Schenke
<b>Kooperation</b>	Produktionstechnisches Zentrum Dresden (ProZeD)

### Zielstellung

Das interdisziplinäre Forschungsprojekt erarbeitet einen neuartigen Fertigungsprozess für die Herstellung von dreidimensionalen Bauteilen aus Hybridgarn-Textil-Thermoplast (HGTT)-Halbzeugen. Dabei wird das endkonturnahe Fertigteil durch Heißpressen direkt aus einer textilen Preform erzeugt und somit auf den bisher üblichen Zwischenschritt der Organoblechherstellung verzichtet. Als Demonstratorbauteil wurde ein Federdom ausgewählt.

Das Teilprojekt Preformhandling am IWM befasst sich - im Rahmen der Gestaltung und Umsetzung einer automatisierten Prozesskette - mit der Entwicklung, Konstruktion und Inbetriebnahme der Anlagentechnik zur Herstellung der Preform sowie zur Handhabung der biegeschlaffen Preform und des konsolidierten, biegesteifen Fertigteils.

### Lösungsweg

Die Prozesskette (*Bild 1*) gliedert sich in die Herstellung der textilen Preform aus der Rollenware sowie der anschließenden Umformung und Konsolidierung der Preform zum endkontur-



nahen Fertigteil. Entsprechend dieser Struktur ist der Prozess am IWM in zwei getrennten Bearbeitungszentren (BAZ) umgesetzt.

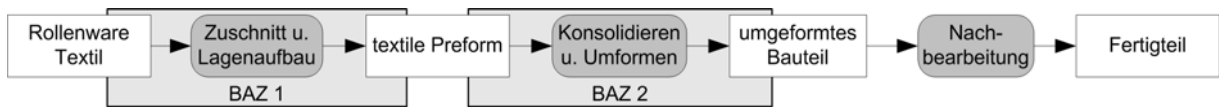


Bild 1: Ablauf des Gesamtprozesses

Im BAZ 1 erfolgt nach Zustellung des Materials durch die Abzugseinrichtung von der Rolle auf den Schneidrost zunächst der Zuschnitt der Einzellagen mit einem Plasmabrenner. Durch die hohen Temperaturen beim Schneidvorgang wird das Material an den Schnittkanten angeschmolzen und ein Vereinzeln der Gewebebestandteile bei der Handhabung vermieden. Die Handhabung der Einzellagen sowie der fertigen Preform erfolgt mit Vakuumsauggreifern. Durch entsprechend große Öffnungsquerschnitte der Sauger kann ein ausreichend hoher Volumenstrom erreicht und das luftdurchlässige Textil prozesssicher gegriffen werden. Nach dem Stapeln zur Preform und dem Abtransport des Verschnittes durch den umlaufenden Schneidrost erfolgt als letzter Prozessschritt das Fixieren aller sechs Einzellagen mit einem Ultraschallschweißgerät. Die Preform kann somit als Ganzes in weiteren Prozessschritten gehandhabt werden.

Plasmabrenner, Vakuumsauger und Ultraschallschweißgerät können an der Plattform des Hexapod befestigt werden. So ist ein zeitaufwendiger Werkzeugwechsel unnötig und dadurch eine Minimierung der Prozesszeit möglich. Bild 2 veranschaulicht den Prozess im BAZ 1 und die zugehörigen Werkzeuge.

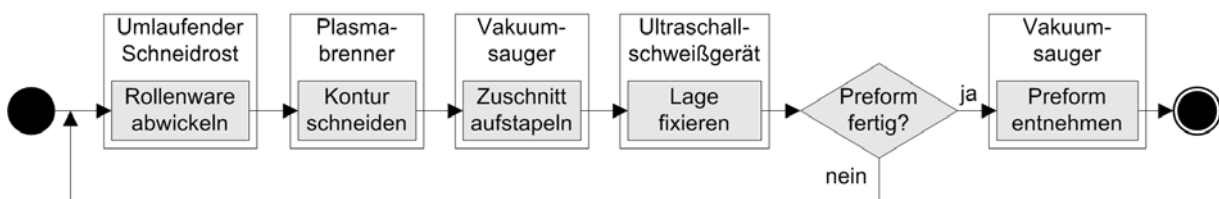
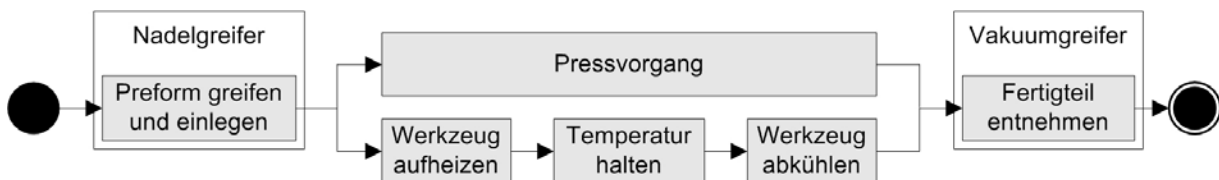


Bild 2: Ablauf der Preformherstellung im BAZ 1

Im BAZ 2 wird aus der textilen Preform durch Heißpressen das Fertigteil hergestellt. Die Anforderungen liegen hier - neben dem Pressprozess selbst - hauptsächlich in der Handhabung der biegeschlaffen Preform und des biegesteifen Fertigteils. In beiden Zuständen muss das Werkstück prozesssicher gegriffen werden, um eine präzise Positionierung der Preform im Werkzeug und das zuverlässige Abnehmen des Fertigteils zu gewährleisten. Die Arbeitsschritte von Industrieroboter und Presse sind durch eine übergeordnete Steuerung koordiniert.

Mittels einer Zustelleinrichtung wird die Preform vor jedem Pressvorgang positioniert. Nadelgreifer stellen beim Greifen der Preform sicher, dass alle Lagen durch das Greifersystem gehalten werden und das genaue Positionieren der Preform im Werkzeug möglich ist. Nach dem Pressen wird das fertige Bauteil mit Vakuumsauggreifern aus dem Werkzeug entnommen und auf einem Fertigteilstapel abgelegt. In *Bild 3* ist der Prozessablauf im BAZ 2 dargestellt.



*Bild 3: Ablauf der Fertigteilherstellung im BAZ 2*

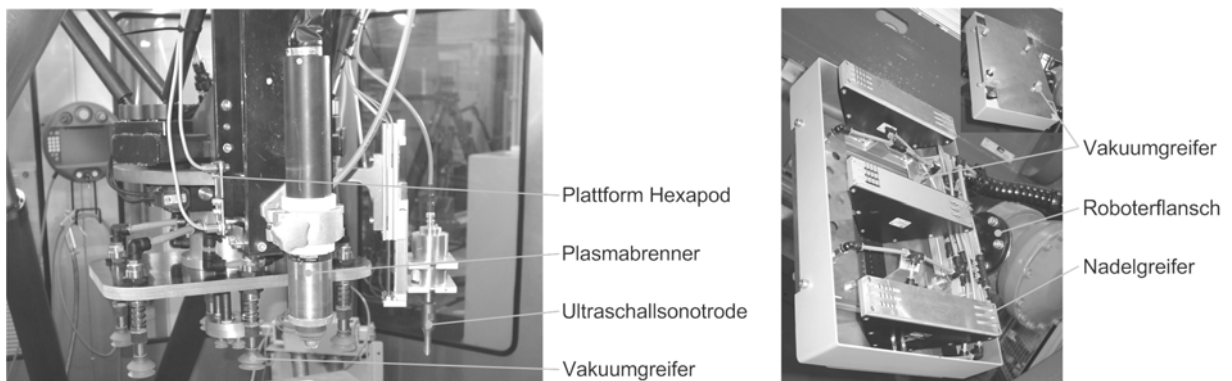
Auch am BAZ 2 werden die Greifersysteme so ineinander verschachtelt, dass ein Werkzeugwechsel vermieden werden kann und eine sehr geringe Bauhöhe erreicht wird. Dadurch ist das Einlegen der Preform ohne vorhergehendes Ablegen des Fertigteils möglich, was zu einer Minimierung der Prozesszeit beiträgt.

## Ergebnisse

*Bild 4* zeigt die im Forschungsprojekt aufgebauten Bearbeitungszentren, in *Bild 5* sind die jeweiligen Werkzeugplattformen dargestellt.



*Bild 4: Bearbeitungszentren  
links: Preformherstellung (BAZ 1),  
rechts: Fertigteilherstellung (BAZ 2)*



*Bild 5: Werkzeugplattformen  
links: Hexapod (BAZ 1),  
rechts: Industrieroboter (BAZ 2)*

## 4.5.6 Produktionstechnisches Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen - DeLIZ

<b>Laufzeit</b>	05/2010 - 06/2011
<b>Finanzierung</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)
<b>Bearbeiter</b>	Dr.-Ing. André Hardtmann Dipl.-Ing. Sven Bräunling
<b>Kooperation</b>	TU Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) TU Dresden, Institut für Oberflächen- und Fertigungstechnik (IOF) Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden TU München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (IWB)

### Zielstellung

Das Forschungsvorhaben befasst sich mit der Entwicklung neuer automatisierter Produktionsverfahren zur wirtschaftlichen Massenfertigung von hochenergetischen Lithium-Ionen-Zellen (LIZ). Ziel der Forschungsarbeiten am IWM ist die grundlegende Entwicklung von Fertigungsmethoden zur Herstellung und von geometrisch unbestimmten Zellformen (Freiformflächen) und deren Integration in Tragstrukturen. Dazu gehört die Evaluierung möglicher Formgebungs- und Fügemethoden und die versuchstechnische Ermittlung deren Grenzen anhand prototypischer Muster. Weiterhin wird das IWM einen Beitrag leisten, die Zuführ- und Montagetechnologien zur Integration von LIZ-Modulen in Strukturkomponenten zu erarbeiten.

### Lösungsweg

*Fertigen von LIZ mit geometrisch unbestimmter Zellform*

Ausgehend von einem erstellten Fertigungskonzept zur Herstellung geometrisch unbestimmter Zellformen sind zunächst die hierzu möglichen unterschiedlichen Formgebungstech-

nologien zu evaluieren. In Zusammenarbeit mit dem IOF (Trennen der Folien) ist die Formgebung und Fixierung der Folien anhand der erarbeiteten technologischen Möglichkeiten in Form einer Machbarkeitsstudie zu untersuchen.

### *Integration von LIZ in Strukturkomponenten*

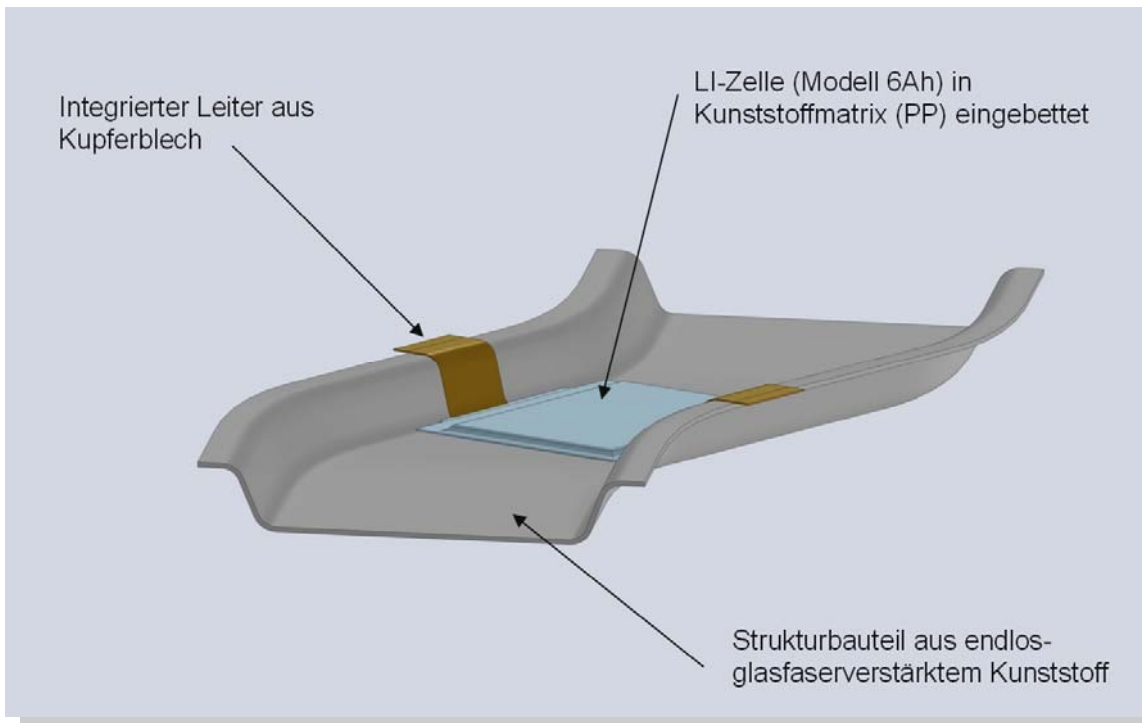
Zunächst sind am IWM im Formgebungs- und Montagewerkzeug Formgebung und Fügen des Verifikationsbauteils aus faserverstärktem Thermoplast und Blechverstärkungen zu realisieren. Nachfolgend wird durch die Variation der Formgebungs- und Verbindungstechnologien und deren Parametrierung ermittelt, wie die geometrisch unbestimmten Zellformen in das Verifikationsbauteil eingebettet werden können. Für die Erzielung seriengerechter Taktzeiten ist ein hoher Automatisierungsgrad erforderlich. Somit ist für den konzipierten Verarbeitungsprozess mit dem ILK ein automatisiertes Handhabungssystem zu entwickeln. Außerdem gilt es, die Steuerungen aller Prozesseinrichtungen aufeinander abzustimmen. Dies beinhaltet die Temperiereinrichtungen sowie weitere prozessintegrierte und periphere Handhabungs- und Zuführsysteme.

## **Ergebnisse**

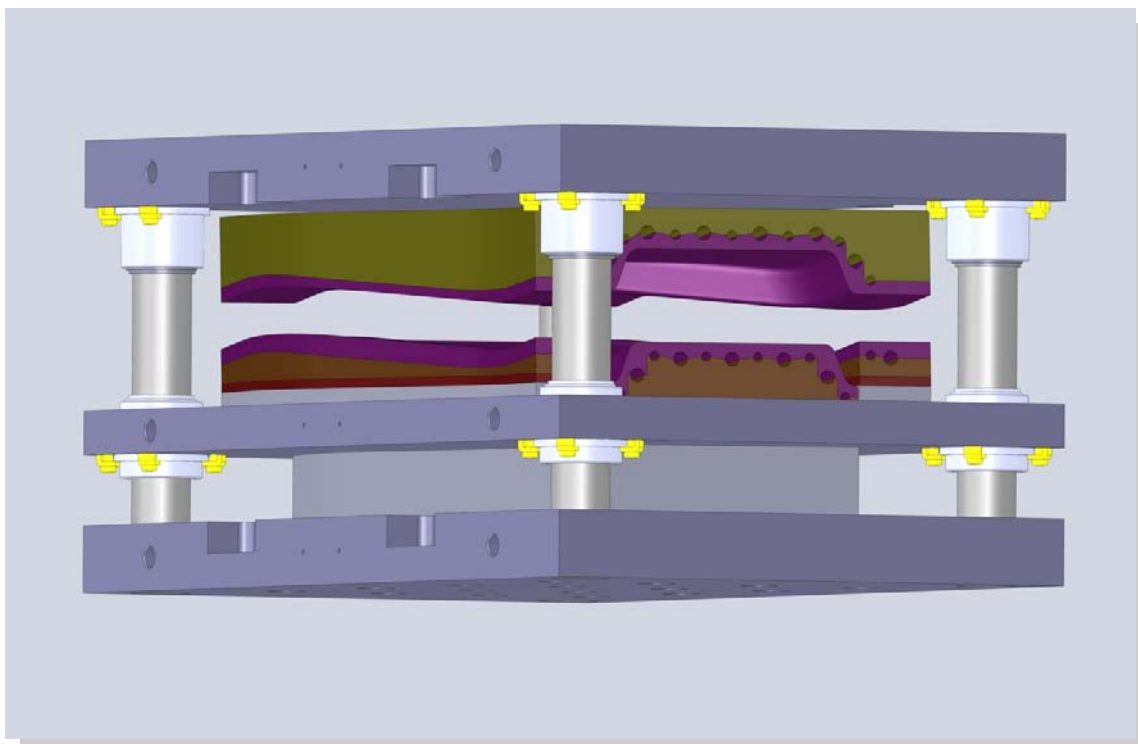
Zu Beginn wurden umfangreiche Recherchen zur Ermittlung von Werkstoffparametern und Vorversuche zur Auswahl einer geeigneten Formgebungstechnologie durchgeführt. Diese Erkenntnisse wurden beim Entwurf des Verifikationsbauteils für die Integration der geometrisch unbestimmten Zellformen berücksichtigt (*Bild 1*). Für die Fertigung dieses Verifikationsbauteils wurde ein prototypisches, modular aufgebautes, variotherm temperierbares Formgebungs- und Montagewerkzeug entworfen (*Bild 2*). Hierzu wurden durch experimentelle Untersuchungen geeignete Fertigungs- und Gestaltungsmöglichkeiten der Werkzeugaktivelemente sowie Möglichkeiten zur Einbindung der Temperierelemente gefunden.

In weiteren Arbeiten wurden mit einem bereits vorhandenen Formpresswerkzeug Startparameter für die spätere Optimierung des Formgebungs- und Fügeprozesses ermittelt. Dabei wurden

Standard-Lithiumionenzellen sowie (bis zur Verfügbarkeit laser-geschnittener Elektrodenfolien) manuell gefertigte "LIZ-Dummies" aus ähnlichen Folienmaterialien verwendet.



*Bild 1: Entwurf des Verifikationsbauteils*



*Bild 2: Entwurf eines Formgebungs- und Fügewerkzeuges*



## 4.5.7 Simulationsgestützte Konstruktion und Einarbeitung eines Tiefziehwerkzeuges zur Herstellung von Blechbauteilen - LEVITA

**Laufzeit** 02/2009 - 02/2010

**Finanzierung** Industrie

**Bearbeiter** Dipl.-Ing. Lars Penter  
Dr.-Ing. André Hardtmann

### Zielstellung

Im Auftrag der Luftfahrtindustrie sollten Bauteile aus Edelstahl (1.4301) mittels Tiefziehen hergestellt werden. Dabei stellt insbesondere die sehr komplexe Form und die geringe Blechdicke (0,2 mm) eine große Herausforderung dar.

### Lösungsweg

Der Lösungsweg beinhaltet zunächst die Überprüfung der Umformbarkeit der Ziehteile mittels FE-Umformprozesssimulation. Weiterhin wurden sowohl die Endgeometrie des Ziehteils, die Gestalt der Werkzeugaktivflächen sowie die Lage und Form der Ziehstäbe simulativ bestimmt (*Bild 1*). Mittels der am IWM verfügbaren CAD-Software wurde das komplette Werkzeug konstruiert. Die Werkzeugfertigung erfolgte in der Industrie, Werkzeugeinarbeitung und Herstellung der Ziehteile wurden am IWM durchgeführt.

