

Industrieroboter, Fräsen

# Wechselwirkungen von Fräsprozess und Maschinenstruktur am Beispiel des Industrieroboters \*

Entwicklung von Modellkomponenten für eine Offlinekompensation der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern

E. Abele, J. Bauer, M. Stelzer, O. von Stryk

*Industrieroboter werden bereits heute zur spanenden Bearbeitung eingesetzt. Die durch den Zerspanprozess hervorgerufenen Kräfte erzeugen sowohl eine statische Abdrängung als auch eine niederfrequente Schwingung des Fräswerkzeuges. Dies wirkt sich negativ auf die Bauteilqualität aus. Über eine Offlinekompensation der statischen Abdrängung vor der Fräsbearbeitung kann das Roboterprogramm entsprechend abgeändert werden, sodass der statische Fehler reduziert wird. Hierzu wird ein Strukturmodell des Roboters sowie die Modellierung des Fräsprozesses benötigt, welche im Folgenden vorgestellt werden.*

**Interaction of the milling process and the machine structure in case of the industrial robot**

*Industrial robots are already used for operations such as milling. Due to the milling process and its process forces a static displacement and a low frequent oscillation of the Tool Centre Point is induced. This has negative effects on the work piece quality. With an offline compensation of the static displacement, the robot program can be modified in order to reduce the static error. This implies a model of the robot structure and of the milling process which will be presented in this article.*

## 1 Bearbeitungsaufgaben von Industrierobotern

Das traditionelle Anwendungsgebiet von Industrierobotern weitet sich im Zuge der Fertigungsautomatisierung stetig aus. Ausgehend von klassischen Handhabungsauf-

gaben findet das System Roboter bereits weiten Einsatz in verschiedenen Gebieten wie Schweiß-, Montage- oder Klebetechnik. Alle diese Aufgaben haben gemein, dass keine hohen Kräfte auf den Endeffektor des Roboters hervorgerufen werden und lediglich eine mittlere bis grobe Bearbeitungsgenauigkeit ausreichend ist.

Die Erweiterung der Einsatzbereiche von Industrierobotern zu Bearbeitungsaufgaben mit mittleren bis hohen Prozess- und Bearbeitungskräften beeinträchtigt die Bearbeitungsgenauigkeit deutlich. Dies wirkt sich durch eine erhöhte Abdrängung des Endeffektors aus und führt zu einer schlechten Positionier- und Wiederholungsgenauigkeit. Bearbeitungsaufgaben wie das Reibrührschweißen, das Blechformen oder die Fräsbearbeitung mit Industrierobotern werden daher zurzeit nur zu einem geringen Teil industriell eingesetzt. Im Fall der Fräsbearbeitung bestätigen jedoch die aktuellen Zahlen des Fachverbandes VDMA einen weiteren Anstieg von Neuinstallationen im Jahr 2005/2006 um 6,5 %, die speziell für Zerspanaufgaben eingesetzten werden. So werden laut VDMA nach Abschluss des Geschäftsjahres 2006 insgesamt knapp 4000 Industrieroboter zur spanenden Bearbeitung eingesetzt [1]. Dies liegt nicht zuletzt an den deutlich niedrigeren Investitionskosten und der höheren Flexibilität einer Industrieroboteranlage im Vergleich zu einer Werkzeugmaschine.

## 2 Zerspanung mit Industrierobotern

Die Einsatzschwerpunkte der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern sind das Prototyping, das Entgraten von Gussbauteilen sowie das Vorbearbeiten von Bauteilen mittlerer Genauigkeit im Bereich des Modell- und Formenbaus sowie in der Gießereibranche. Gründe hierfür sind, dass beim Zerspanen von Modellwerkstoff und Gussgrat lediglich kleine bis mittlere Zerspankräfte hervorgerufen werden sowie die Toleranzen von 0,2 mm bis 0,5 mm der Fertigbauteile innerhalb der Robotertrajektorienengenauigkeit liegen. Die Fertigbearbeitung von Materialien höherer Festigkeit (beispielsweise Aluminium) ist im Vergleich zu einer Werkzeugmaschine zum heutigen Zeitpunkt nur mit erheblich geringerer Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit erreichbar. Die durch den Zerspanprozess hervorgerufenen Bearbeitungskräfte verursachen eine statische Abdrängung des TCP (Tool Center Point) 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 Gründe hierfür sind [2]:

