

Einsatz von Robotern in der spanenden Fertigung

Zur fräsenden Bearbeitung von komplexen Bauteilen mit Genauigkeitsanforderungen von weniger als 0,1 mm werden in der industriellen Praxis fünfachsige Werkzeugmaschinen eingesetzt. Industrieroboter sind zwar weitaus kostengünstiger, erzielen jedoch aufgrund ihrer Nachgiebigkeit eine geringere Bearbeitungsgenauigkeit. Mit Hilfe eines mathematischen Modells, welches die statischen und dynamischen Wechselwirkungen zwischen Roboterstruktur und Fräsprozess realitätsnah abbildet, können Abdrängungseffekte simuliert und optimal korrigiert werden. Die Herausforderung: Die hohe Genauigkeit kann nur erzielt werden, wenn Modellparameter stets präzise bekannt sind.

► Achieving higher accuracy of robots in milling applications

For milling of complex work pieces with required accuracies of less than 0.1 mm five-axis machine tools are used in industrial practice. Industrial robots are by far more cost-efficient but they are achieving less machining accuracy due to their elastic resilience. Deviations can be simulated and corrected with a mathematical model, that reproduces static and dynamic interactions of robot and milling process. The challenge: High accuracy can only be achieved, if model parameters are known precisely at any time.

Eberhard Abele, Jörg Bauer, Martin Friedmann, Matthias Pischon, Christian Reinl, Oskar von Stryk • Das traditionelle Anwendungsgebiet von Industrierobotern weitet sich im Zuge der Fertigungsautomatisierung stetig aus. Ausgehend von klassischen Handhabungsaufgaben finden Roboter bereits weiten Einsatz in verschiedenen Gebieten wie Schweiß- oder Montagetechnik. Diese Aufgaben haben gemein, dass keine hohen Kräfte auf den Endeffektor des Roboters einwirken und lediglich eine moderate Bearbeitungsgenauigkeit erforderlich ist. Für Aufgaben mit höheren Prozess- und Bearbeitungskräften ist die Genauigkeit allerdings deutlich geringer, was durch eine erhöhte Abdrängung des Endeffektors verursacht wird und sich in einer schlechten Positionier- und Wiederholungsgenauigkeit niederschlägt.

Fräsen mit Industrierobotern: Bearbeitungskräfte und hohe Präzisionsanforderungen im scheinbaren Widerspruch.

Im Fall der Fräsbearbeitung bestätigen die aktuellen Zahlen des Fachverbandes VDMA einen weiteren Anstieg von Neuinstallationen von Robotern in den vergangenen Jahren, die speziell für Zerspanaufgaben eingesetzt werden. Dies liegt nicht zuletzt an den deutlich niedrigeren In-

vestitionskosten und der höheren Flexibilität eines Roboters im Vergleich zu einer Werkzeugmaschine. Bisherige Einsatzschwerpunkte sind beispielsweise das Prototyping, das Entgraten von Gussbauteilen sowie das Vorbearbeiten von Bauteilen mittlerer Genauigkeit. Gründe hierfür sind, dass die dabei zerspannten Werkstoffe lediglich kleine bis mittlere Kräfte hervorrufen und somit der dazu erforderliche Toleranzbereich von 0,2 mm bis 0,5 mm eingehalten werden kann. Die Bearbeitung von Materialien höherer Festigkeit (z. B. Aluminium) ist im Vergleich zu einer Werkzeugmaschine bislang nur mit erheblich geringerer Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit erreichbar.

Die durch den Zerspanprozess hervorgerufenen Kräfte verursachen eine Abdrängung der Werkzeugschneide („Tool Center Point“ – TCP) von der Soll-Bahn sowie eine niederfrequente Schwingung des Roboters. Diese unerwünschten statischen und dynamischen Abweichungen sind an einem Roboter wesentlich stärker ausgeprägt als bei einer Fräsmaschine. Die insgesamt geringere Steifigkeit ist großteils auf die verbauten Getriebe und die insgesamt schlankere Roboterstruktur zurückzuführen. Darüber hinaus variieren die Steifigkeiten im Arbeitsraum sehr stark.