### Ergebnisse

Als Ergebnis liegt ein modulares Tiefziehwerkzeug vor, auf dem durch Austausch der Werkzeugaktivflächen zwei Blechteile gefertigt werden können. Die geforderten Blechteile konnten auf der hauseigenen Presse (*Bild 2*) hergestellt werden.

Nach weiteren Prozessschritten an anderen Forschungsinstituten und Firmen entstand am Ende des Projektes ein integrales Bauteil für die Luftfahrtindustrie.

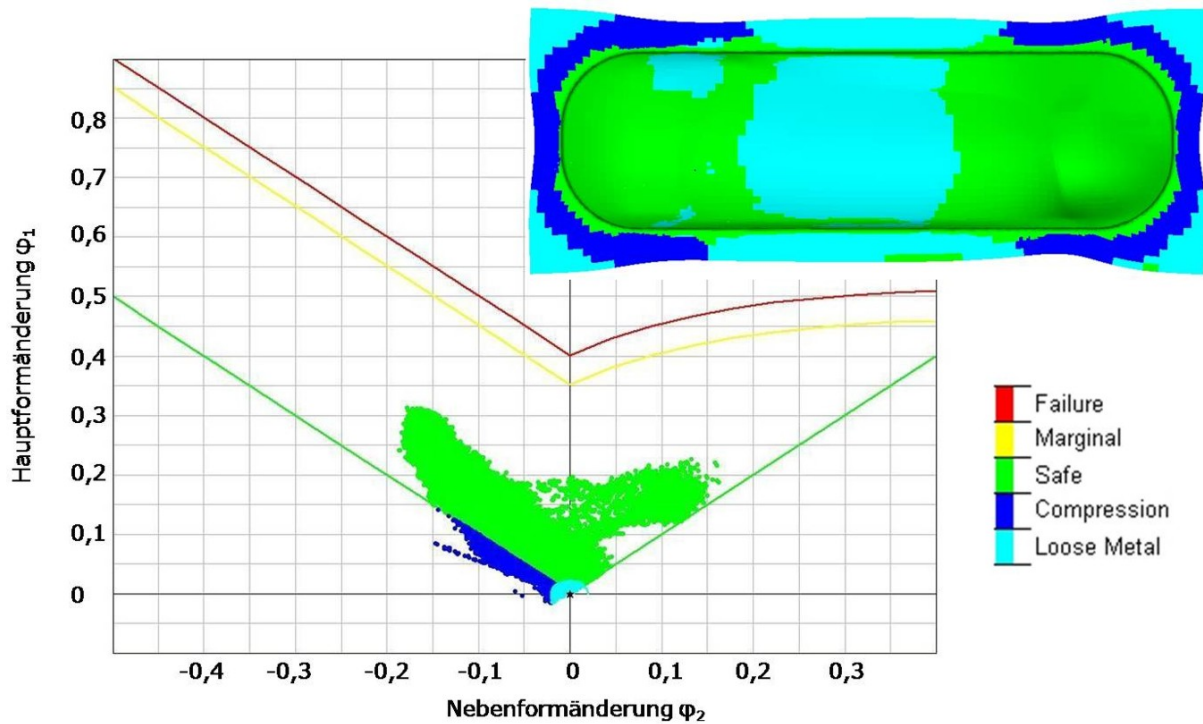


Bild 1: Bestimmung der Umformbarkeit des Ziehteils mittels Simulation und Grenzformänderungskurve

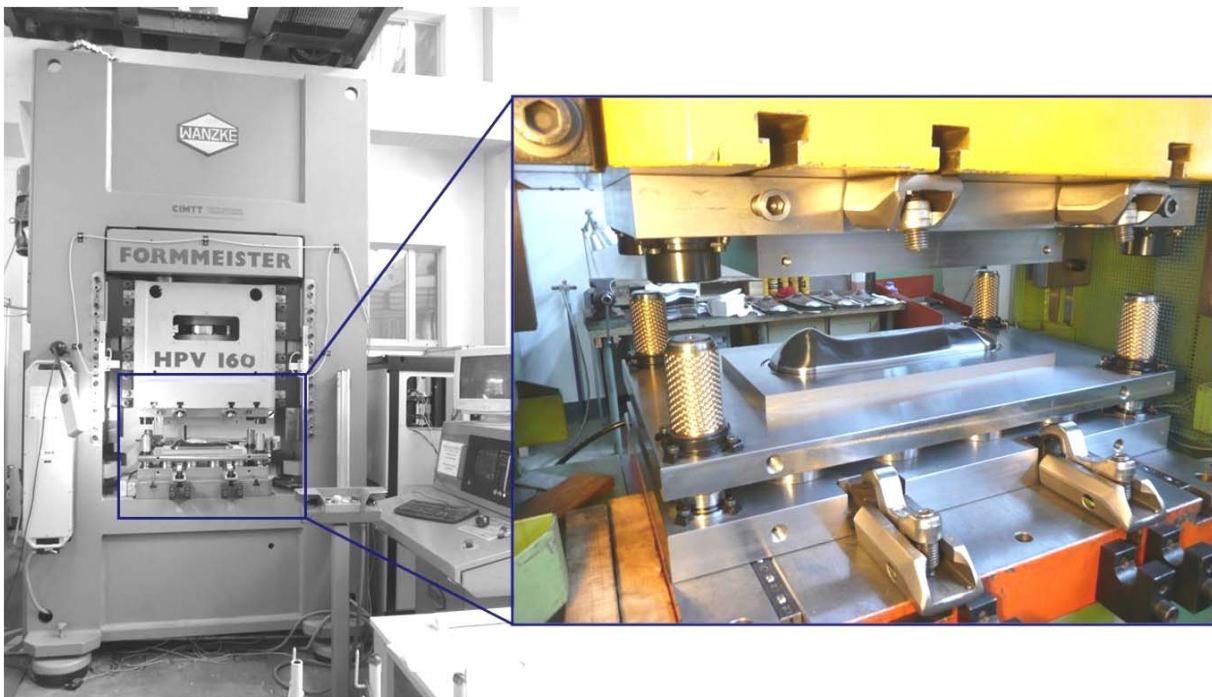


Bild 2: Hydraulische Presse mit eingebautem Tiefziehwerkzeug

## 4.6 AG Prozessketten

### 4.6.1 Datenbankgestützte Modellierung und Simulation der Prozessketten zur gezielten Einstellung vordefinierter Eigenschaften sowie zur Absicherung der reproduzierbaren Fertigung von thermoplastischen Textil-Verbundbauteilen



**Vorhaben im Teilprojekt E2 des SFB 639  
Textilverstärkte Verbundkomponenten für  
funktionsintegrierende Mischbauweisen bei  
komplexen Leichtbauanwendungen**

**Laufzeit** 01/2008 - 12/2011

**Finanzierung** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

**Bearbeiter** Dr.-Ing. Hajo Wiemer  
Dipl.-Inf. Kay K. Großmann

**Kooperation** Dr.-Ing. Bernd Grüber  
Dipl.-Inf. (BA) Jan Wiedemuth  
TU Dresden, Institut für Leichtbau und  
Kunststofftechnik (ILK)

#### **Zielstellung**

Im Zusammenhang mit Leichtbau-Konzepten erlangen textilverstärkte Verbundwerkstoffe immer mehr an Bedeutung. Textilverstärkte Verbundwerkstoffe besitzen große Flexibilität in Bezug auf die Anpassung der Werkstoffstruktur an die Belastungen. Diese Flexibilität ist durch viele Einflussmöglichkeiten entlang der Prozesskette, beginnend mit den Eigenschaften der Rohstoffe, deren Mischungsverhältnisse bei der Filament- und Garnherstellung, über die Wahl unterschiedlicher Verarbeitungsverfahren und Montagevarianten zum textilen Halbzeug mit zugehörigen anpassbaren Prozessparametern bis zur Konsolidierung des Textiles zum Bauteil gegeben. Die bislang übliche isolierte

Betrachtung von einzelnen Problemfeldern und Prozessschritten wird bei einer von derartigen starken Wechselwirkungen geprägten Prozesskette den Anforderungen nicht gerecht. Die durchgängige Betrachtung der einzelnen Teilbereiche Werkstoffe, Konstruktion, Fertigung und Montage ist zwingend erforderlich, denn nur bei möglichst durchgängiger, abgestimmter Vorgehensweise kann das gegebene hohe Leichtbaupotenzial voll ausgeschöpft werden (*Bild 1*). Ziel der Forschungsarbeit ist daher die Entwicklung eines offenen Modells zur Darstellung, Planung und Überwachung von Fertigungsabläufen textilverstärkter Verbundstoffe.



*Bild 1: Problemstellung der Prozesskettenmodellierung:  
Erfassung aller relevanten Einflüsse auf die reproduzierbare Herstellung der geforderten Bauteileigenschaften*

## Lösungsweg

In vorangegangenen Arbeiten wurden die technologische Prozesskette zur Herstellung textilverstärkter Verbundstoffe einschließlich charakteristischer Besonderheiten analysiert, Anforderungen an die erforderlichen Methoden zur Beschreibung und Analyse der Prozessketten abgeleitet sowie übliche Planungsmethoden unterschiedlicher Fachrichtungen auf Nutzbarkeit geprüft. Nach der Entwicklung der methodischen Grundlagen fokussierte die Arbeit im Berichtszeitraum auf die Entwicklung eines unterstützenden, datenbankgestützten

Beschreibungs- und Analysetools. Folgende Schwerpunkte wurden bearbeitet:

- Entwicklung der Methodik zur Prozesskettenbeschreibung unter Einbeziehung von technisch-technologischen Wechselwirkungen auf Basis der Prozesskettenanalyse (*Bild 2*).
- Ableitung eines generischen Datenmodells (*Bild 3*) und Erarbeitung eines Implementationsmodells mit Methoden des Software-Engineerings sowie Umsetzung in ein Modellierungs- und Simulationswerkzeug auf Basis kommerzieller Programmsysteme.
- Verknüpfung des Prozessketten-Simulationswerkzeugs mit der SFB-Datenbank auf Basis des Implementationsmodells.
- Anwendung von statistischen Methoden bei der Datenanalyse zur Ermittlung von technisch-technologischen Wechselwirkungen und Parametern.
- Test, Einführung und Anwendung des datenbankgestützten Modellierungs- und Simulationswerkzeuges (*Bild 4*).
- Anwendung des Fertigungsprozessmodells für eine reproduzierbare Herstellung ausgewählter Eigenschaften.

## **Ergebnisse**

Im bisherigen Bearbeitungszeitraum erfolgte die detailliert strukturierte Darstellung des Fertigungsablaufes. Basierend auf dieser Darstellung wurden die Methoden zur Beschreibung und Analyse von komplexen technologischen Prozessketten sowie die Methoden zur Generierung von Prozesswissen hinsichtlich der Absicherung einer reproduzierbaren Fertigung entwickelt. Das unterstützende datenbankgestützte Modellierungs- und Analysewerkzeug wurde für die Anwendung im SFB 639 entwickelt und schrittweise eingeführt.



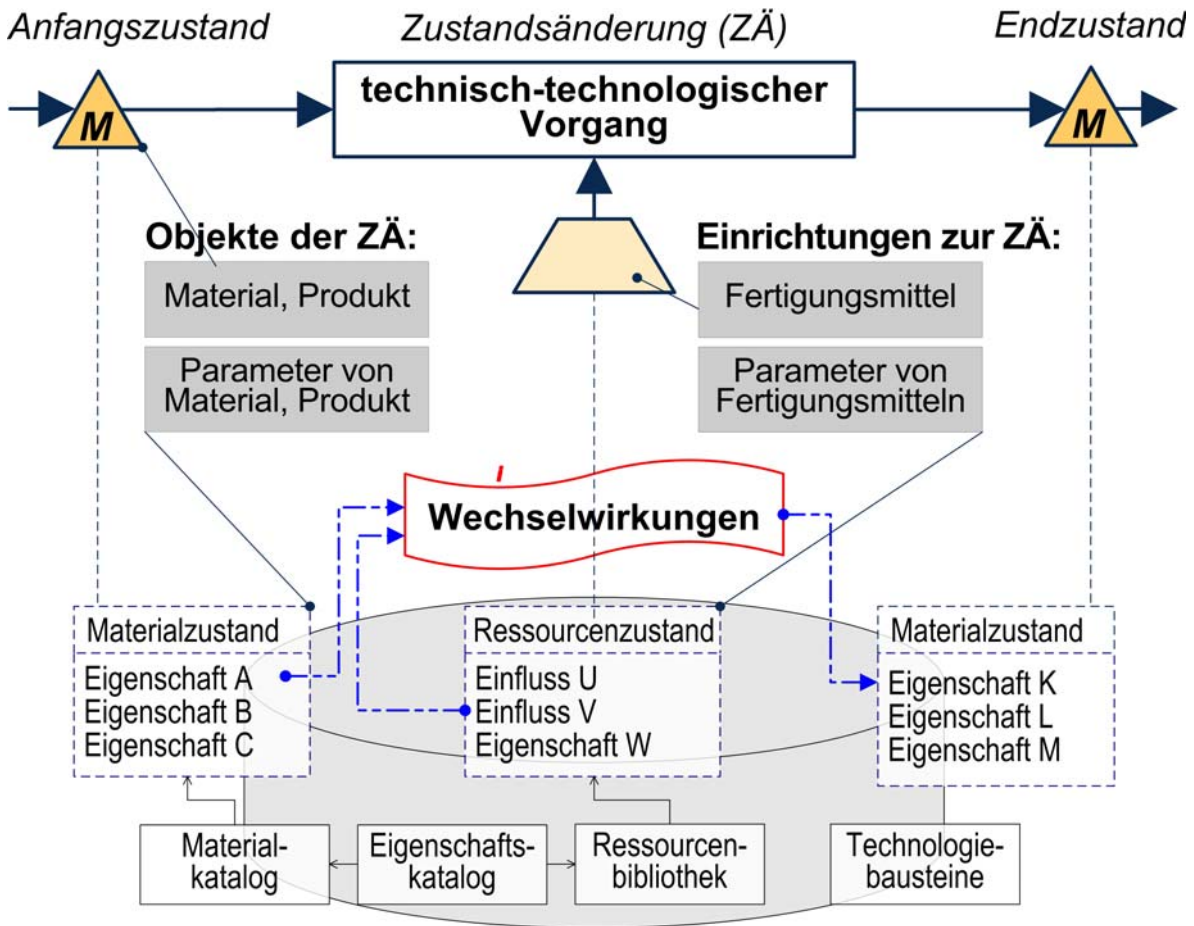


Bild 2: Struktur eines technisch-technologischen Prozessschritts und Datenbankbindung

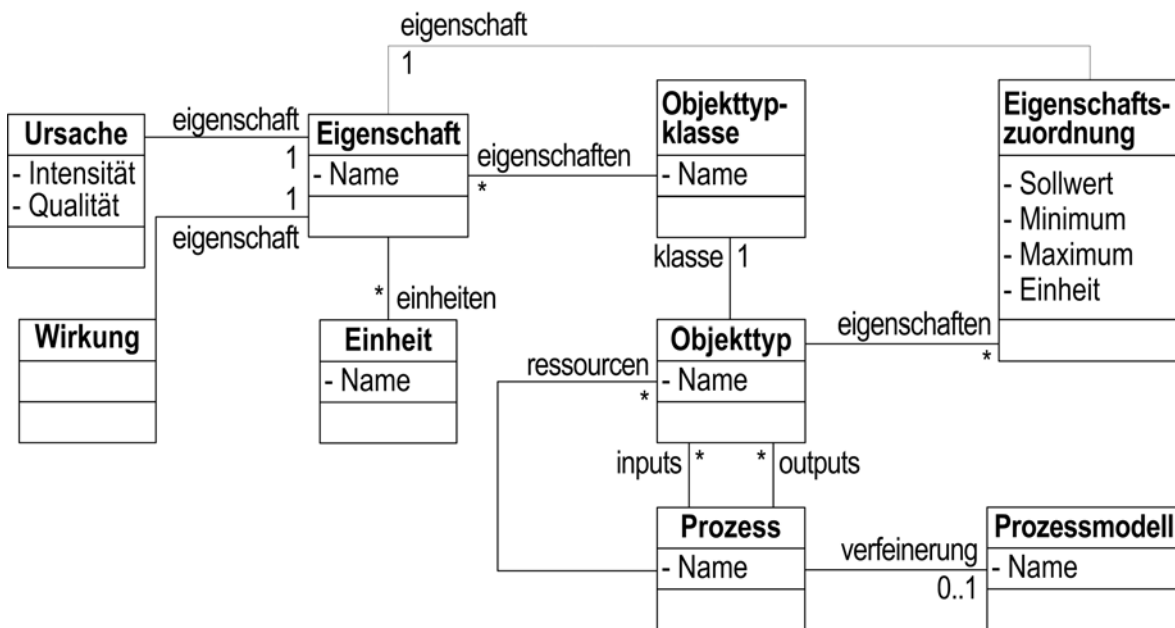
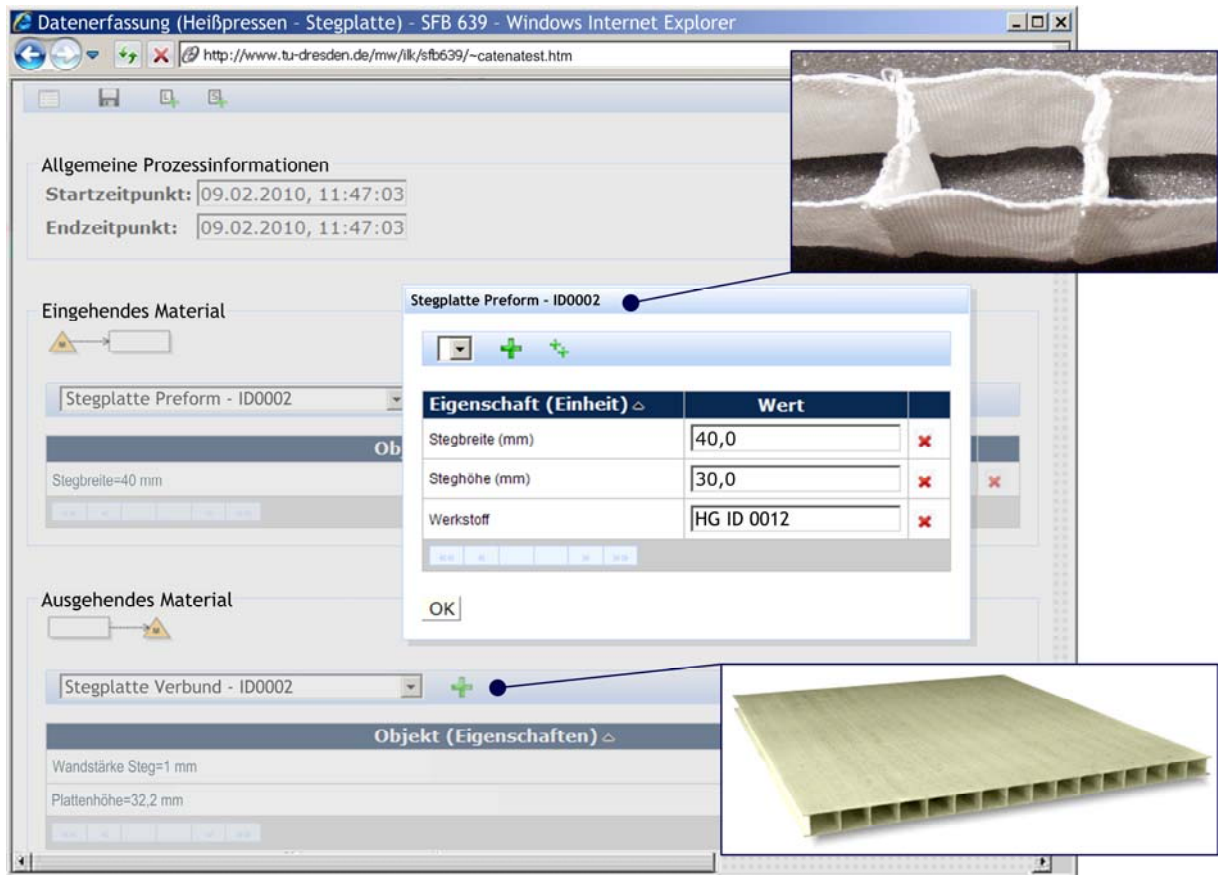


Bild 3: Grafisches Metamodell für die Prozessketten-Modellierungssprache





The screenshot shows a web-based data entry interface for a hot pressing process. The browser title is "Datenerfassung (Heißpressen - Stegplatte) - SFB 639 - Windows Internet Explorer". The URL is "http://www.tu-dresden.de/mw/ilk/sfb639/~catenatest.htm".