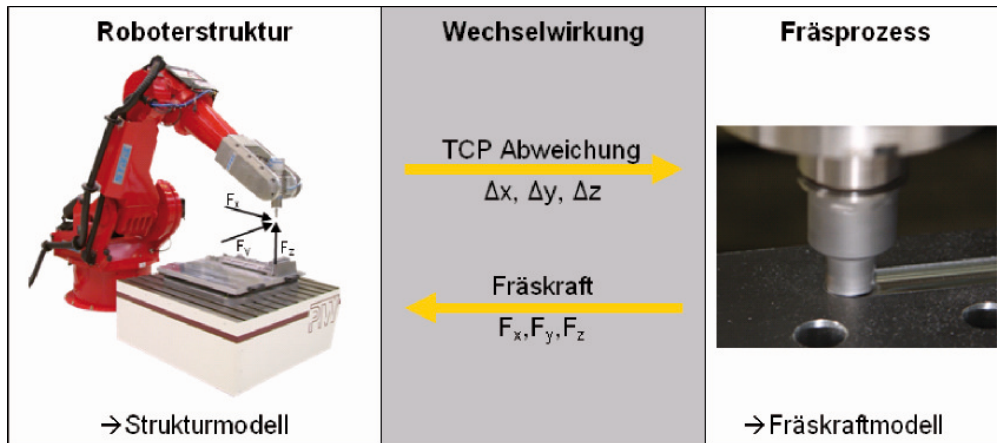
- die geringere Steifigkeit der Roboterstruktur aufgrund der Getriebe sowie der schlanken Roboterstruktur,
- die stark variierende Steifigkeit im Arbeitsraum durch das rotative, serielle Achsantriebskonzept des Industrieroboters sowie

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, Dipl.-Ing. Jörg Bauer  
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und  
Werkzeugmaschinen (PTW) – Technische Universität Darmstadt  
Petersenstr. 30, D-64287 Darmstadt  
Tel. +49 (0)6151 / 16-2156, Fax +49 (0)6151 / 16-3356  
E-Mail: bauer@ptw.tu-darmstadt.de  
Internet: www.ptw.tu-darmstadt.de

Prof. Dr. Oskar von Stryk, Dr.-Ing. Maximilian Stelzer  
Fachgebiet Simulation, Systemoptimierung und Robotik (SIM)  
Technische Universität Darmstadt  
Hochschulstr. 10, D-64289 Darmstadt  
Tel. +49 (0)6151 / 16-4899, Fax +49 (0)6151 / 16-6648  
E-Mail: stelzer@sim.tu-darmstadt.de  
Internet: www.sim.tu-darmstadt.de

### Info

\* Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen „reviewten“  
Fachaufsatz: Autoren-unabhängig von Experten auf diesem  
Fachgebiet wissenschaftlich begutachtet und freigegeben.



**Bild 1. Wechselwirkung zwischen Fräsprozess und Roboterstruktur**

– die indirekte (antriebsseitige) Lageregelung der Achsen. Ziel aktueller Forschungen ist es daher, mit geeigneten Methoden die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Fräsbahn-Trajektorie zu verringern. Hier stehen grundsätzlich zwei unterschiedliche Lösungsansätze gegenüber.

### a) Konstruktive und steuerungs-technische Optimierung des Roboters

Mittels steifigkeitsoptimierten Armteilen und Getrieben kann die Gesamtsteifigkeit des Roboters erhöht werden. Darüber hinaus können zur Verbesserung der Achsregelung, wie im BMBF Projekt ADVOCUT durchgeführt, ebenfalls abtriebsseitig Sensoren in die Achsen integriert werden. Beide Punkte resultieren in einer Erhöhung der Robotersteifigkeit und einer Reduzierung der Bahnabweichung [3]. Aufgrund dieser konstruktiven und mechatronischen Maßnahmen erhöhen sich jedoch die Kosten des Industrieroboters wesentlich.