Ziel aktueller Forschung ist es daher, die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Fräsbahn wesentlich zu verringern. Konstruktive oder mechatronische Weiterentwicklungen der Roboterkomponenten zur Erhöhung der Steifigkeit erhöhen dabei jedoch die Kosten des Industrieroboters wesentlich. Die Fachgebiete Simulation, Systemoptimierung und Robotik (Fachbereich Informatik) und das Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (Fachbereich Maschinenbau) der TU Darmstadt arbeiten deshalb gemeinsam an einer modellbasierten Kompensationsmethode, die

Fachgebiet Simulation, Systemoptimierung und Robotik
Prof. Dr. Oskar von Stryk
Tel. 06151/16-4899
E-Mail: stryk@sim.tu-darmstadt.de
www.sim.tu-darmstadt.de

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Tel. 06151/16-2156
E-Mail: info@ptw.tu-darmstadt.de
www.ptw.tu-darmstadt.de



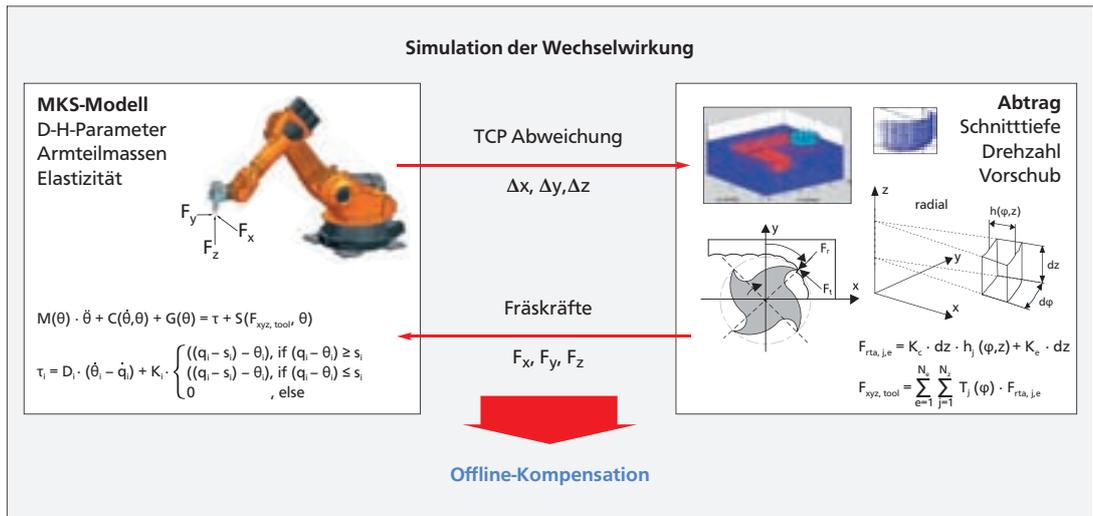
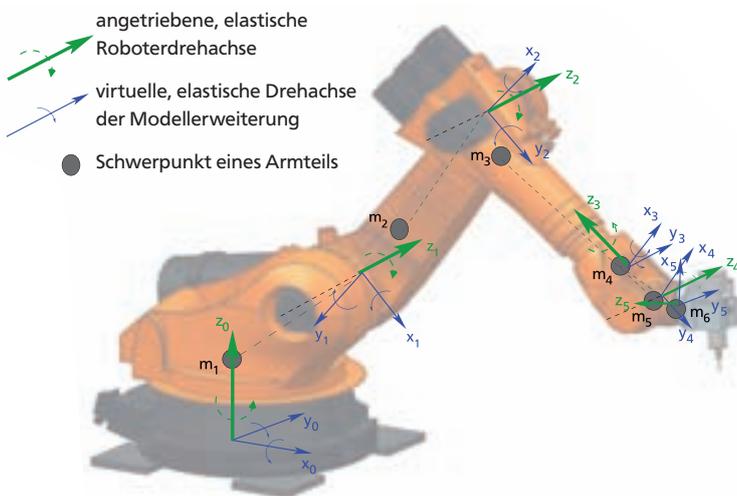


Abbildung 1
Konzept der modellbasierten Bahnkorrektur.

es erlaubt, kostengünstige Standard-Industrieroboter für diese bisher Werkzeugmaschinen vorbehaltenen Aufgaben einzusetzen. Statische Abweichungen lassen sich bereits im Vorfeld einer Bearbeitung durch Simulation berechnen und über eine Modifikation des Fräsprogramms signifikant reduzieren. Ein Umbau oder zusätzliche Sensorik sind hinsichtlich dieser Effekte nicht zwingend erforderlich. Die Vorhersage der Schwingungen des Roboters und damit des dynamischen

Abbildung 2
Erweiterte Robotermodellierung mit Elastizitäten an virtuellen Drehachsen.