**Allgemeine Prozessinformationen**  
Startzeitpunkt: 09.02.2010, 11:47:03  
Endzeitpunkt: 09.02.2010, 11:47:03

**Eingehendes Material**  
Stegplatte Preform - ID0002  
Stegbreite=40 mm

**Ausgehendes Material**  
Stegplatte Verbund - ID0002  
Wandstärke Steg=1 mm  
Plattenhöhe=32,2 mm

**Stegplatte Preform - ID0002**

Eigenschaft (Einheit) △	Wert	
Stegbreite (mm)	40,0	✖
Steghöhe (mm)	30,0	✖
Werkstoff	HG ID 0012	✖

OK

**Objekt (Eigenschaften) △**

Wandstärke Steg=1 mm  
Plattenhöhe=32,2 mm

The image includes two photographs: one showing a cross-section of a white honeycomb preform and another showing a finished yellow honeycomb panel.

Bild 4: Datenerfassungsfenster für das Heißpressen der Stegplatten

## 4.6.2 Methodik zur Wissensgenerierung für die reproduzierbare Herstellung biogener Verbundbauteile - ECEMP BioComp



**Vorhaben im Teilprojekt BioComp "Biologische Materialverbunde und deren Übertragung in Verbundwerkstoffe" des sächsischen Spitzenclusters "ECEMP - European Centre for Emerging Materials and Processes Dresden"**

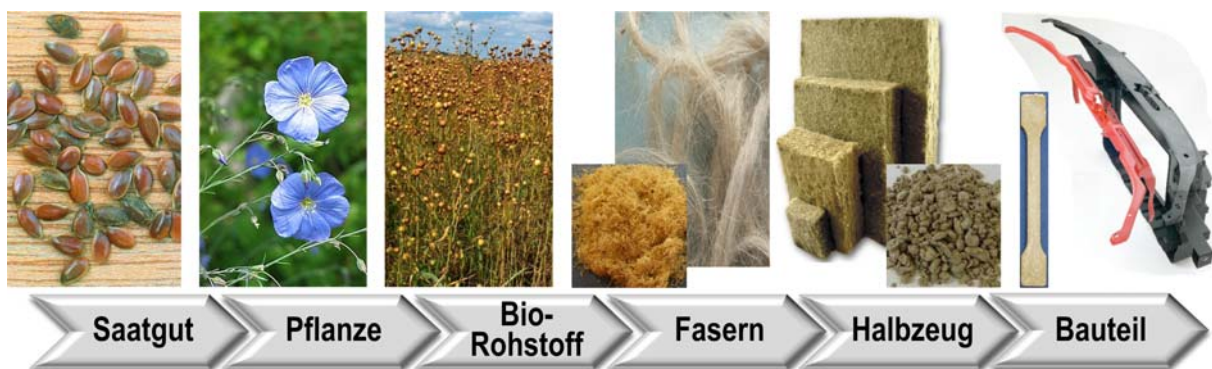
<b>Laufzeit</b>	04/2009 - 12/2012
<b>Finanzierung</b>	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
<b>Bearbeiter</b>	Dr.-Ing. Hajo Wiemer Dipl.-Wirt.-Inf. Michaela Helbig
<b>Kooperation</b>	Dipl.-Ing. Carolin Siegel TU Dresden, Institut für Holz- und Papiertechnik Dr. rer. nat. Martina Bremer M. Sc. Anne Gohrbandt Dipl.-Ing. (FH) Alexander Feldner TU Dresden, Institut für Pflanzen- und Holzchemie Dipl.-Ing. Robert Kupfer TU Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik Dipl.-Ing. Melanie Horbens TU Dresden, Institut für Botanik

### Zielstellung

Das Vorhaben BioComp widmet sich der materialeffizienten Verwendung regional verfügbarer Einjahrespflanzen und deren Übertragung in bionisch optimierte, funktionalisierte Mehrkomponentenwerkstoffe für Ressourcen schonende Leichtbaustrukturen. Die Verarbeitung biogener Rohstoffe zu Verbundwerkstoffen und deren Nutzung in Verbundbauteilen steht im Wesentlichen vor zwei Herausforderungen. Zum Einen sind zunächst Pflanzen zu finden, deren Bestandteile als Faser- oder

Matrixrohstoffe geeignet sind. Zum anderen werden industrietaugliche Technologien benötigt, mit denen die biogenen Verbundwerkstoffe entlang der im *Bild 1* dargestellten Stufenfolge reproduzierbar hergestellt werden können. Dies ist aufgrund der wachstumsbedingten starken Streuung der Rohstoffeigenschaften besonders anspruchsvoll.

Ziel des am IWM bearbeiteten Schwerpunkts ist daher die Entwicklung geeigneter Methoden, mit denen sowohl die Bestimmung der Rohstoffeigenschaften als auch die Ermittlung technologischer Einflussmöglichkeiten unterstützt werden. Schließlich soll ausreichend technologisches Prozesswissen generiert werden, um Werkstoffeigenschaften gezielt einstellen und eine reproduzierbare Verarbeitung absichern zu können.



*Bild 1: Betrachtete Stufenfolge zur Herstellung von biogenen Verbundbauteilen aus pflanzlichen Rohstoffen*

## Lösungsweg

Aufbauend auf den Vorarbeiten zur Prozesskettenmodellierung und -analyse bildeten folgende Schwerpunkte den Lösungsweg:

- Entwicklung einer Methode zur effektiven Generierung von Technologiewissen (*Bild 2*).
- Weiterentwicklung der Methodik zur Prozesskettenbeschreibung (*Bild 3*).
- Schaffung der Voraussetzungen für die Datenerfassung in dem mit einer Datenbank verknüpften Prozessmodell.
- Erfassung und Analyse der Daten der untersuchten Pflanzen und Technologien.

- Entwicklung geeigneter Methoden zur Ablage und Bereitstellung von Technologiewissen.
- Test und exemplarische Anwendung der Gesamtmethode mit Unterstützung des entwickelten Beschreibungs- und Analysewerkzeugs (Bild 4).
- Test, Einführung und Anwendung des Modellierungs- und Analysewerkzeugs.

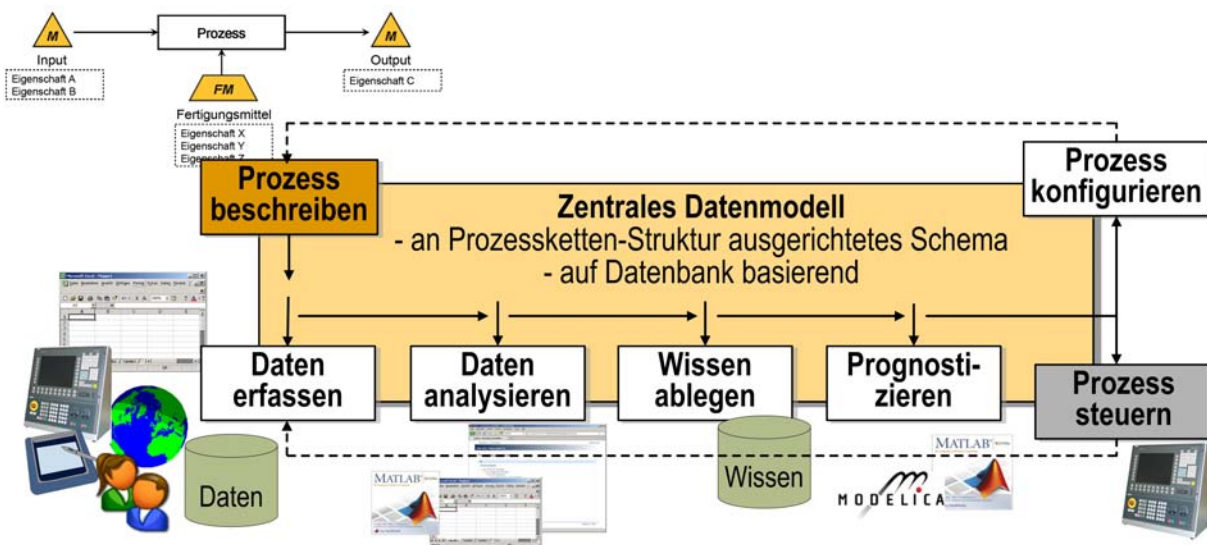


Bild 2: Hauptschritte der Generierung und Nutzung von Technologiewissen

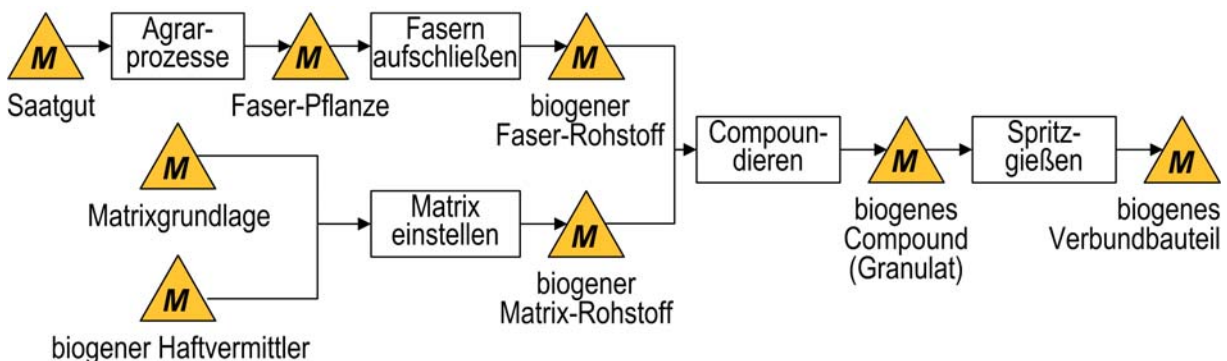


Bild 3: Beispiel für ein Modell der Prozessketten zu den technologischen Untersuchungen (BioComp-Hauptlinie)

## Ergebnisse

Im bisherigen Bearbeitungszeitraum erfolgte zunächst die detailliert strukturierte Darstellung der als Hauptlinie für die Herstellung der biogenen Verbundwerkstoffe erforderlichen Prozesskette. Basierend auf dieser Darstellung wurde begonnen, die exemplarischen Materialeigenschaften sowie die Einflüsse aus dem Verarbeitungsprozess zu modellieren und zu erfassen. Zum Anderen wurden die Methoden zur Beschreibung und Analyse von komplexen technologischen Prozessketten und das unterstützende Softwarewerkzeug weiterentwickelt. Weiterführend wurden Methoden zur Generierung von Prozesswissen hinsichtlich der Absicherung einer reproduzierbaren Fertigung konzeptionell erarbeitet.

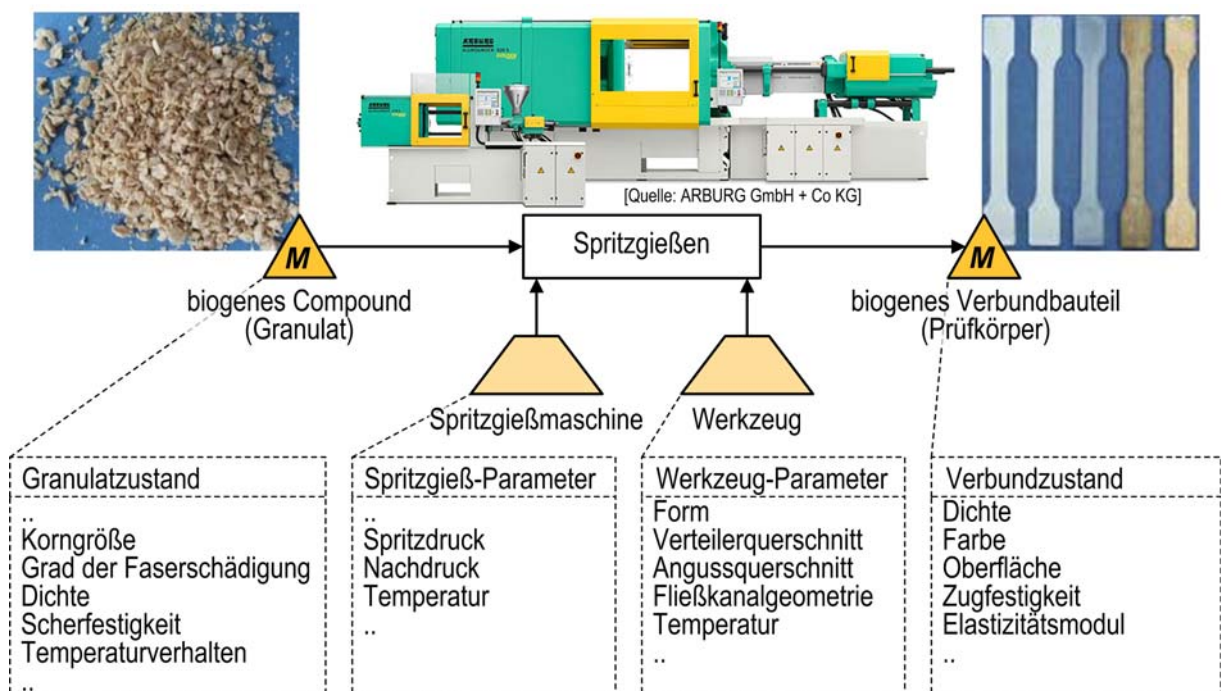


Bild 4: Prozessmodell zum Spritzgießen





---

# 5      Dissertationen

---



## 5.1 Vergleichende Untersuchung von Methoden zur Verringerung der Gestellanregung durch linearmotorgetriebene Werkzeugmaschinenachsen

### Promovend



### Jens Müller

- geboren 1972 in Rodewisch
- 1994 - 1999 Studium Maschinenbau/ Werkzeugmaschinenentwicklung an der TU Dresden
- seit 1999 Wiss. Mitarbeiter am IWM der TU Dresden

### Gutachter

Prof. Dr.-Ing. habil. Knut Großmann (TU Dresden)

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher (RWTH Aachen)

Dr.-Ing. Bernd Schnurr (Bosch Rexroth Electric Drives and Controls GmbH, Lohr a. M.)

### Verteidigung

31. März 2009

Lineardirektantriebe wurden in den letzten Jahren immer leistungsfähiger und gleichzeitig immer preiswerter. Aufgrund ihrer besonderen Vorteile, den hohen Kraftanstiegsgeschwindigkeiten, Verfahrgeschwindigkeiten, Beschleunigungen und Beschleunigungsänderungen (Ruck), eignen sie sich besonders für hochdynamische Anwendungen.

Antriebskräfte erzeugen jedoch auch immer entgegengesetzt gerichtete Reaktionskräfte, die das Gestell, je nach Kraftamplitude und Kraftänderungsgeschwindigkeit, zu Schwin-

gungen anregen. Beim Lineardirektantrieb entsprechen diese Reaktionskräfte aufgrund der direkten Anbindung der Linearmotorkomponenten an Gestell und Schlitten sowie fehlender mechanischer Übertragungselemente den Antriebskräften. Die in Bezug auf den angetriebenen Schlitten genannten Vorteile der Lineardirektantriebe, die hohen Kräfte und Kraftanstiegsgeschwindigkeiten, die zum Erreichen hoher Beschleunigungen und Beschleunigungsänderungen erforderlich sind, führen somit zu einer hinsichtlich des Gestells nachteiligen, starken und breitbandigen Gestellanregung.

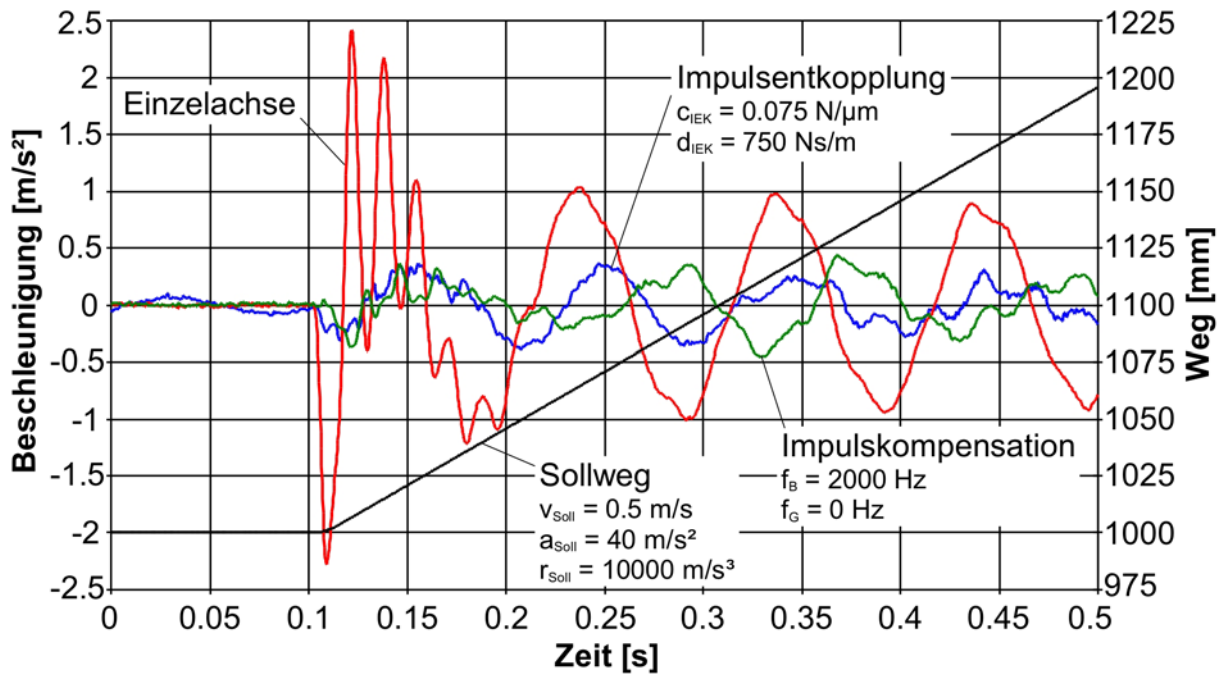
In der Arbeit wurde ein neues, als Impulskompensation bezeichnetes Verfahren zur Vermeidung bzw. Verringerung der durch die Reaktionskräfte von Lineardirektantrieben verursachten Gestellanregung vorgestellt und mit einem bereits bekannten, aber bisher kaum eingesetzten Verfahren, der Impulsentkopplung, vergleichend untersucht. Ziel war es, die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen der Verfahren sowie die erforderlichen technischen Randbedingungen zu ermitteln. Die Untersuchungen wurden auf der Basis eines Versuchsstandes, auf dem beide Lösungsansätze umgesetzt sind, sowie mittels Matlab/Simulink®-Modellen des Versuchsstandes durchgeführt.