### b) Kompensation der Bahnabweichung

Ist das statische / dynamische Verhalten des Roboters sowie die Größe der zu erwartenden Bearbeitungskräfte entlang der Bearbeitungstrajektorie bekannt, kann eine Kompensation der Abweichung durchgeführt werden. Dieser Lösungsansatz hat den Vorteil, dass weiterhin ein kostengünstiger Standard-Industrieroboter eingesetzt werden kann. Die Vorhersage der Abweichung beispielsweise mit Simulationsmodellen und die Modellparameterbestimmung sind allerdings aufwendig und mit hohem experimentellem Aufwand verbunden.

Hinsichtlich der praktischen Realisierung und Robustheit scheint ein Kompromiss aus beiden Ansätzen sinnvoll. Die hervorgerufenen statischen Abweichungen werden in einer Offlinekompensation berücksichtigt. Diese Abweichungen lassen sich bereits im Vorfeld der Bearbeitung berechnen und über eine Modifikation des Fräsprogramms verringern. Ein Umbau beziehungsweise zusätzliche Sensorik ist hinsichtlich der Statik nicht zwingend erforderlich. Die Vorhersage niederfrequenter Schwingungen des Roboters und damit des dynamischen Verhaltens des Systems ist wesentlich aufwendiger. Daher ist eine exakte Modellierung und Parametrisierung des zu beschreibenden Systems und dessen Randbedingungen zur Offlinekompensation notwendig. Hinsichtlich der praktischen Einsetzbarkeit und Genauigkeit der Kompensation ist die Integration zusätzlicher Sensoren am TCP zum Erfassen der

Schwingungen empfehlenswert [2]. Die Einbindung der Sensorik in die Steuerung lässt prinzipiell eine Onlinekompensation der niederfrequenten Schwingung zu [4]. Ein Eingriff in die Robotersteuerung und damit eine teilweise Modifikation der Steuerung ist in diesem Fall jedoch notwendig.

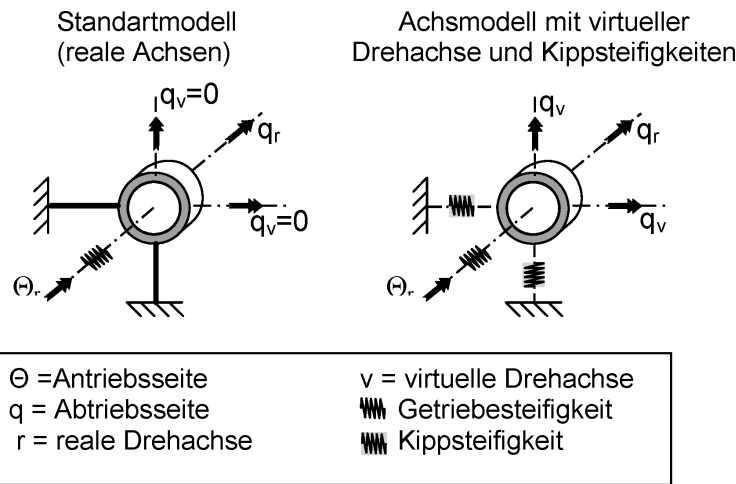
Dieser Fachbeitrag stellt die Grundlagen beziehungsweise Teilmodelle zur statischen Offlinekompensation vor, die innerhalb eines Forschungsvorhabens des Schwerpunktprogramms 1180 der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) erarbeitet werden. Diese bestehen aus einem Mehrkörper-simulationsmodell (MKS-Modell) des Roboters und einem Fräskraftmodell.