Systemverhaltens des Gesamtsystems von Roboter und Fräsprozess ist wesentlich aufwendiger und erfordert eine detaillierte Modellierung und Parametrisierung. Hinsichtlich der praktischen Einsetzbarkeit und Genauigkeit der Kompensation ist die Integration zusätzlicher Sensoren am TCP zum Erfassen der Schwingungen empfehlenswert. Die Einbindung der Sensorik in die Steuerung lässt prinzipiell eine Onlinekompensation der niederfrequenten Schwingung zu. Eine teilweise Modifikation der Robotersteuerung wäre in diesem Fall jedoch notwendig.

Eine genaue Parametrisierung von Simulationsmodellen verlangt allerdings üblicherweise einen hohen experimentellen Aufwand zur Modellparameterbestimmung. Ziel der aktuellen Arbeiten ist die Entwicklung und Anwendung von Methoden, welche die Parameterbestimmung weitestgehend automatisiert mit einer möglichst geringen Zahl an Experimenten und Messbewegungen durchführen.

Modellierung der Wechselwirkungen von Prozess und Struktur

Die Grundlagen zur statischen Offlinekompensation bilden ein Mehrkörpersimulationsmodell (MKS-Modell) des Roboters sowie ein Fräskraftmodell. Bei genauerer Analyse zeigt sich eine starke Wechselwirkung zwischen der Struktur des Roboters und dem Fräsprozess. Durch die Fräskräfte

wird der TCP der nachgiebigen Roboterstruktur abgedrängt, womit sich eine neue Schnittgriffssituation einstellt. Diese ruft wiederum eine Fräskraftänderung hervor (vgl. Abbildung 1 oben). Infolgedessen wird ein gekoppeltes Gesamtmodell benötigt. In der Vergangenheit wurden bereits vielfach Modelle von Industrierobotern als starre Mehrkörpersysteme aus Armteilen und drehbaren Achsgelenken aufgebaut, wobei Nachgiebigkeiten lediglich in rotatorischer Achsgelenkrichtung berücksichtigt wurden. Experimentelle Untersuchungen am PTW zeigten jedoch, dass Roboter ebenfalls Nachgiebigkeiten senkrecht zur Achsdrehrichtung aufweisen. Die Nachgiebigkeiten in den Gelenkachsen werden in erster Linie durch Elastizitäten in den Getrieben verursacht. Für die korrekte Beschreibung des dynamischen Verhaltens werden deshalb zusätzlich virtuelle Drehachsen orthogonal zur realen Drehachse eingefügt und Kippteifigkeiten zugeordnet (vgl. nebenstehende Infobox, Abbildung 2).

Elastizitäts- und Dämpfungsparameter im Robotermodell lassen sich zunächst experimentell durch Steifigkeitsmessungen sowie eine Modalanalyse

Dynamikmodellierung Industrieroboter

Die Dynamik des Roboters lässt sich durch Gleichungen beschreiben.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = M_G + S(F_{xyz}, q)$$

$$K \cdot (q_{soll} - q) + D(\dot{q}_{soll}, \dot{q}) = M_G$$

Dabei werden die abtriebsseitigen Gelenkpositionen q und deren Ableitungen in Relation zu den dort wirkenden Drehmomenten M_G und den in die Antriebe projizierten Fräskräften F_{xyz} gesetzt. Obige Gleichung wird nicht explizit aufgestellt. Stattdessen wird der Roboter als eine Kette aus Gelenken und Starrkörpern beschrieben und das Ergebnis der Gleichung rekursiv durch Iterieren über diese Kette berechnet. Dabei wird ein flexibler Modellierungsansatz verwendet, der es gestattet, an beliebigen Stellen in der Kette Gelenke zur Beschreibung von Elastizitäten zu platzieren. Die Modellierung der Antriebe erfolgt durch Ankoppeln der Antriebsstellungen q_{soll} über ein Feder-Dämpfer Modell, dass auch Spiel in den Getrieben berücksichtigt.