Es wurde gezeigt, dass mit beiden Verfahren eine deutliche, etwa gleich starke Verringerung der Gestellanregung gegenüber der unentkoppelten bzw. unkompensierten Einzelachse erreicht wird (*s. Bild*).

Grenzen der Verfahren wurden insbesondere hinsichtlich der gestellanregenden Kraftwelligkeit und Rastkraft des Nutzantriebs ermittelt. Bei der Impulsentkopplung wurde außerdem ein starker Einfluss der Reibungsverhältnisse am Sekundärteilschlitten sowie der Gestelleigenschaften festgestellt.

Für die Randbedingungen des Versuchsstandes wurden optimale Parameter der Einflussgrößen von Impulsentkopplung und -kompensation experimentell und simulativ ermittelt und die Auslegung auf Basis vereinfachter Modellansätze diskutiert.

Weiterhin wurden konstruktiv und steuerungsseitig erforderliche Voraussetzungen für den praktischen Einsatz der Verfahren beschrieben.



*Vergleich der gemessenen Gestellbeschleunigung bei Einzelachse, impulskoppelter Achse und impulskompensierter Achse*

## 5.2 Der Produktprozess im Computerzeitalter - Methodische Grundsätze zur Informationsbehandlung im Produktprozess und deren Anwendung auf die Entwicklung eines Steuerungskonzeptes

### Promovend



### Volker Möbius

- geboren 1944 in Herzogswalde
- 1963 - 1969 Studium Maschinenbau/Werkzeugmaschinenkonstruktion an der TU Dresden
- 1969 – 1992 Forschung und Entwicklung bei MIKROMAT Dresden
- 2003 - 2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IWM der TU Dresden

### Gutachter

Prof. Dr.-Ing. habil. Knut Großmann (TU Dresden)

Prof. (i. R.) Dr. rer. nat. habil. Winfried Hacker (TU Dresden)

### Verteidigung

30. Juni 2009

Der Produktprozess wird in der Arbeit als Gesamtheit der mit einem Produkt in seinem Lebenszyklus direkt oder indirekt verbundenen Prozesse und ein Produkt als Ergebnis zielgerichteter menschlicher Tätigkeit zur Erzeugung gewünschter Eigenschaften eines Objektes definiert.

Aus Betrachtungen zur historischen Entwicklung und Merkmalen menschlicher Denkweise in Prozessen der Produktentwicklung (*Bilder 1 und 3*) werden die überragende Bedeutung externer

Informationsträger für die Möglichkeiten bei der Erarbeitung externer Abbilder physischer Realität als Kern der Produktentwicklung abgeleitet und die bedeutungsgerechte Bezeichnung eines "Computerzeitalters" begründet (Bild 2).

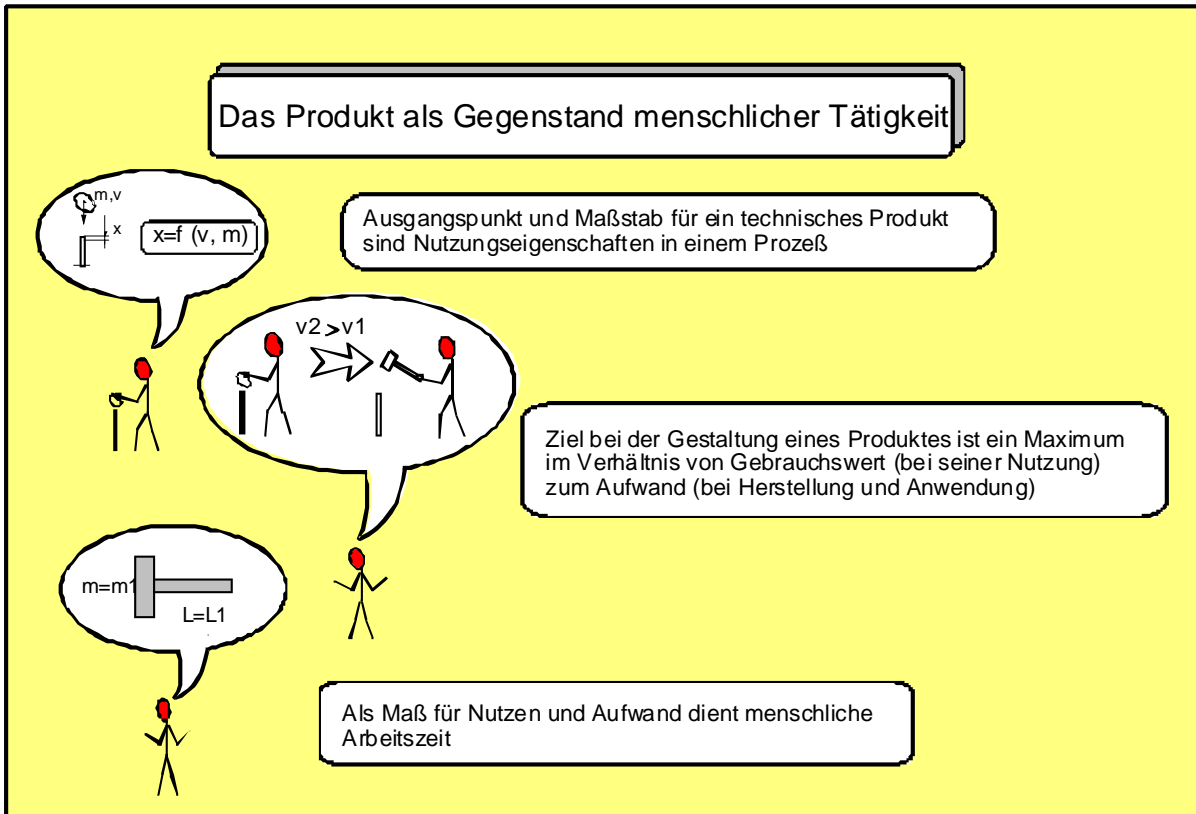


Bild 1: Das Produkt als Gegenstand menschlicher Arbeit

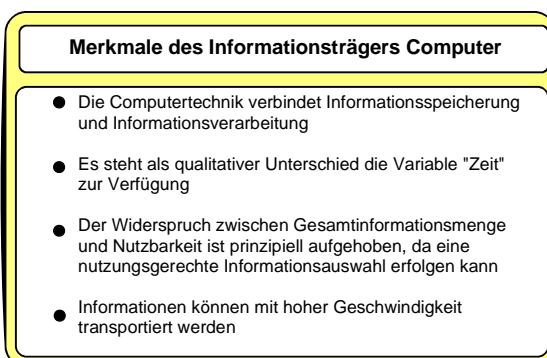


Bild 2: Informationsträger Computer

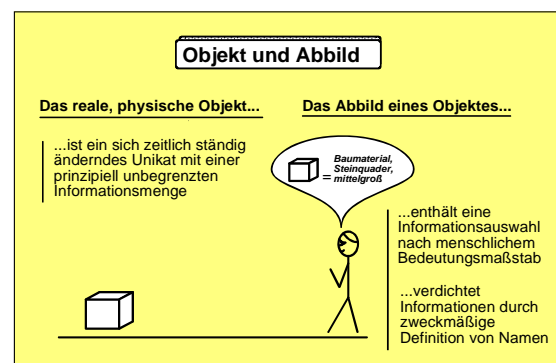
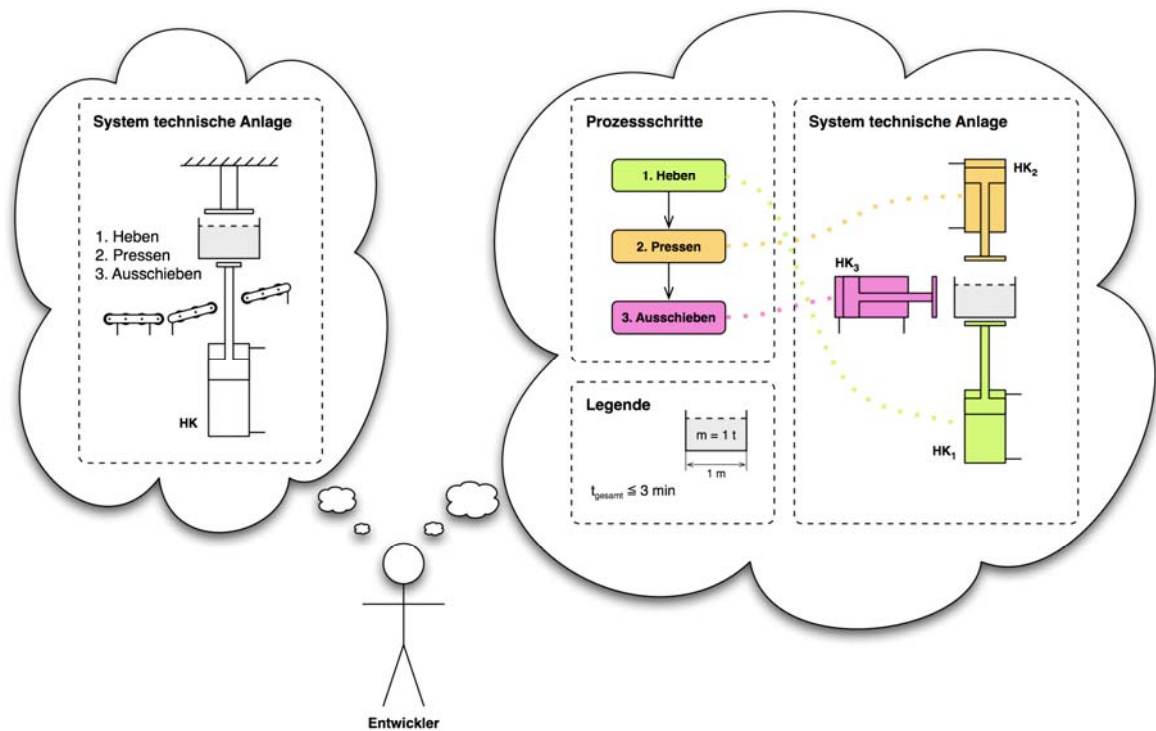


Bild 3: Objekt und Abbild

Auf dieser Grundlage werden weiterführend methodische Grundsätze für die Informationsbehandlung im Produktprozess und



insbesondere im Produkt-Entwicklungsprozess formuliert (*Bild 4*) und zu einer "Methodik des ganzheitlichen funktionellen Abbildes" verdichtet (*Bild 5*).



*Bild 4: Ganzheitlich funktional-gestalterisches Denken beim Systementwurf*

Da Produktentwicklung der Erarbeitung eines Abbildes des neuen Produktes entspricht, führt die im Computerzeitalter mögliche Informationsbehandlung zu gravierenden methodischen Konsequenzen, die einen tiefgreifenden Paradigmenwechsel begründen (*Bilder 6 und 7*).

Das Ziel der Produktentwicklung technischer Anlagen bleibt unverändert der Ablauf des Zielprozesses auf der neu zu schaffenden physischen Anlage, der Gegenstand der Produktentwicklung ändert sich nach den neuen Paradigmen von (vorrangig) Fertigungsunterlagen in ein "hinreichendes Abbild des auf der technischen Anlage ablaufenden Zielprozesses". Die daraus resultierende "Methodik des ganzheitlichen funktionellen Abbildes" verwendet als zentralen Bestandteil den Begriff

Funktion, der eine Zustandsänderung für einen Prozessschritt beschreibt und damit Stellvertreter für diese Zustandsänderung an der physischen Anlage in deren Ganzheitlichkeit ist.

Im Abbild der physischen Anlage bündelt dieser Funktionsbegriff alle zur Beschreibung der Zustandsänderung vorliegenden Informationen.

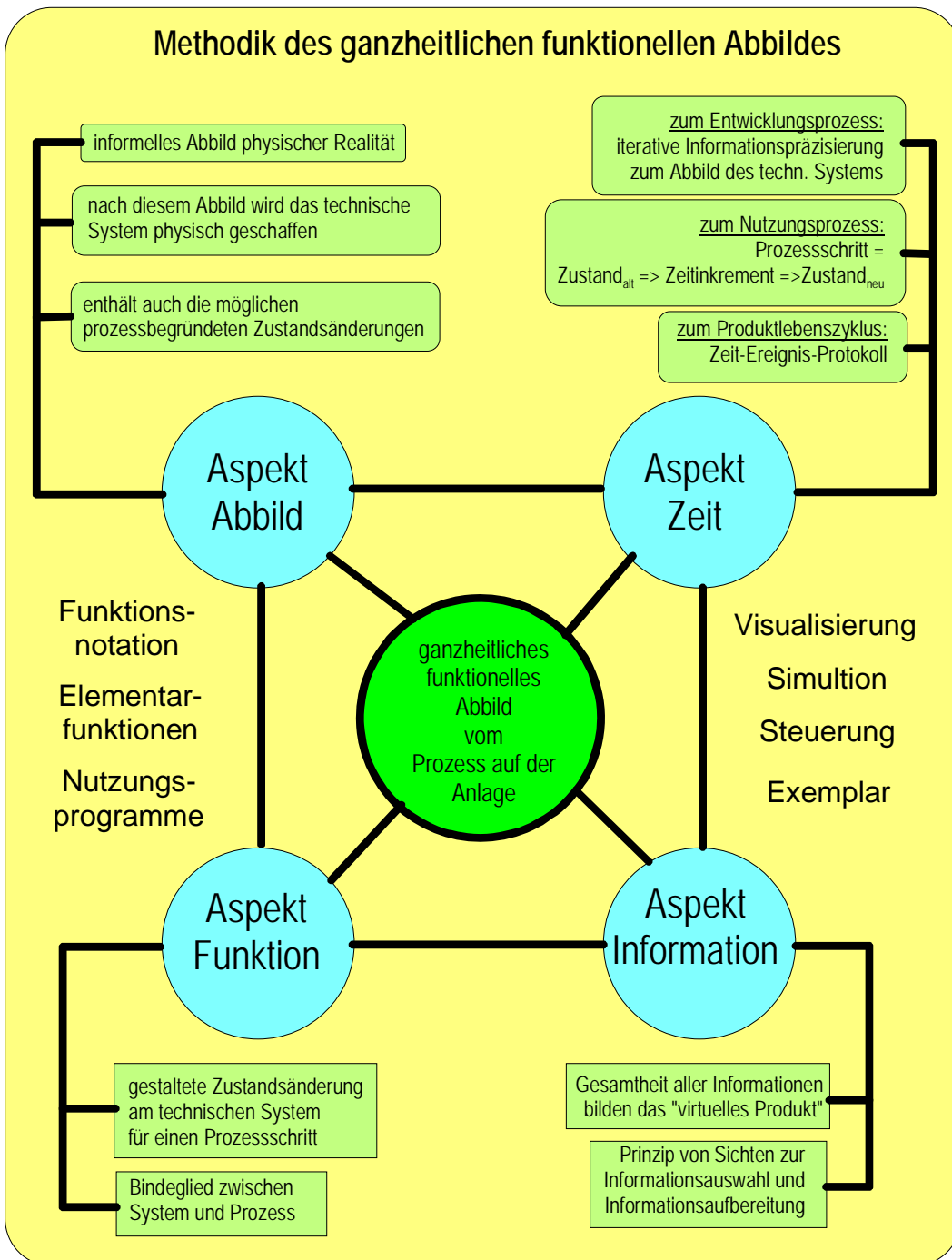


Bild 5: Methodik des ganzheitlichen funktionellen Abbildes

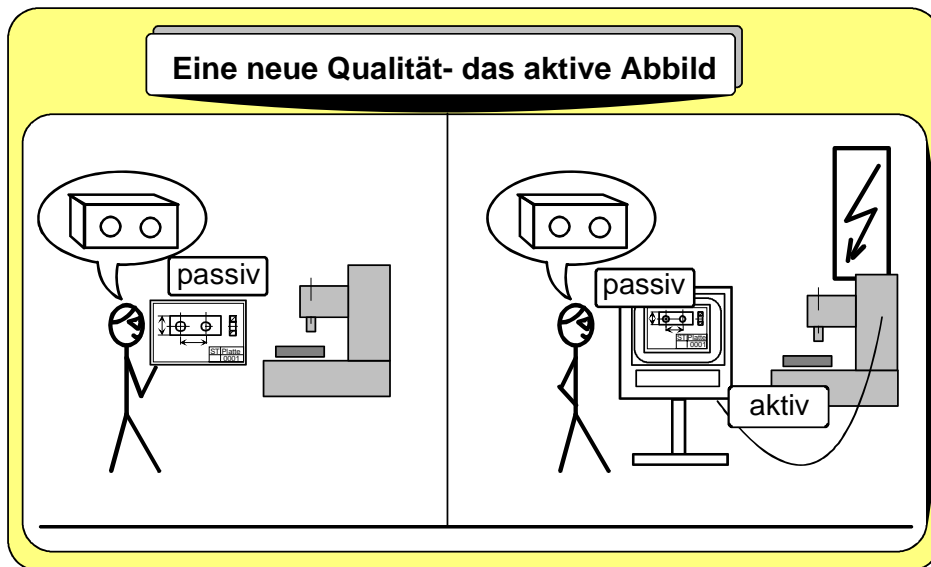


Bild 6: Das aktive Abbild

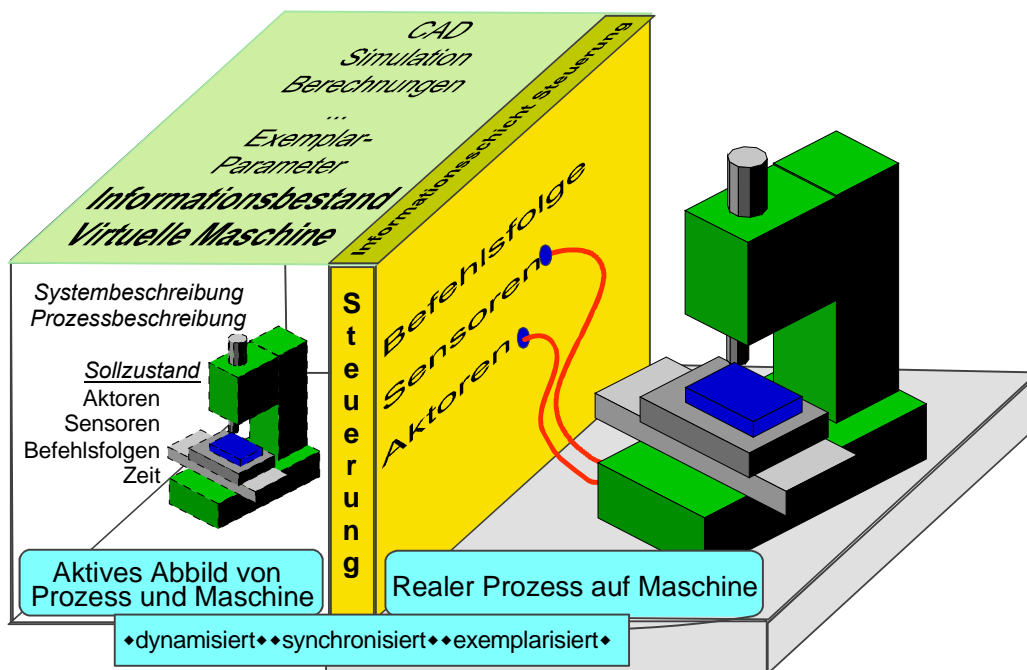


Bild 7: Abbild und reale Maschine

"Prozess" wird in dieser Sicht über definierte schrittweise Zustandsänderungen an der dafür gestalteten physischen technischen Anlage realisiert. Dabei kann jeder Prozessschritt hinreichend mit drei Informationen beschrieben werden:

- (1) Zustand vor dem Prozessschritt
- (2) Zustand nach dem Prozessschritt und

- (3) Zeitbedarf für die Ausführung des Prozessschrittes.