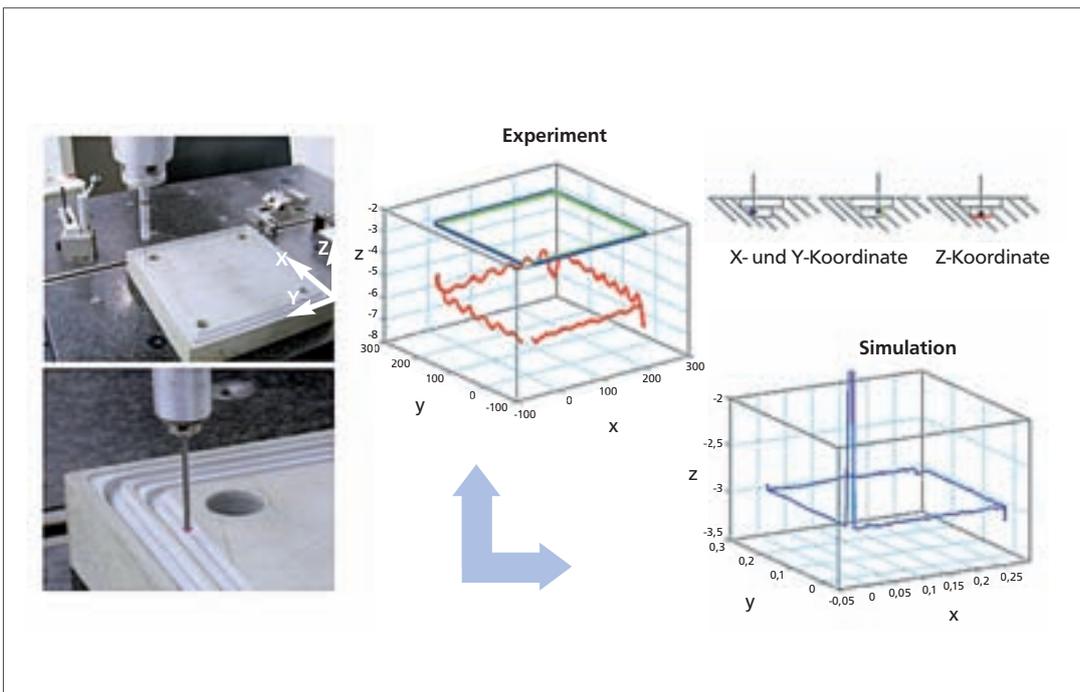
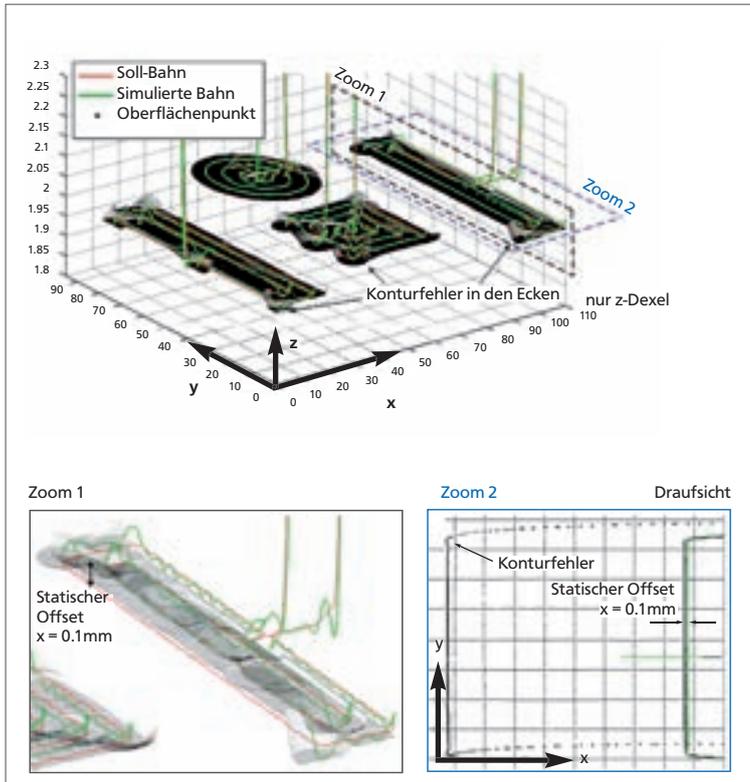


Abbildung 3
Validierung des Strukturmodells.