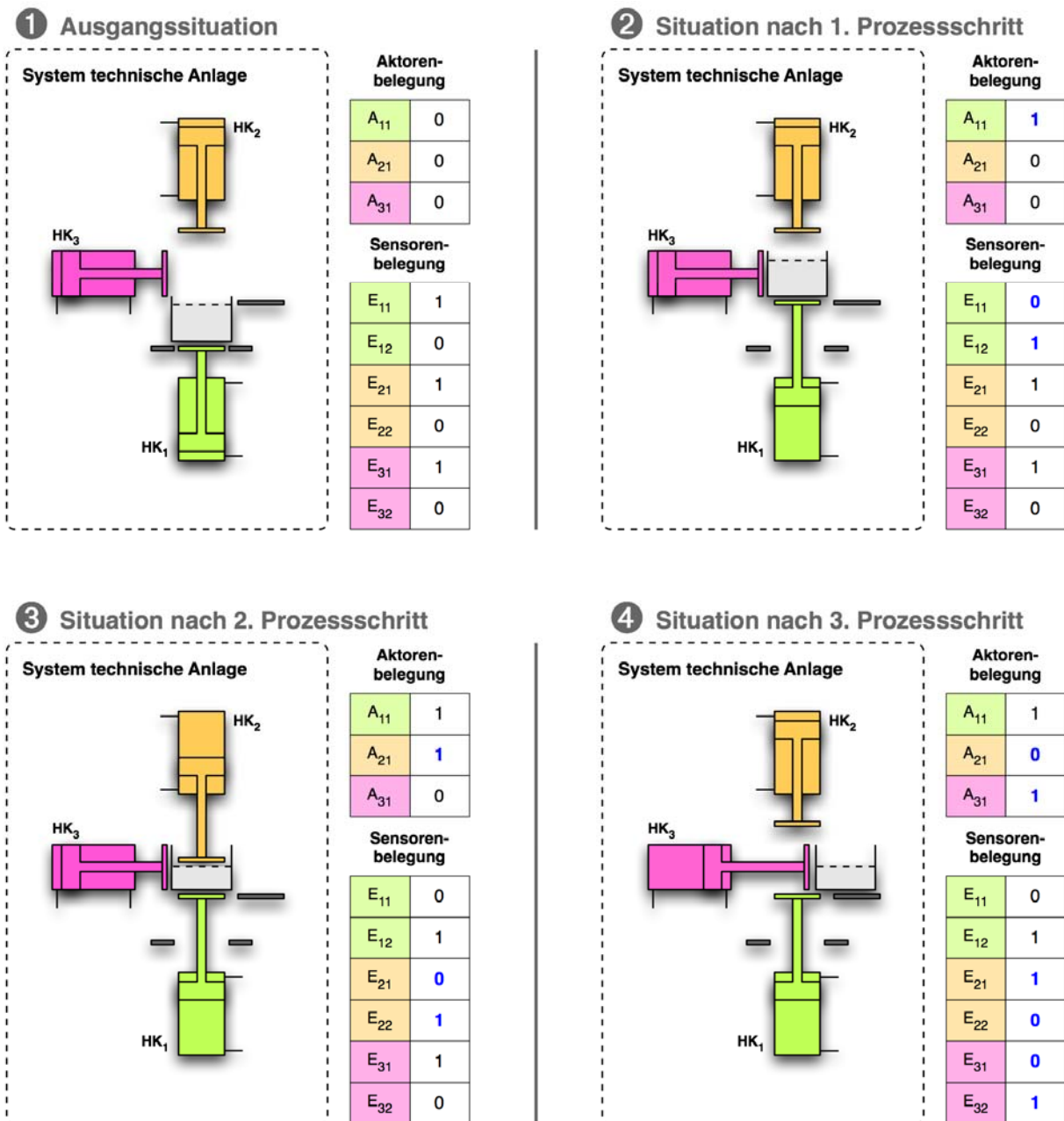


Bild 8: Visualisierung von Prozessschritten

Menschliches Denken strukturiert komplexe Prozesse hierarchisch und gestaltet im Entwicklungsprozess am technischen System für nicht weiter sinnvoll gliederbare Zustandsänderungen elementare Funktionalitäten, die dann die prozessgewünschten Zustandsänderungen an der technischen Anlage realisieren (Bild 8). Jede technische Anlage kann in ihrem

potentiellen Vermögen für prozessgewünschte Zustandsänderungen hinreichend durch solche Elementarfunktionen beschrieben werden.

Für mit Steuerungstechnik automatisierbare Prozesse gilt dabei, dass Signale von Ausgängen der Steuerung an Aktoren der Elementarfunktionen diese Zustandsänderungen auslösen und Sensoren Zustandssignale der Elementarfunktion an Eingänge der Steuerung geben.

Mit diesen Prämissen wird in der Arbeit das Konzept einer Computerfunktionssteuerung (CFS) entwickelt, die auf der Hard- und Software einer üblichen SPS aufsetzt.

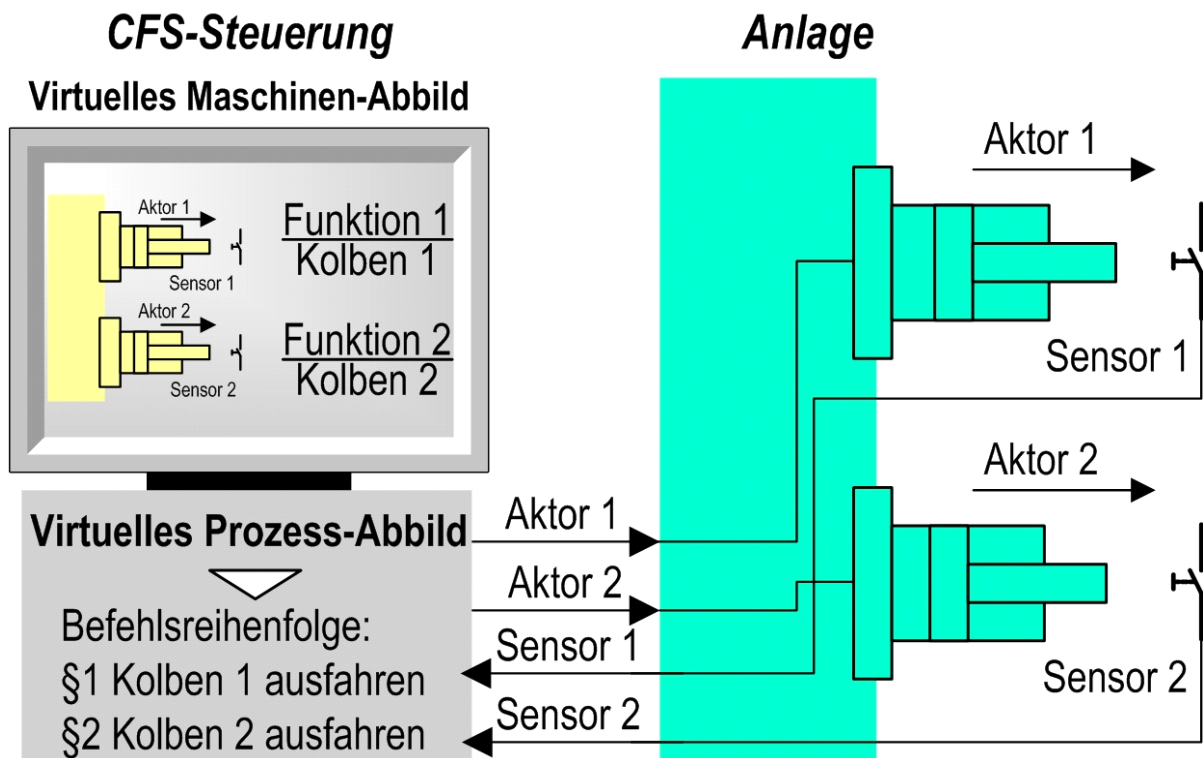


Bild 9: CFS – Virtuelles Prozessabbild und Anlage

Für die funktionelle Definition von Elementarfunktionen gilt, dass einerseits jede Elementarfunktion mindest einen Sensor oder einen Aktor enthält und andererseits jeder Aktor und jeder Sensor zu einer und nur zu einer Elementarfunktion gehört. Zustandsänderungen an Elementarfunktionen werden ausschließlich über dazu definierte Elementbefehle aufgerufen, Prozess-

schritte ausschließlich über Nutzungsbefehle organisiert. Ein zustandsändernder Prozessschritt enthält im Nutzungsbefehl den entsprechenden Elementarbefehl, die Sensorbelegung der Elementarfunktion nach erfolgreicher Befehlsausführung und eine Kontrollzeit für die Befehlsausführung, deren Überschreitung als Fehler erkannt wird. Nutzungsprogramme bestehen aus Folgen von Nutzungsbefehlen, wobei erst nach erfolgreicher Ausführung des Vorgängerbefehls der Nachfolgerbefehl aufgerufen wird. Parallelbefehle sind nur in zumindest temporär als voneinander unabhängig definierten Teilsystemen zulässig, die nach Abarbeitung der Parallelbefehle wieder synchronisiert werden können.

Da vor einem Nutzungsprogramm alle Elementarfunktionen mit einem Initialisierungsprogramm in einen definierten Zustand geführt werden, ein Nutzungsbefehl punktuell an einer Elementarfunktion eine Zustandsänderung einleitet und der neue Zustand auf befehlsgemäße Ausführung kontrolliert wird, wird im Abbild des Prozesses auf der Anlage immer ein vollständiger Sollzustand für alle Elementarfunktionen geführt.

Die Computerfunktionssteuerung CFS hat auf dieser Grundlage folgende Arbeitsweise: Sie hat das im Entwicklungsprozess geprüfte Abbild "Prozess auf Anlage" geeignet gespeichert und kontrolliert ständig die Übereinstimmung des damit vorgegebenen Soll-Zustandes für jeden Sensor an der Maschine mit dem Ist-Zustand des Sensors an der physischen Anlage (*Bilder 9 und 10*).

An einer CFS wird ein ändernder Prozessbefehl in Ausführungsergebnis und mit Zeitbegrenzung überwacht, so dass an einer Anlage mit CFS nur drei Zustände auftreten können:

- (1) Sollgemäß
- (2) Ein Sensor an einer Elementarfunktion hat den befehlsgemäß vorliegenden Sollzustand verlassen (Fehler 1)
- (3) Zeitüberschreitung, ein ändernder Befehl hat nicht innerhalb der vorgegebenen Zeitgrenze zu dem neuen Sollzustand geführt (Fehler 2).



Neben den damit entstehenden Vorteilen hinsichtlich Entwicklungszeit und -qualität, Inbetriebnahme und Fehlererkennung ermöglicht ein damit verfügbares Ereignis-Zeit-Protokoll eine neue Qualität der Prozesstransparenz.

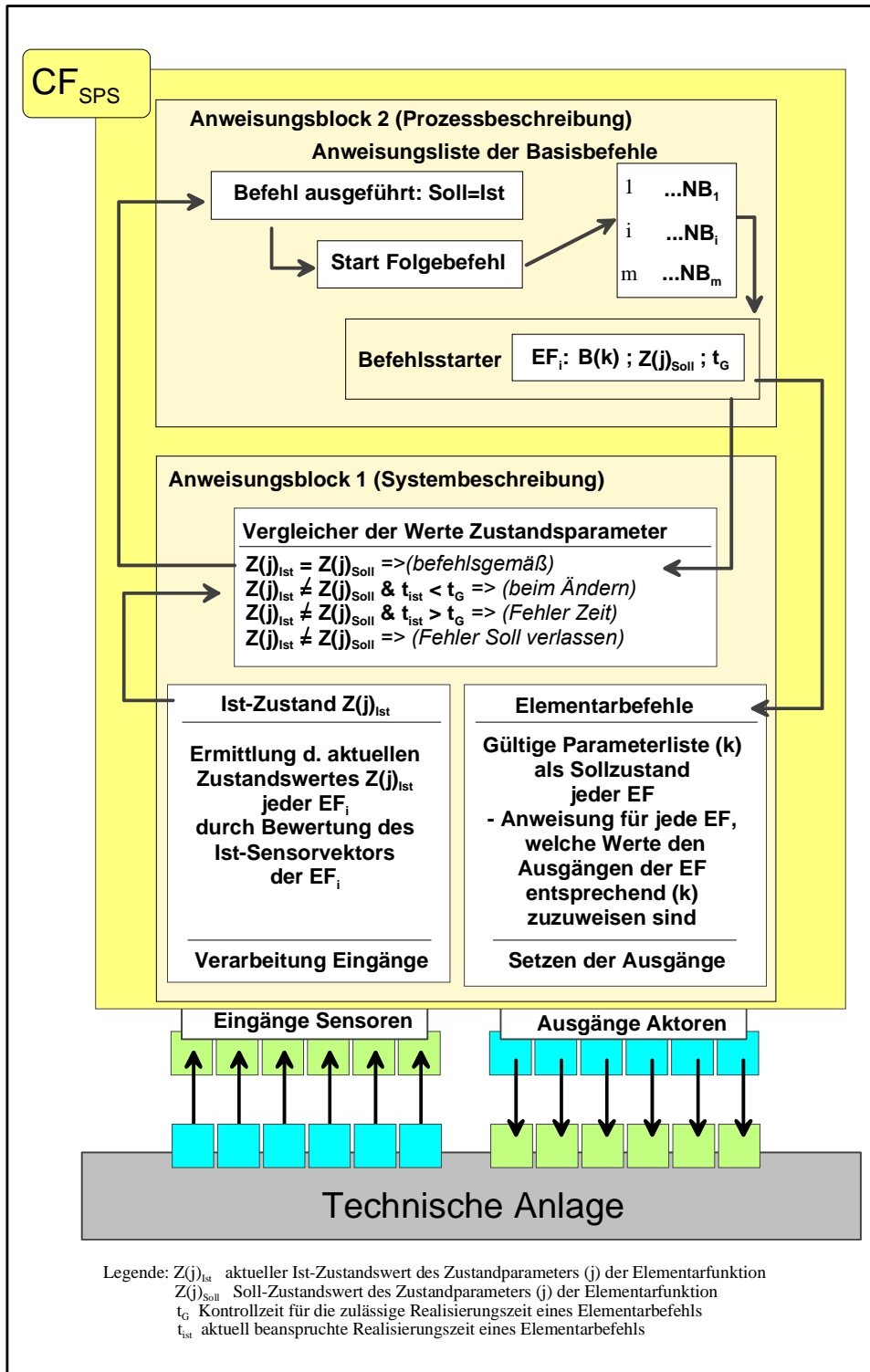


Bild 10: Funktionsstruktur  $CF_{SPS}$

Aus der "Methodik des funktionellen ganzheitlichen Abbildes" resultieren außerdem folgende Vorteile: Das Abbild kann in seiner Strukturierung alle vorliegenden oder gewonnenen Informationen in geeigneten Informationsschichten aufnehmen und dann die Darstellung in ausgewählten Sichten ermöglichen.

Darüber hinaus kann das Abbild "dynamisiert" werden und den Prozess auf der Maschine in seinen Zeitschritten darstellen. Es kann mit einer physischen Anlage "synchronisiert" werden und dann den Sollzustand für die Steuerung des Prozesses liefern. Es kann durch vorliegende präzisierende Informationen zu nur einem physischen Exemplar "exemplarisiert" werden, indem diese "Exemplarinformationen" die im Entwicklungsprozess erarbeiteten "Typeninformationen" ersetzen und von da ab den Lebenslauf dieses Exemplars durch das begleitende Aktualisieren mit Exemplarinformationen und die Notation der Prozesshistorie erfassen.

Für die "Methodik des ganzheitlichen funktionellen Abbildes" sind die benötigten Werkzeuge und Mittel heute mit der Computertechnik prinzipiell verfügbar, der damit aufgezeigte Weg macht den Entwicklungsprozess für technische Produkte wesentlich effektiver und führt im Produktprozess insgesamt zu einer Vielzahl von positiven Wirkungen.

## **5.3 Entwicklung und Bewertung eines erweiterten Blechumformprozessmodells unter besonderer Berücksichtigung der elasto-statischen Wechselwirkungen zwischen Maschine und Prozess**

### **Promovend**



### **André Hardtmann**

- geboren 1967 in Dresden
- 1989 - 1994 Studium Maschinenbau/ Umformtechnik an der TU Dresden
- 1994 - 2005 Wiss. Mitarbeiter am Lehrstuhl für Urform- und Umformtechnik der TU Dresden
- seit 2005 Wiss. Mitarbeiter am IWM der TU Dresden

### **Gutachter**

Prof. Dr.-Ing. habil. Knut Großmann (TU Dresden)

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann (TU München)

### **Verteidigung**

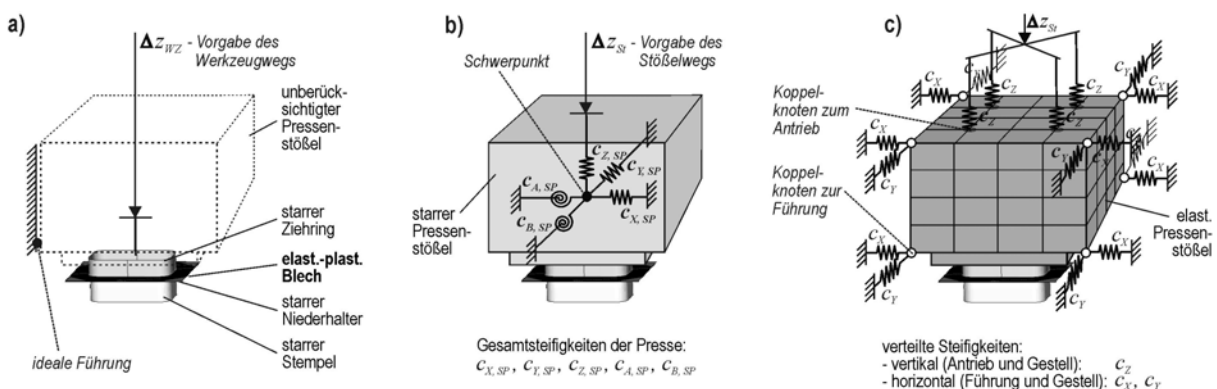
3. September 2010

Durch die Globalisierung der Märkte sehen sich die Unternehmen einem ständig steigenden Zeit-, Kosten-, und Innovationsdruck ausgesetzt. Für die Blech verarbeitende Industrie bedeutet das, durch optimale technologisch-methodische Lösungen eine Verkürzung der Entwicklungs- und Produkteinführungszeiten zu erreichen bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an Fertigungsprodukt und -prozess. Zu diesem Zweck wurden in den letzten Jahren u. a. virtuelle Verfahren wie die "Virtuelle Methodenplanung" oder die "Virtuelle Prozessplanung" entwickelt

und erfolgreich eingesetzt. Derartige virtuelle Methoden sind zum Beispiel im Bereich der Werkzeugeinarbeitung (Try-Out) derzeit noch nicht verfügbar. Dort ist aber eine ganzheitliche Betrachtung des Systems Maschine/Werkzeug und Werkstück/Prozess Voraussetzung, um die Einflüsse unterschiedlicher Pressmaschinen auf das Umformergebnis abzubilden und damit eine optimale Werkzeugtopologie zu erreichen.