Modell der Fräskräfte

Die resultierenden Fräskräfte hängen stark von den technologischen Parametern wie z. B. Vorschub und Drehzahl des Werkzeugs sowie der Schnitttiefe ab. Ausgehend davon kann ein Modell abgeleitet werden. Innerhalb des Projekts wurde das Modell nach Altintas verwendet, wonach gilt $F_{rt} = K_c a_p h + K_e a_p$. Dieses mechanistische Fräskraftgesetz setzt sich aus zwei Teilen zusammen, dem Schnittkraftanteil und dem Reibkraftanteil. Die Schnittkraft besteht aus dem Vektor der Schnittkraftkoeffizienten $K_c = [K_{ct}, K_{cr}]$ in tangentialer (K_{ct}) und radialer Richtung (K_{cr}), der axialen Zustelltiefe a_p und der Spandicke h . Der Reibkraftanteil enthält den Reibkraftkoeffizientenvektor $K_e = [K_{er}, K_{et}]$ sowie die axiale Zustellung a_p .

im relevanten Arbeitsraum in guter Näherung bestimmen.

Eine weitere Validierung des Strukturmodells erfolgt durch einen Fräsversuch in weichem Material, so dass die Fräskräfte gering sind und vernachlässigt werden können. Die zu erwartende Trajektorie umfasst somit lediglich die Einflüsse der Armträge sowie Steifigkeiten und Dämpfungen der Getriebe. Durch das nachträgliche Vermessen der gefrästen Bahn am Werkstück werden die Abweichungen des TCP von der programmierten Bahn deutlich. Die Auswertung zeigt ein Absenken/Anheben insbesondere in den Ecken einer Fräsbahn sowie ein Ausschwingen nach einem Richtungswechsel des TCP (Abbildung 3).

Mit Hilfe des Fräskraftmodells kann unter Berücksichtigung der Technologieparameter der Verlauf der Prozesskräfte am TCP berechnet werden. Grundlage ist jeweils die Beschreibung der Fräskraft an einem Fräserzahn in radialer und tangentialer Richtung (vgl. Infobox auf dieser Seite und Abbildung 1).

Eine Validierung des Fräskraftmodells erfolgt zunächst durch Versuche an einer Werkzeugmaschine.

Abbildung 4 Simulation der Abdrängungseffekte.

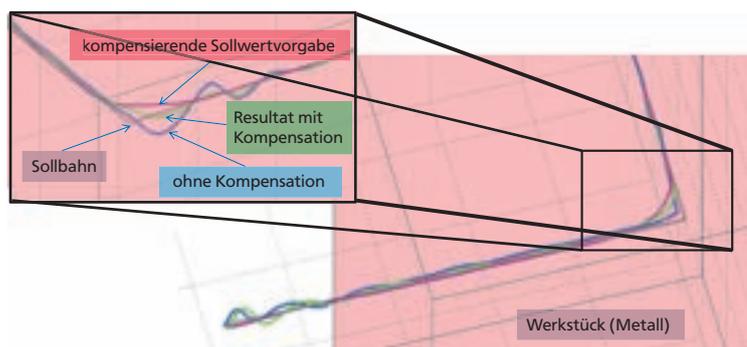
Der Grund hierfür ist die sehr viel steifere Struktur des Maschinensystems; dies lässt eine geringere Beeinflussung durch Prozesskräfte erwarten. Nach Anpassung der Fräskraftparameter konnte auch hier eine gute Übereinstimmung des Kraftmodells mit gemessenen Kräften erzielt werden.

Modellbasierte Kompensation der Abdrängung

Eine erste, effiziente Kompensationsstrategie mit dem Ziel korrigierende Sollwert-Vorgaben für die Robotersteuerung zu berechnen, so dass in Folge der Abdrängung (vgl. Abbildung 5) sich der gewünschte Fräsbahnverlauf einstellt, konnte bereits erfolgreich im Experiment erprobt werden.

Dabei wird zunächst die gewünschte Fräsbahn mit einem idealisierten Robotermodell, ohne Berücksichtigung von Elastizitäten, simuliert. Daraus re-

Abbildung 5 Resultat der Kompensationsstrategie.



Literatur

J. Bauer, M. Friedmann, T. Hemker, M. Pischon, C. Reinl, E. Abele, O. von Stryk: Analysis of Industrial Robot Structure and Milling Process Interaction for Path Manipulation; In: Process Machine Interactions (B. Denkena, Hrsg.), Springer-Verlag 2011

sulziert ein zugehöriger idealer zeitlicher Verlauf von Gelenkstellungen und Fräskräften.

Mit Hilfe einer Inversdynamikberechnung lassen sich damit für ausgewählte Punkte entlang der Fräsbahn-Trajektorie entsprechende Drehmomente der Gelenke ermitteln. Unter der Annahme, dass die Kompensation der Abdrängung keine zusätzlichen Sollvorgaben für die Gelenkwinkelgeschwindigkeit erfordert, werden korrigierende Gelenkstellungen nun effizient als Lösung eines linearen Gleichungssystems gewonnen. Dabei gehen sowohl angetriebene als auch virtuelle Achsen des Robotermodells in die Strategie ein. Über die Roboterkinematik werden die kompensierenden Gelenkstellungen neu in Bahnpositionen umgerechnet, welche schließlich dem Roboterprogramm übergeben werden.

In der Simulation und im realen Experiment zeigt sich bereits bei diesem ersten Ansatz eine signifikante Verbesserung (vgl. Abbildung 5). Der Detaillierungsgrad von Fräskraft- und Robotermodell ermöglicht demnach bereits mit experimentell bestimmten Modellparametern und einer schlanken Kompensationsstrategie eine deutliche Erhöhung der Genauigkeit der resultierende Fräsbahn.

Eine effiziente objektorientierte Implementierung des Robotermodells, die sich der Techniken des automatischen Differenzierens bedient, erlaubt neben der Simulation der Roboterdynamik mit Nachgiebigkeiten auch eine genaue numerische Sensitivitätsanalyse. Der Einsatz einer rechnerischen Modellparameterbestimmung, welche eine minimale Abweichung von experimenteller Beobachtung und Simulationsergebnis garantiert, wird damit ermöglicht. Eine Genauigkeitsverbesserung des Modells kann somit automatisiert erfolgen, sofern entsprechende Messdaten der realen Robotertrajektorien vorliegen. So kann eine Kompensationsstrategie nicht nur auf Änderungen des physikalischen Roboterhaltens – etwa in Folge eines Temperatureinflusses – reagieren, sondern ist schließlich äußerst flexibel auf eine ganze Klasse von Industrierobotern ähnlicher Bauart übertragbar.

Auch an der Kompensationsstrategie wird weiter gearbeitet. Die Einbindung effizienter nichtlinearer Optimalsteuerungsroutinen verspricht hier die Erzeugung von Sollwertvorgaben nach spezifischen Optimalitätskriterien. Alle entwickelten

Komponenten haben jeweils für sich ihre Eignung bewiesen. Gelingt es, diese nun in einer robusten Gesamtmethodik zusammenzufassen, kann dem Anwender mittelfristig ein kostengünstiges und leistungsfähiges Werkzeug bereitgestellt werden, das bei einer minimalen Anzahl von Test- und Kalibrierungsläufen eine entscheidende Genauigkeitsverbesserung beim Fräsen ermöglicht. Zur Erschließung zahlreicher neuer Einsatzbereiche für Industrieroboter wäre damit ein entscheidender Schritt getan.



Eberhard Abele ist seit 2001 Professor an der TU Darmstadt und leitet das Fachgebiet PTW – Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen im Fachbereich Maschinenbau.



Jörg Bauer (Fachgebiet PTW) arbeitet innerhalb der roboterbasierten Fräsbearbeitung schwerpunktmäßig an modell- und kameragestützten Offline-Bahnkorrekturverfahren.



Martin Friedmann (Fachgebiet SIM) arbeitet schwerpunktmäßig an der Modellierung und Simulation von Robotern und biomechanischen Systemen.



Matthias Pischan (Fachgebiet PTW) arbeitet innerhalb der roboterbasierten Fräsbearbeitung schwerpunktmäßig an Verfahren zur Entgratung von Querbohrungen sowie der modellbasierten Bahnkorrektur.



Christian Reinl (Fachgebiet SIM) arbeitet schwerpunktmäßig an diskretkontinuierlichen, optimalen Steuerungen mit Anwendungen für Industrieroboter und kooperative, mobile Systeme.



Oskar von Stryk ist Professor und leitet das Fachgebiet Simulation, Systemoptimierung und Robotik am Fachbereich Informatik. Die Robotik-Forschung wurde mehrfach international ausgezeichnet.