Ausgehend von einer Analyse des Gesamtsystems "Blechumformprozess" wurden Defizite der herkömmlichen Simulationen herausgearbeitet. Vor allem die bisherige Vernachlässigung der Einflüsse der statischen Genauigkeitskenngößen von Pressmaschinen – wie die vertikale und kippende Verlagerung des Pressenstößels – wurde als Defizit erkannt.

Neben der Einbeziehung der Elastizität der Werkzeuge in die Prozessmodellierung sind auch die prozesskraftabhängigen Verlagerungen der Werkzeuge aufgrund von Nachgiebigkeiten der Umformmaschine mit zu berücksichtigen. Hierzu ist es notwendig, die elasto-statischen Eigenschaften der Presse in das FEM-Prozessmodell zu integrieren (*Bild 1*).



*Bild 1: Blechumformprozessmodell*

*a) ohne Presseneinflüsse*

*b) erweitert mit Pressenmodell für die elastische Aufhängung des starren Stößels im Schwerpunkt*

*c) erweitert mit Pressenmodell in Antriebs- und Führungsfedern aufgelöst für elastischen Stöße*

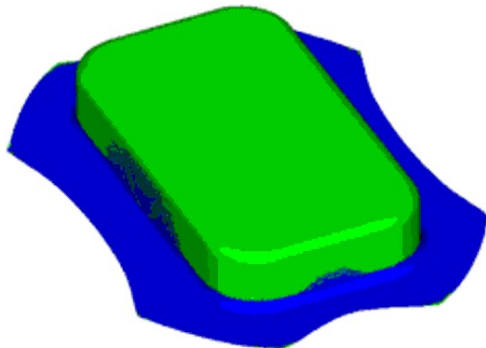
### Versuchsergebnis



H 260 B  
Wanzke HPV160  
150 kN Niederhalterkraft

### Simulationsergebnisse

Klassisches Umformprozessmodell  
ohne Maschinenrandbedingungen



Erweitertes Umformprozessmodell  
mit Maschinenrandbedingungen

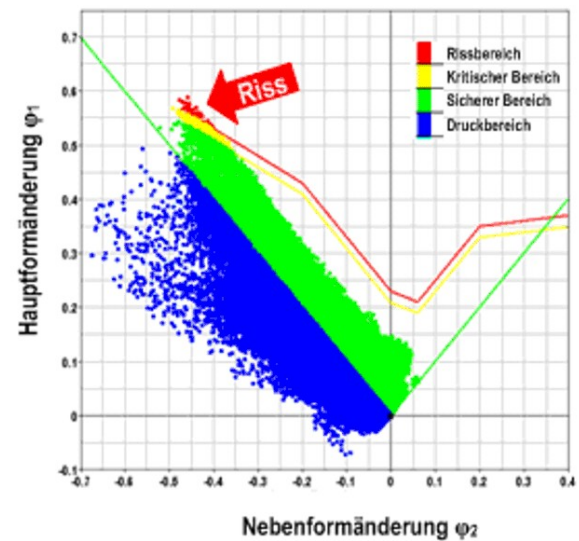
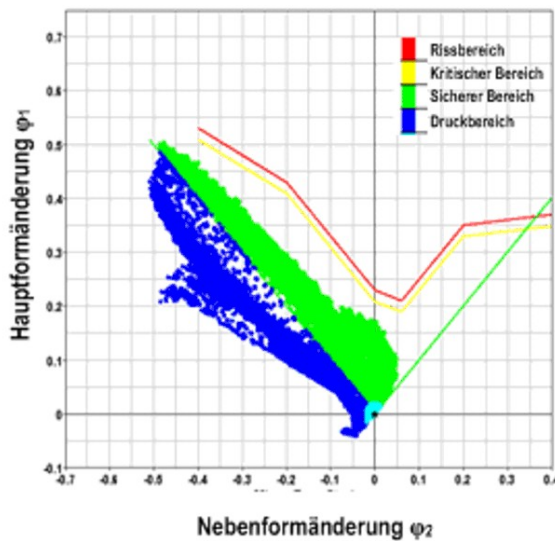
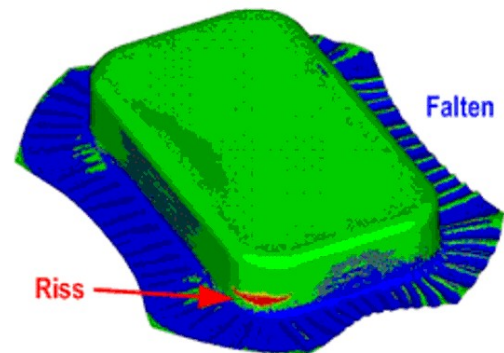


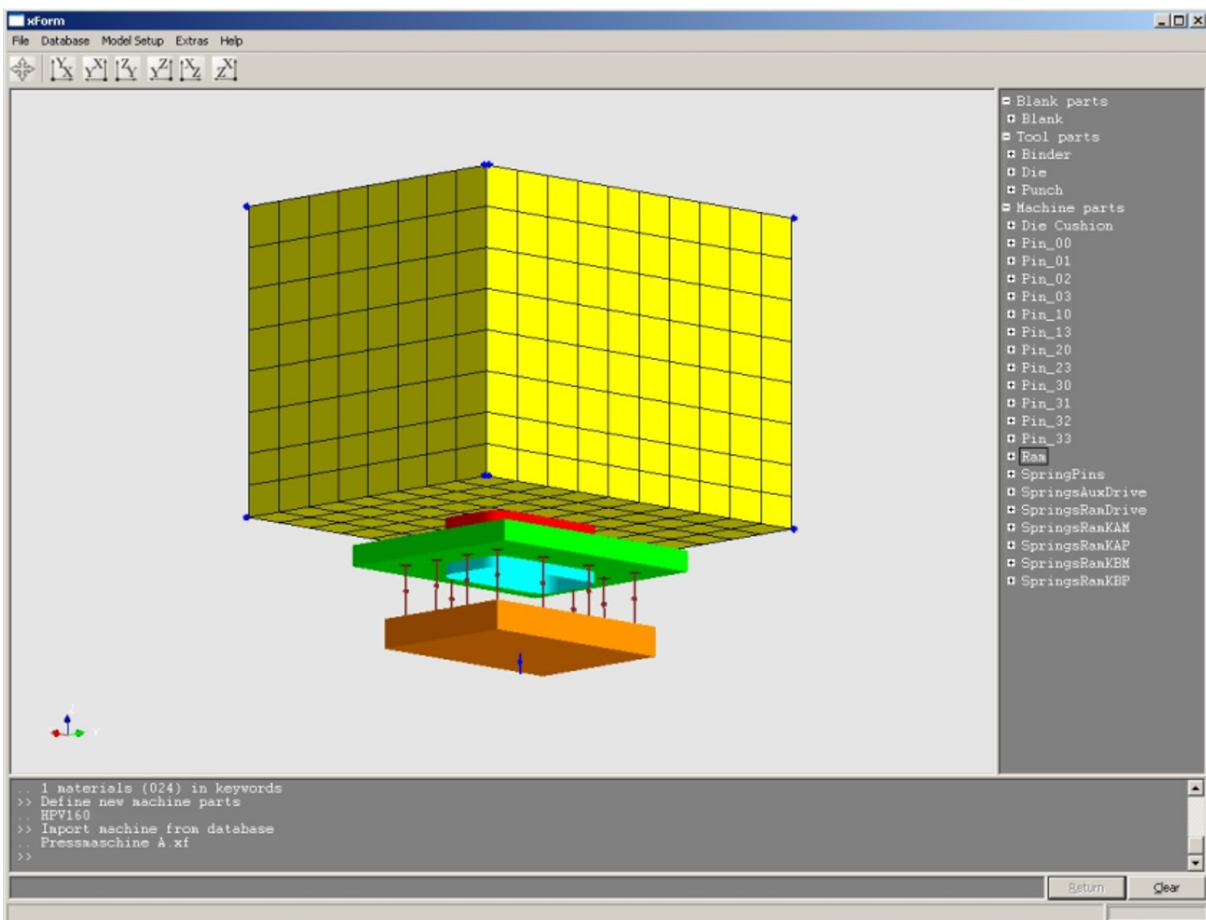
Bild 2: Vergleich der Simulationsergebnisse von klassischem und erweitertem Blechumformprozessmodell

Durch die ersetzende Modellierung der Presse mit Zieh-einrichtung über Federelemente konnten Modellstrukturen entwickelt werden, die die elastische Bettung der Werkzeug-

komponenten in der Maschinenumgebung im FEM-Prozessmodell abbilden können. Die Parametrierung der Federelemente erfolgt dabei über entsprechende Transformationsfunktionen aus bekannten Steifigkeitswerten der Pressen sowie aus Literaturwerten.

Die Modellrechnungen zeigten im Vergleich zu herkömmlicher Vorgehensweise, dass mit der Einbeziehung der statischen Presseneinflüsse in die Modellierung des Umformprozesses maschinenbedingte Ziehfehler sichtbar gemacht und damit prognostiziert werden können.

Die Vorhersagegenauigkeit in der Planung des Blechumformprozesses konnte somit durch Erweiterung des Prozessmodells mit den statischen Presseneinflüssen gesteigert werden.



*Bild 3: Softwareprototyp xForm für die erweiterte Prozessmodellierung*



Durch die Einbeziehung der Einflüsse aus Zieheinrichtung und des Werkzeugführungssystems konnte das erweiterte Umformprozessmodell weiterentwickelt werden, so dass die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Analyse gut übereinstimmen. Somit konnte anhand eines erweiterten Umformprozessmodells einer Experimentierumgebung zur umformenden Herstellung eines Beispielteils der Nachweis für die Verbesserung der Prognosefähigkeit erbracht werden (*Bild 2*).

Mit der Anwendung der entwickelten Modellierungsmethode können die Wechselwirkungen zwischen Prozess und Maschine realitätsnäher abgebildet werden. Dadurch wird die Genauigkeit und Vorhersagequalität des Blechumformprozessmodells erheblich verbessert.

Die Modellrechnungen zeigten, dass der Einsatz ersetzender Federelemente für die Pressenmodellierung zu einem größeren Aufwand führt, der aber durch die verbesserte Analysequalität gerechtfertigt ist.

Um den Aufwand bei der Simulation zu senken und eine benutzerfreundliche Modellerstellung zu gewährleisten, wurde ein Konzept für eine Software erstellt, mit deren Hilfe die Modellierung der Erweiterungen komfortabel gestaltet werden kann. Der hierfür entwickelte Softwareprototyp xForm (*Bild 3*) demonstriert die Anforderungen und Möglichkeiten, wie ein kommerziell nutzbarer Pre-Prozessor gestaltet werden sollte, um die in der Arbeit erstellten Methoden einem breiteren Nutzerkreis zur Verfügung zu stellen.

Mit der Verwendung des vorgestellten Konzeptes zur Modellierung wird der potenzielle Anwender der Prozesssimulation neue Wege bezüglich Modellaufbau und Programmhandling betreten. Aus diesem Grund ergeben sich für Entwickler kommerzieller FEM-Software Anregungen für die Erweiterung und Optimierung der Funktionalität ihrer Programme, um so einen komfortableren Umgang mit ihren Produkten zu ermöglichen und damit neue Märkte für ihre Produkte zu erschließen.

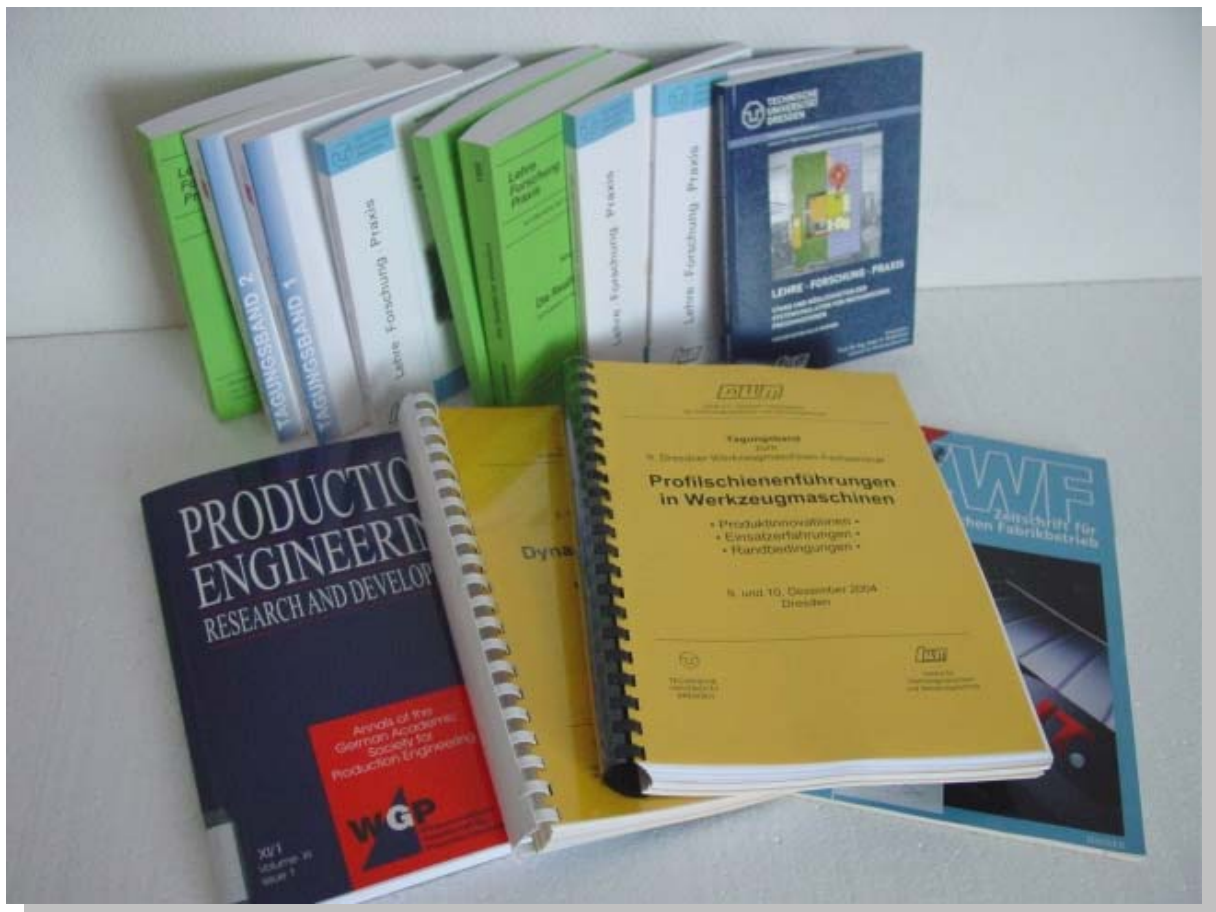
Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte erweiterte Blechumformprozessmodell gibt den Technologen und Konstrukteuren in der Industrie eine Lösungsstrategie in die Hand, um durch den Einsatz der Prozesssimulation unter der Berücksichtigung der werkzeug- und maschinenseitigen Randbedingungen in der Produktionsvorbereitung Schwachstellen im Zusammenwirken der Teilsysteme Maschine-Werkzeug-Werkstück zu erkennen und zu beseitigen.

Das Anwendungspotenzial liegt bei den Unternehmen des Werkzeugbaus, die durch den Einsatz der erarbeiteten Lösungsstrategie beispielsweise Werkzeuge mit geringem oder sogar ohne Einarbeitungsbedarf herstellen können. Des Weiteren können Pressenbetreiber den Werkzeugeinarbeitungsprozess verkürzen oder teilweise ganz einsparen und damit Investitionskosten verringern. Mit dem erweiterten Prozessmodell werden zudem neue Anwendungsfelder der Prozesssimulation beispielsweise zur werkstückbezogenen Pressenauswahl oder zur Ermittlung prozessstabiler Betriebsparameter der Maschine eröffnet.

---

# 6 Öffentlichkeitsarbeit

---



## **6.1      Dresdner Werkzeugmaschinen- Fachseminare**

Die im Jahr 2000 begonnene Reihe der Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminare wurde im Berichtszeitraum erfolgreich fortgesetzt.

Die Fachseminare waren das Forum für Forscher und Ingenieure zu Darstellung und Diskussion des aktuellen Arbeitsstandes ausgewählter Spezialthemen der Werkzeugmaschinenentwicklung.

Das Themenangebot orientierte sich einerseits an aktuellen Forschungsschwerpunkten des Institutes für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik (IWM) der TU Dresden, andererseits war es Ziel und Verpflichtung, die Veranstaltungen mit Beiträgen der auf den jeweiligen Spezialgebieten führend tätigen Forschungsinstitute der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) sowie mit Industriebeiträgen zu bereichern.

### **14. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar *Lineardirektantriebe in Werkzeugmaschinen* 03. bis 04.12.2009**

U. Weinmann  
Bosch Rexroth AG, Lohr am Main  
Direktantriebe in der Anwendung

M. Knorr  
Siemens Linear Motor Systems GmbH & Co. KG, München  
Integration von Direktantrieben in Werkzeugmaschinen

M. Pfeiffer  
IDAM INA Drives & Mechatronics, Suhl  
Linearmotor mit Führungsqualitäten

Prof. Dr.-Ing. habil. R. Neugebauer, Dr.-Ing. W.-G. Drossel,  
K. Pagel  
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik  
IWU, Chemnitz  
Regelungskonzepte für Maschinen mit verkoppelten Achsen

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann, Dr.-Ing. J. Müller  
Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik,  
TU Dresden  
Impulskompensation an einer linearmotorgetriebenen  
Maschinenachse

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann, O. Holowenko  
Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik,  
TU Dresden  
Untersuchungen zur Reduzierung der Anregung von  
Gestellbiegeschwingungen an einer impulskompensierten  
Vorschubachse

Prof. Dr.-Ing. A. Verl, Dr.-Ing. K.-H. Wurst, A. Huf  
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und  
Fertigungseinrichtungen, Universität Stuttgart  
Konzeption und Entwicklung von anwendungsoptimierten  
Direktantrieben

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher, D. A. Friedrich  
Werkzeugmaschinenlabor, RWTH Aachen  
Simulationen und Betrieb eines ruckentkoppelten, gestapelten  
Achsverbundes

Prof. Dr.-Ing. B. Denkena, Dr.-Ing. H.-Chr. Möhring, O. Gümmer  
Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen,  
Leibniz Universität Hannover  
Hochdynamische Werkzeugmaschine mit innovativen  
impulsentkoppelten Vorschubachsen

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann  
Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik,  
TU Dresden  
MAX – Versuchsträger für eine Hochgeschwindigkeits-Leichtbau-  
Genauigkeitsmaschine

K. Andreu  
MAP Werkzeugmaschinen GmbH, Magdeburg  
Flexibles direkt angetriebenes 5-Achs-Simultan-Hochgeschwin-  
digkeits-Bearbeitungszentrum

J. Gross

MAG Powertrain GmbH, Eislingen/Fils

Einsatz der Lineardirektantriebstechnik aus Sicht des  
Werkzeugmaschinenherstellers MAG Powertrain

Dr.-Ing. U. Tüllmann

DECKEL MAHO Seebach GmbH, Seebach

Direktantriebe im Einsatz an hochdynamischen Werkzeug-  
maschinen





**15. Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar**  
***Profilschienenführungen in Werkzeugmaschinen***  
**30.09. bis 01.10.2010**

E. Albert

Bosch Rexroth AG, Schweinfurt

Entwicklungen der Linearführungssysteme für Werkzeugmaschinen

Prof. Dr.-Ing. K. Wegener, Dr. sc. techn. S. Weikert, P. Maglie,

Dr. sc. J. Mayr, M. Ess

inspire AG, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Führungen: Anforderungen und Realität

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann, Dr. rer. nat. H. Weishart

Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik,

TU Dresden

Modellierung des Wälzkörperumlaufs von Profilschienenführungen

D. Frölich, M. Scheuermann, Prof. Dr.-Ing. B. Sauer

Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik,

TU Kaiserslautern

Dynamiksimulation einer Rollenschienenführung

M. Heyne, T. Erbe, Prof. Dr.-Ing. R. Theska

Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion, TU Ilmenau

Planare Wälzführung - eine Alternative für hochpräzise

Anwendungen

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher, M. Kunc, M. Fey, W. Klein

Werkzeugmaschinenlabor, RWTH Aachen

Reibungs- und Dämpfungseigenschaften von Profilschienenführungen

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann, S. Krihning

Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik,

TU Dresden

Lebensdauerprüfungen von Profilschienenführungen und

Prüfstandskonzepte

M. Schneider

Epucet Mineralgusstechnik GmbH & Co. KG, Wangen

Optimale Schnittstellengestaltung zwischen  
Profilschienenführung und Mineralgussbett für hochpräzise  
Anwendungen im Maschinenbau

T. Habelitz

Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG, Homburg

Energieeffiziente Linearachsen für die Werkzeugmaschine

E. Matthes

Feinmess Dresden GmbH

Einsatz von Profilschienenführungen in Positioniersystemen

S. Bühler

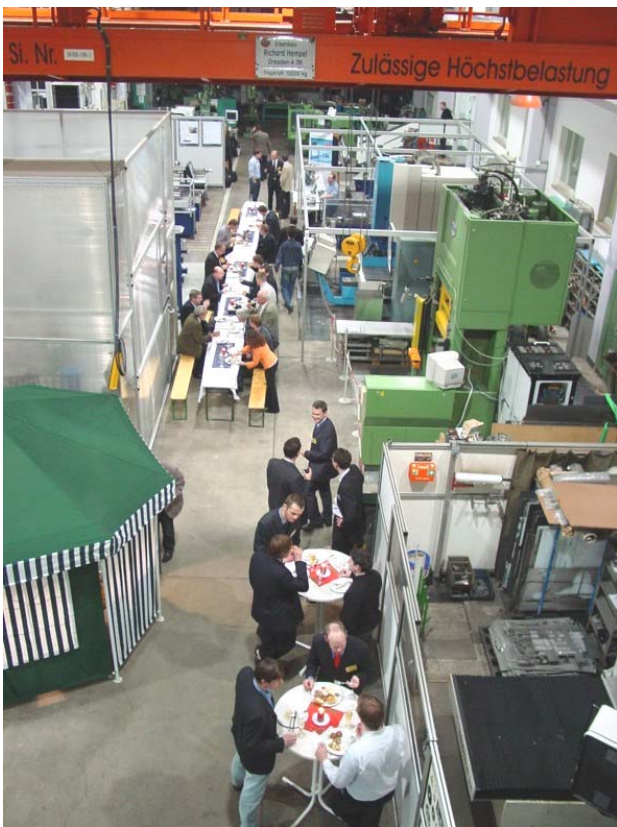
ACE Stoßdämpfer GmbH, Langenfeld

Klemmen und Bremsen auf Profilschienenführungen

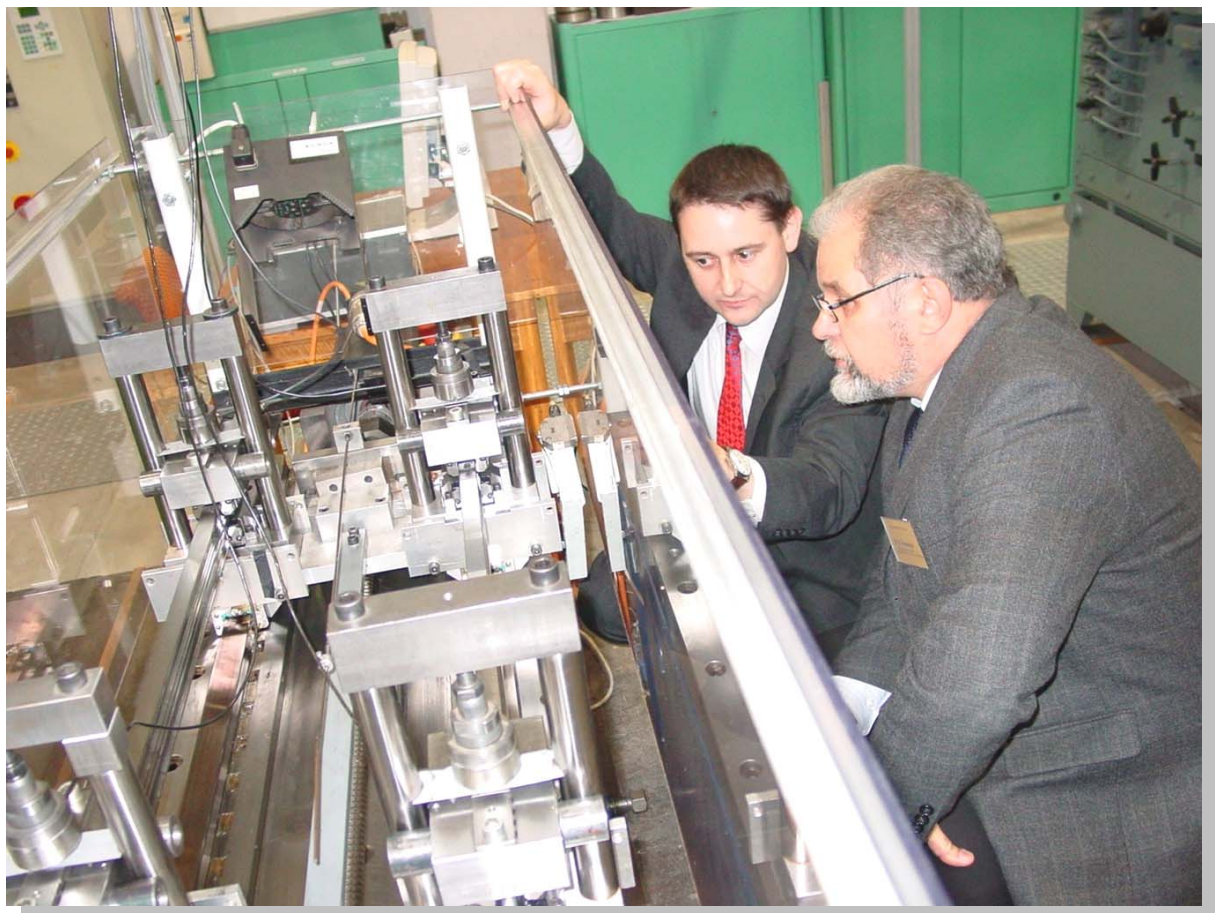
S. Müller

Klüber Lubrications München KG

Produzieren nach Plan mit dem Schmierstoff als Maschinen-  
element







## **6.2 Veröffentlichungen**

### **6.2.1 Bücher**

#### **Jahr 2009**

Großmann, K.

Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen  
2007/2008

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen,  
2009 TU Dresden, ISBN 978-3-86780-107-2

Müller, J.

Vergleichende Untersuchung von Methoden zur Verringerung der  
Gestellanregung durch linearmotorgetriebene  
Werkzeugmaschinenachsen

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen,  
2009 TU Dresden, Dissertation, ISBN 978-3-86780-109-6

Möbius, V.

Produktprozess im Computerzeitalter – Methodische Grundsätze  
zur Informationsbehandlung im Produktprozess und deren  
Anwendung auf die Entwicklung eines Steuerungskonzepts

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen,  
2009 TU Dresden, Dissertation, ISBN 978-3-86780-127-0

#### **Jahr 2010**

Jungnickel, G.

Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen-  
Modellierung und Parametrierung

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen,  
2010 TU Dresden, ISBN 978-3-86780-172-0

Hardtmann, A.

Entwicklung und Bewertung eines erweiterten Blech-  
umformprozessmodells unter besonderer Berücksichtigung der  
elasto-statischen Wechselwirkungen zwischen Maschine und  
Prozess

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen,  
2010 TU Dresden, Dissertation, ISBN 978-3-86780-189-8

## 6.2.2 Fachaufsätze

### Jahr 2009

Raatz, Ch.; Rehn, St.; Petrak, A.; Großmann, K.; Wagenführ, A.  
Thermoglätten von Holzwerkstoffen mittels parallelkinematischer  
Bewegungseinheit

Holztechnologie, 50 (2009) 1, S. 17-21

Großmann, K.; Löser, M.

Prognose von Stabilitätsgrenzen beim Fräsen

ZWF 104 (2009) 3, S. 147-151

Großmann, K.; Mühl, A.; Rehn, St.

Variotherme Prozesse beim Konsolidieren textilverstärkter  
thermoplastischer Hohlprofile. Thermische Berechnung

ZWF 104 (2009) 4, S. 242-247

Cherif, Ch.; Rödel, H., Hoffmann, G.; Diestel, O.; Herzberg, C.;  
Paul, C.; Schulz, C; Großmann, K.; Mühl, A.; Mäder, E.; Brüning, H.  
Textile Verarbeitungstechnologien für hybridgarnbasierte  
komplexe Preformstrukturen

(Textile manufacturing technologies for hybrid based complex  
preform structures)

Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology 5 (2009) 2,  
S. 103-129

Großmann, K.; Rudolph, H.

Die virtuelle Werkzeugmaschine in einer Simulationsumgebung

ZWF 104 (2009) 9, S. 693-697

Großmann, K.; Müller, J.

Untersuchungsergebnisse zur Wirksamkeit der Impulskompensation  
von Lineardirektantrieben

ZWF 104 (2009) 9, S. 761-767

Großmann K.; Weishart H.; Wiemer H.; Neidhardt L.

Simulation der Wälzkörperdynamik in Profilschienen-Führungen

ZWF 104 (2009) 10, S.858-863

## Jahr 2010

Großmann, K.; Wiemer, H.; Hardtmann, A.; Penter, L.;  
Kriechenbauer, S.

Static compensation for elastic tool and press deformations  
during deep drawing

Production Engineering Volume 4, Numbers 2-3, 2010, pp. 147-  
155

Ficker, Th., Hardtmann, A.

Axialprofilrohr-Walzen/Drehen

Umformtechnik 44 (2010) 4, S. 32-34

Großmann, K.; Mühl, A.

Reduktion strukturdynamischer und thermoelastischer FE-  
Modelle

Eine Diskussion am Beispiel Werkzeugmaschinen-Gestellbauteile  
ZWF 105 (2010) 6, S. 594-599

Großmann, K.; Rehn, St.

Wärmestromsensoren zur Messung des Wärmeaustauschs von  
Werkzeugmaschinen und Umgebung

ZWF 105 (2010) 7-8, S. 660-665

Großmann, K.; Rudolph, H.; Brecher, C.; Fey, M.; Zäh, M.;  
Niehues, K.; Schwarz, S.

Dämpfungseffekte in Werkzeugmaschinen

ZWF 105 (2010) 7-8, S. 676-680

Großmann, K.; Wiemer, H.

Reproduzierbare Fertigung in innovativen Prozessketten

Besonderheiten innovativer Prozessketten und methodische  
Ansätze für ihre Beschreibung, Analyse und Führung (Teil 1)

ZWF 105 (2010) 10, S. 855-859

Großmann, K.; Wiemer, H.; Großmann, K. K.; Weller, J.

Reproduzierbare Fertigung in innovativen Prozessketten

Konzeption eines Beschreibungs- und Analysetools (Teil 2)

ZWF 105 (2010) 11, S. 954-958



## 6.2.3 Vorträge

### Jahr 2009

Hoffmann, G.; Torun, A. R.; Cherif, Ch.; Mühl, A.; Löser, M.; Großmann; K.

Entwicklung einer Spezialwebmaschine für die Fertigung von spacer-Geweben

in: Tagungsband. 2. Symposium Produktionstechnik, Zwickau, 01.-02. April 2009, S. 227-232

Großmann, K.; Wiemer, H.; Hardtmann, A.; Penter, L.; Kriechenbauer, S.

Modellierung der Maschineneinflüsse auf den Umformprozess

Vortrag auf dem 1. Dresdner LS-Dyna-Infotag, 17. September 2009, Dresden

Großmann, K.; Wiemer, H.; Hardtmann, A.; Penter, L.; Kriechenbauer, S.

Statische Kompensationsmöglichkeiten von elastischen

Maschinen- und Werkzeugdeformationen unter Prozesslast

Vortrag auf dem 1. Dresdner LS-Dyna-Infotag, 17. September 2009, Dresden

Großmann, K.; Wiemer, H.; Hardtmann, A.; Penter, L.; Kriechenbauer, S.

Adjusting the Contact Surface of Forming Tools in Order to

Compensate for Elastic Deformations during the Process

Proceedings of 7th European LS-DYNA Conference, Salzburg 2009

Großmann, K.; Müller, J.

Impulskompensation an einer linearmotorgetriebenen

Maschinenachse

14. Dresdner WZM-Fachseminar "Lineardirektantriebe in

Werkzeugmaschinen", 3.-4.12.2009 TU Dresden, Tagungsband

Großmann, K.; Holowenko, O.

Untersuchungen zur Reduzierung der Anregung von

Gestellbiegeschwingungen an einer impulskompensierten

Vorschubachse

14. Dresdner WZM-Fachseminar "Lineardirektantriebe in Werkzeugmaschinen", 3.-4.12.2009 TU Dresden, Tagungsband

Großmann, K.

MAX – Versuchsträger für eine Hochgeschwindigkeits-Leichtbau-Genauigkeitsmaschine

14. Dresdner WZM-Fachseminar "Lineardirektantriebe in Werkzeugmaschinen", 3.-4.12.2009 TU Dresden, Tagungsband

Wiemer, H.; Großmann, K. K.

Anwendungsfälle der datenbankgestützten Prozesskettenmodellierung und Vorgehensweise zur Entwicklung unterstützender Software.

Werkzeugmaschinen-Seminar des Institutes für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, 10.12.2009 TU Dresden

## **Jahr 2010**

Großmann, K.; Wiemer, H.; Hardtmann, A.; Penter, L.;

Kriechenbauer, S.

Static and Dynamic Influences on the Final Part Shape in FE Forming Analysis

Proceedings of 2nd International CIRP Conference on "Process Machine Interactions", Vancouver 2010

Altan, T.; Penter, L.

Application of Modern Cushion Systems to Improve Quality and Productivity in Sheet Metal Forming

Proceedings of 2nd International CIRP Conference on "Process Machine Interactions", Vancouver 2010

Großmann, K.; Kriechenbauer, S.

Erfahrungen mit der Hybridvernetzung "Dummy Shell Method" zur Modellierung elastischer Maschinen- und Werkzeugeinflüsse auf den Blechumformprozess

LS-DYNA-Infotag, Dresden 2010

Großmann, K.; Penter, L.; Wiemer, H.; Hardtmann, A.

Probleme und Möglichkeiten bei der Modellierung dynamischer Einflüsse auf den Ziehprozess mit LS-DYNA

LS-DYNA-Infotag, Dresden 2010

- Weller, J.; Großmann, K. K.; Großmann, K.  
Meta-Modellierung im praktischen Einsatz  
Informatik 2010, Workshop "Methodische Entwicklung von  
Modellierungswerkzeugen", Tagungsband, Leipzig 2010
- Weller, J.; Helbig, M.; Großmann, K.  
Eine Methode für den praktischen Einsatz von  
Konfigurationsmanagement in verteilten Modellierungsprojekten  
MOBIS "Modelling Business Information Systems", Tagungsband,  
Dresden 2010
- Weller, J.; Wiemer, H.; Großmann, K. K.; Helbig, M.;  
Großmann, K.  
Modellierung in der Produktionstechnik: Ein Ansatz zur effektiven  
Generierung von Technologie-Know-how für die Absicherung  
einer reproduzierbaren Fertigung  
MOBIS "Modelling Business Information Systems", Tagungsband,  
Dresden 2010
- Weller, J.; Jührisch, M.; Großmann, K.  
Information modeling: the need for semi-automatic model  
analysis and transformation  
Proceedings of 16th Americas Conference on Information  
Systems, Lima 2010
- Weller, J.; Helbig, M.; Großmann, K.  
Eine Methode für die Umsetzung der Änderungsverwaltung von  
Sprache, Werkzeug und Modell  
Informatik 2010, Workshop "Methodische Entwicklung von  
Modellierungswerkzeugen", Tagungsband, Leipzig 2010
- Wiemer, H.; Wagenführ, A.; Pfriem, A.; Siegel, C.; Großmann, K.;  
Helbig, M.; Fischer, S.; Bremer, M.; Gohrbandt, A.; Feldner, A.;  
Hufenbach, W.; Kupfer, R.; Neinhuis, C.; Horbens, M.  
Charakterisierung des Anwendungspotenzials biologischer  
Materialverbände und technologische Übertragung in  
Verbundwerkstoffe mittels modellgestützter Methoden  
1. Internationales Kolloquium des Exzellenzclusters "ECEMP –  
European Centre for Emerging Materials and Processes  
Dresden", Tagungsband, Dresden 2010

- Großmann, K.; Wiemer, H.; Neugebauer, R.; Mauermann, R.  
Simulationsunterstützung für das Tiefziehen auf  
Servospindelpressen  
30. EFB-Kolloquium "Bauteile der Zukunft", Tagungsband, Bad  
Boll 2010
- Weller, J.  
Arbeitsstand und Projekteinsatz in der Forschungsgruppe  
Prozesskette  
Werkzeugmaschinen-Seminar des Institutes für  
Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, Dresden 2010
- Wiemer, H.; Weller, J.  
Informationsmanagementsystem zur Unterstützung von  
Technologieinbetriebnahmen und zur Bildung von  
Technologiewissen  
Vortrag am Fraunhofer IWS, Dresden 2010
- Wiemer, H.; Großmann, K. K.  
Anwendungsfälle der datenbankgestützten  
Prozesskettenmodellierung und Vorgehensweise zur Entwicklung  
unterstützender Software  
Werkzeugmaschinen-Seminar des Institutes für  
Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, Dresden, 10.  
Dezember 2009
- Großmann, K.; Weishart, H.  
Modellierung des Wälzkörperumlaufs von Kugelschienenfüh-  
rungen  
15. Dresdner WZM-Fachseminar "Profilschienenführungen in  
Werkzeugmaschinen", 30.09.-01.10.2010 TU Dresden,  
Tagungsband
- Großmann, K.; Krihning, S.  
Lebensdauerprüfungen von Profilschienenführungen und  
Prüfstandskonzepte  
15. Dresdner WZM-Fachseminar "Profilschienenführungen in  
Werkzeugmaschinen", 30.09.-01.10.2010 TU Dresden,  
Tagungsband

## **6.2.4 Forschungsberichte**

### **Jahr 2009**

Jungnickel, G. ; Drossel, W.-G. ; Müller, J. ; Pagel, K.  
Untersuchungen zu den Grenzwerten des Einsatzes  
adaptronischer Komponenten zur Impulskopplung von  
linearmotorgetriebenen Werkzeugmaschinenachsen unter  
veränderlichen strukturmechanischen Umgebungsbedingungen  
Abschlussbericht zum DFGSchwerpunktprogramm 1156  
"Adaptronik für Werkzeugmaschinen", 2007-2009

Großmann, K.; Wiemer, H.; Weishart, H.; Neidhardt, L.  
Entwicklung der Grundlagen für die simulationsgestützte Analyse  
von Profilschienenführungen  
Abschlussbericht zum DFG-Vorhaben GR 1458/29-1

Großmann, K.; Löser, M.  
Strukturbasierte Modellierung des drehzahlabhängigen  
Übertragungsverhaltens eines Spindel/Werkzeug-Systems  
Arbeitsbericht/Fortsetzungsantrag zum DFG-Vorhaben  
GR 1458/22-2

### **Jahr 2010**

Großmann, K.; Müller, J..  
Grundlagenuntersuchungen für die Impulskompensation an  
Vorschubachsen mit Lineardirektantrieb  
Arbeitsbericht/Fortsetzungsantrag zum DFG-Vorhaben  
GR 1458/35-1

## 6.3 Gewinnung von Ingenieur-Nachwuchs

Große Bedeutung kommt am Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen der Gewinnung von Ingenieur-Nachwuchs zu. Dazu werden Schülern und anderen interessierten Personen viele Möglichkeiten geboten, sich im Werkzeugmaschinen-Versuchsfeld, im SPS-Labor und im Computer-Pool mit moderner Maschinen- und Rechentechnik sowie den angebotenen Lehrinhalten und aktuellen Forschungsvorhaben vertraut zu machen.

Nachfolgend sind zentrale Veranstaltungen der TU Dresden, für die der Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen engagierte Beiträge lieferte, sowie eigene Angebote aufgeführt, die von den Studierenden in spe gern und zahlreich genutzt wurden.

Der Dank für Vorbereitung und Durchführung der Veranstaltungen gilt hier insbesondere dem DWM e. V. Dresdner Freundeskreis der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik.

### Jahr 2009

#### UNI LIVE - Schnupperstudium für einen Tag

08.01.2009

- Angebot der tagaktuellen Lehrveranstaltungen zum "Schnuppern"
- Versuchsfeldbesichtigungen
- Demonstration von CAD- und Berechnungssoftware

#### Dies academicus

13.05.2009

- Traditionell steht der Dies academicus für den "Blick über den Tellerrand" – für Studenten und Mitarbeiter
- TU-zentrale Veranstaltungen mit interessanten Vorträgen, Informationsmöglichkeiten und sportlicher Betätigung, z. B. dem Campuslauf
- Das IWM öffnet an diesem Tag das Werkzeugmaschinen-Versuchsfeld und das SPS-Labor



**Uni-Tag (Tag der offenen Tür der TU Dresden)**

16.05.2009

- Informationen zur Ausbildung in der Studienrichtung Produktionstechnik und in der Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung
- Vorführung von Lehr- und Forschungsversuchsständen im Versuchsfeld des IWM
- PC-Einsatz in Konstruktion und Verhaltensberechnung



*Tag der offenen Tür – Informationen für Schüler und Eltern*

## Info-Theke

16.07.2009

- Informationen zum Hauptstudium für Studenten der Studiengänge Maschinenbau und Mechatronik nach Abschluss des Grundstudiums
- Möglichkeit der Besichtigung von Maschinen-, Steuerungs- und Versuchstechnik
- Vorführung von Auslegungs- und Analyse-Software an den PC-Arbeitsplätzen
- Informationen zu Einsatzmöglichkeiten der Absolventen der Vertiefungsrichtung Werkzeugmaschinenentwicklung
- Leckeres vom Grill und Getränke



*Info-Theke: Infos zum Hauptstudium, Bratwurst, Getränke*



## **Jahr 2010**

### **UNI LIVE - Schnupperstudium für einen Tag**

14.01.2010

### **Dies academicus**

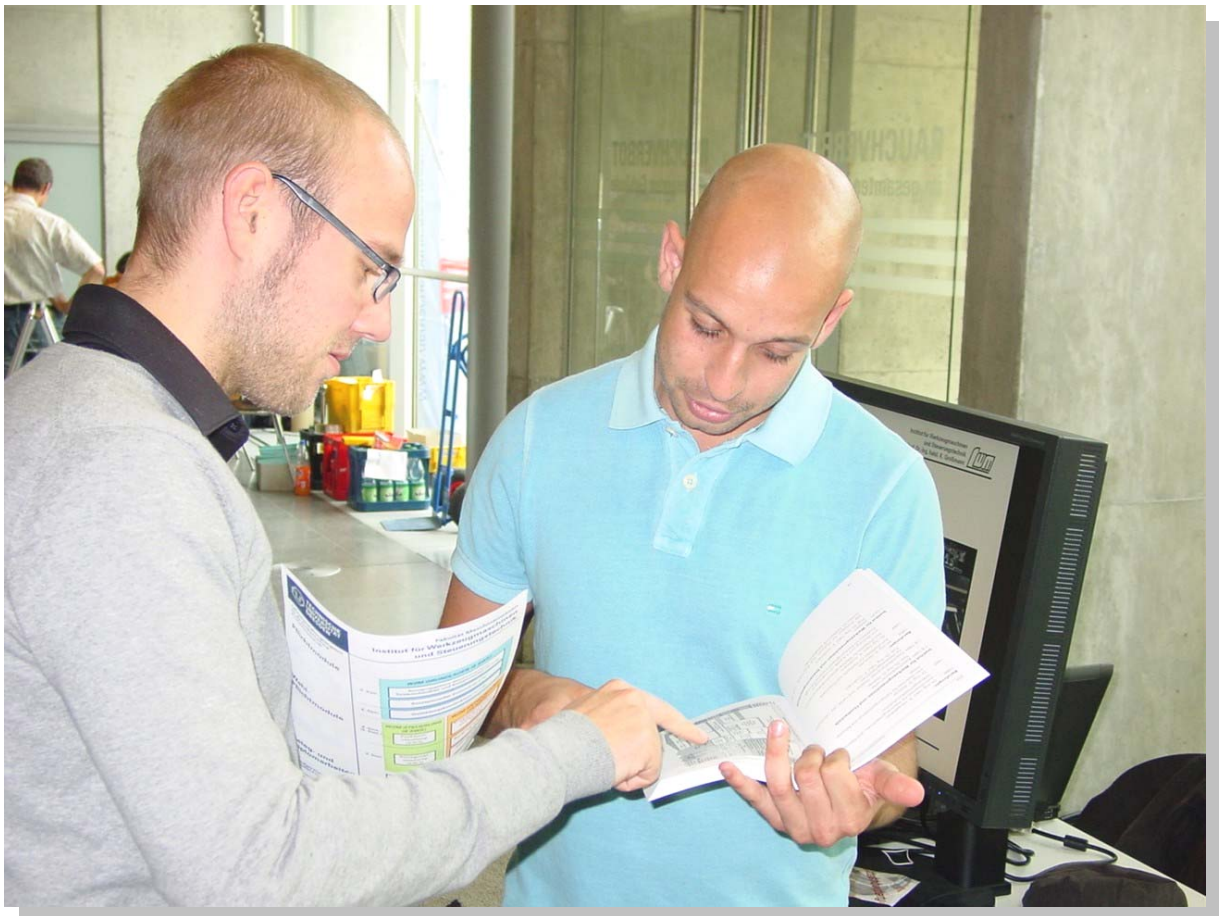
05.05.2010

### **Uni-Tag** (Tag der offenen Tür der TU Dresden)

29.05.2010

### **Info-Theke**

15.07.2010



*Studienberatung im Hörsaalzentrum*

## 6.4 Mitarbeit in Gremien

### **Prof. Dr.-Ing. habil. K. Großmann**

- Mitglied der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP)
- DFG-Fachgutachter
- AiF-Fachgutachter
- Stellvertretender Leiter der AiF-GAG 4
- Sprecher des Produktionstechnischen Zentrums Dresden (ProZeD)
- Vertreter des Maschinenbaus in der Studienkommission für den Studiengang Mechatronik der TU Dresden
- Vorsitzender des Beirates des DWM e. V. Dresdner Freundeskreis der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik

### **Dipl.-Ing. G. Brzezinski**

- Vorsitzender des Vorstandes des DWM e. V. Dresdner Freundeskreis der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik

### **J. Ertel**

- Mitglied des Meisterrates der TU Dresden

### **Dipl.-Inf. K. K. Großmann**

- Mitglied des Vorstandes des DWM e. V. Dresdner Freundeskreis der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik

### **Dr.-Ing. H. Wiemer**

- Mitglied des Vorstandes des DWM e. V. Dresdner Freundeskreis der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik

## 6.5 Förderverein DWM e. V.

### Name und Sitz des Vereins

Der Förderverein des Instituts für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik der Technischen Universität Dresden führt den Namen

*DWM e. V.*

*Dresdner Freundeskreis der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik.*

Der Sitz des Vereins ist Dresden.

### Aufgaben, Gemeinnützigkeit

Der Verein verfolgt ausschließlich gemeinnützige Zwecke. Seine Aufgabe ist die Förderung von Wissenschaft und Forschung auf dem Gebiet der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik und die damit verbundene Unterstützung des Instituts für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik der Technischen Universität Dresden. Dies betrifft vor allem die Initiierung von Forschungsvorhaben, die regelmäßige Verbreitung von Forschungsergebnissen, Aufbau, Pflege und Koordination von Kontakten zur Industrie und zu Forschungseinrichtungen, den wissenschaftlich-technischen Erfahrungsaustausch sowie Fragen der fachspezifischen Aus- und Weiterbildung.

Die Vereinsmitglieder verwirklichen diese Zielstellung durch:

- Die Erarbeitung zukunftsorientierter Maßstäbe für die Entwicklung und Anwendung von Werkzeugmaschinen.
- Die Förderung praxisrelevanter Inhalte für Lehre und Weiterbildung auf dem Gebiet der Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik.
- Beratungsleistungen bei der Ausarbeitung und Durchführung gemeinsamer Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit der Industrie.
- Die Unterstützung interdisziplinärer Forschungsprojekte durch institutsübergreifende wissenschaftliche Zusammenarbeit.

- Die Vermittlung von Forschungspartnern, Praktikumsplätzen und Arbeitsstellen.
- Die Konzipierung und Organisation von Vortragsveranstaltungen, Kolloquien, Seminaren und Tagungen zur Publikation der Forschungsergebnisse des Instituts.
- Publikationen zur zeitnahen Verbreitung von Forschungsergebnissen und Nachrichten aus dem Fachgebiet.
- Die Pflege von Kontakten zu den Absolventen des Instituts in Wirtschaft, Wissenschaft und Administration.
- Die materielle Anerkennung herausragender Studien- und Forschungsleistungen in der Fachrichtung.

### **Mitglieder im DWM e. V.**

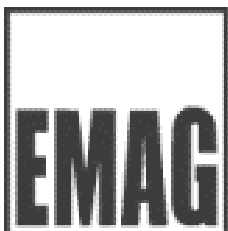
Neben zahlreichen natürlichen Personen - darunter viele Absolventen des IWM - sind die folgenden Unternehmen und Institutionen Mitglied im Förderverein und tragen aktiv zur Erfüllung der gesteckten Ziele bei:



TU Dresden  
CIMTT Zentrum für Produktionstechnik  
und Organisation



MAB Maschinen- und Anlagenbau  
GmbH



EMAG Leipzig Maschinenfabrik GmbH



Wohlenberg Werkzeugmaschinen  
GmbH



Aktuelle Informationen zur Tätigkeit des Fördervereins gibt es im Internet unter

**<http://www.dwm.info>**

Dort können auch Satzung des Vereins und Mitgliedsantrag herunter geladen werden.



*DWM e. V. - Jahreshauptversammlung 2010*



*Unser Anspruch - nicht nur im Jahr 2010: Eilgang bis Anschlag*

## 6.6 Schriftenreihe

### Lehre • Forschung • Praxis

Die Forschungsergebnisse des IWM werden u. a. in der Schriftenreihe **Lehre • Forschung • Praxis** veröffentlicht.

In dieser Reihe sind durch Unterstützung und in Zusammenarbeit mit dem DWM e. V. Dresdner Freundeskreis der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik bisher erschienen:

- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 1995/96**

121 Seiten, erschienen 12/1996

- Andreas Mühl

- **Technologie und angepasste Maschinenkonzepte zum Schleifen von Konstruktionskeramik auf Koordinatenschleifmaschinen**

- Dissertation, 116 Seiten, erschienen 02/1997

- Simeon Christov

- **Einbaugenaugigkeit und Querschnittsberechnung von Profilschienenführungen**

- Dissertation, 244 Seiten, erschienen 05/1997

- Knut Großmann; Horst Neundorf; Roger Grundmann

- **Intelligente Funktionsmodule der Maschinentechnik**

- Zwischenbericht 1997 zum Landesinnovationskolleg, 206 Seiten, erschienen 04/1997

- Knut Großmann

- **Die Realität im Virtuellen**

- Simulation in technischen Anwendungen  
396 Seiten, erschienen 12/1997

- **Potentiale und Chancen**

- Absolvententagung am Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik

- 20.-21. November 1998, 260 Seiten, erschienen 11/1998

- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 1997/98**

300 Seiten, erschienen 12/1998

- Andreas Mühl; Bernd Wunderlich

- **ACC-Regelung von Bahnschleifprozessen**

Abschlussbericht zu den Forschungspraktika 55/96 und 56/96 bei der Stiftung Industrieforschung, 94 Seiten, erschienen 01/1999

- **Intelligente Funktionsmodule der Maschinentechnik**

Abschlussbericht zum Landesinnovationskolleg 1995-1998, 228 Seiten, erschienen 07/1999

- Günter Jungnickel

- **Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen**

228 Seiten, erschienen 02/2000

- Holger Arndt

- **Auslegung und Bewertung von Vorschubantrieben mit Spindel-Mutter-Systemen**

Dissertation, 180 Seiten, erschienen 12/2000

- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 1999/2000**

200 Seiten, erschienen 04/2001  
ISBN 3-86005-278-0

- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 2001/2002**

200 Seiten; erschienen 04/2003  
ISBN 3-86005-342-6

- Knut Großmann; Günter Jungnickel

- **Instationäres thermoelastisches Verhalten von Vorschubachsen mit bewegtem Wälzkontakt**

230 Seiten, erschienen 09/2003  
ISBN 3-86005-381-7

- Knut Großmann; Andreas Mühl  
**Adaptiv geregeltes Fräsen auf einem Hexapoden**  
108 Seiten, erschienen 02/2004  
ISBN 3-86005-417-1
- Hajo Wiemer  
**Stand und Möglichkeiten der Systemsimulation von mechanischen Pressmaschinen**  
Dissertation, 228 Seiten, erschienen 12/2004  
ISBN 3-86005-457-0
- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 2003/2004**  
243 Seiten; erschienen 05/2005  
ISBN 3-86005-458-9
- Bernd Kauschinger  
**Verbesserung der Bewegungsgenauigkeit an einem Hexapod einfacher Bauart**  
Dissertation, 172 Seiten, erschienen 04/2006  
ISBN 3-86005-516-X
- Knut Großmann; Günter Jungnickel  
**Prozessgerechte Bewertung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen**  
259 Seiten, erschienen 12/2006  
ISBN 3-86005-547-X
- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 2005/2006**  
251 Seiten; erschienen 04/2007  
ISBN 3-86005-548-8
- Szabolcs Szatmári  
**Kinematic Calibration of Parallel Kinematic Machines in the Example of the Hexapod of Simple Design**  
Dissertation, 175 Seiten, erschienen 10/2007  
ISBN 978-3-86780-037-2

- Knut Großmann; Hajo Wiemer  
**Simulation in der Produktionstechnik - wovon, womit, wofür?**  
Bericht zur WGP Summer School Dresden 2007  
Herausgegeben von der WGP Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik, 103 Seiten, erschienen 10/2007  
ISBN 978-3-86780-040-2
- Knut Großmann; Günter Jungnickel  
**Thermische Modellierung von Prozesseinflüssen an spanenden Werkzeugmaschinen**  
134 Seiten, erschienen 09/2008  
ISBN 978-3-86780-089-1
- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 2007/2008**  
243 Seiten; erschienen 03/2009  
ISBN 978-3-86780-107-2
- Jens Müller  
**Vergleichende Untersuchung von Methoden zur Verringerung der Gestellanregung durch linearmotorgetriebene Werkzeugmaschinenachsen**  
Dissertation, 171 Seiten, erschienen 04/2009  
ISBN 978-3-86780-109-6
- Volker Möbius  
**Produktprozess im Computerzeitalter - Methodische Grundsätze zur Informationsbehandlung im Produktprozess und deren Anwendung auf die Entwicklung eines Steuerungskonzepts**  
Dissertation, 201 Seiten, erschienen 08/2009  
ISBN 978-3-86780-127-0
- Günter Jungnickel  
**Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen - Modellierung und Parametrierung**  
223 Seiten, erschienen 05/2010  
ISBN 978-3-86780-172-0

- André Hardtmann  
**Entwicklung und Bewertung eines erweiterten Blechumformprozessmodells unter besonderer Berücksichtigung der elasto-statischen Wechselwirkungen zwischen Maschine und Prozess**  
Dissertation, 116 Seiten, erschienen 10/2010  
ISBN 978-3-86780-189-8
- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 2009/2010**  
300 Seiten; erschienen 02/2011  
ISBN 978-3-86780-190-4

Die Hefte der Schriftenreihe können erworben werden bei:

DWM e. V.

c/o Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik

Technische Universität Dresden

01062 Dresden

Bestellungen bitte schriftlich an o. g. Anschrift,

per Fax (0351) 463 37073

oder per E-Mail: [mailbox@iwm.mw.tu-dresden.de](mailto:mailbox@iwm.mw.tu-dresden.de)