## 3 Modellierung der Wechselwirkungen von Prozess und Struktur

Beim genaueren Betrachten des Fräsvorgangs am Roboter zeigt sich eine starke Wechselwirkung zwischen der Struktur des Roboters und dem Fräsprozess. Der Fräsprozess erzeugt statische/dynamische Fräskräfte, welche auf die Struktur übertragen werden. Hierdurch wird der TCP der nachgiebigen Roboterstruktur abgedrängt, womit sich eine neue Schnitteinriffssituation einstellt. Diese ruft wiederum eine Fräskraftänderung hervor (**Bild 1**). Zur Beschreibung und Vorhersage der statischen Abdrängung von Fräsbahnen ist also die gekoppelte Betrachtung von Struktur und Prozess erforderlich. Infolgedessen wird – zur Simulation der Fräsbahntrajektorie und deren Abweichungen – ein Gesamtmodell benötigt, bestehend aus den Teilmodellen der Roboterstruktur und der Fräsprozesskraft.

### 3.1 Roboterstrukturmodell

In der Vergangenheit wurden bereits vielfach Modelle von Industrierobotern als starre Mehrkörpersysteme aufgebaut [5]. So besteht die seriell aufgebaute Roboterstruktur aus starren Armteilen mit drehbaren Achsgelenken. Die Nachgiebigkeit des Systems – überwiegend durch die Getriebe hervorgerufen – erfolgt durch Elastizitäten lediglich in den Achsgelenken in rotativer Richtung ( $q_i$ ). Experimentelle Untersuchungen am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) zeigen jedoch, dass der zu modellierende Roboter ebenfalls Nachgiebigkeiten senkrecht zu Achsdrehrichtung aufweist. Für die korrekte Be-



**Bild 2. Mehrkörpersimulationsmodell (MKS-Modell) – Roboterachsmmodell**

schreibung des dynamischen Verhaltens werden zusätzlich in Achse 1, 2 und 3 zwei virtuelle Drehachsen  $q_{v1}$ ,  $q_{v2}$  orthogonal zur Drehachse  $q_r$  eingefügt und mit einer Kippsteifigkeit ausgestattet (**Bild 2**). Die Dynamik der Roboterstruktur lässt sich nun durch die Gleichungen (1) abbilden:

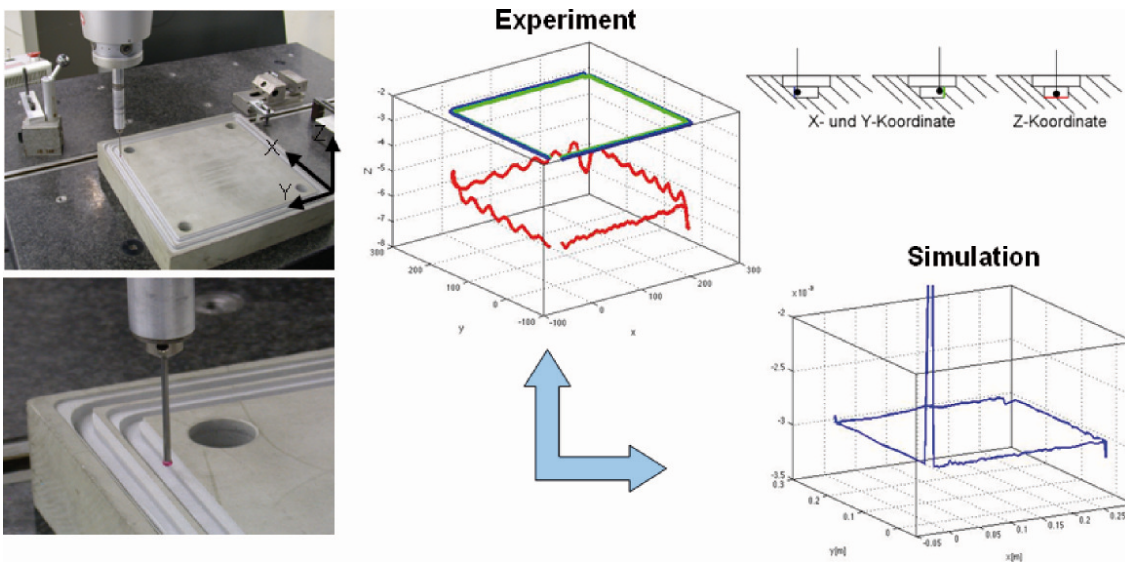
$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{M}_G + \mathbf{S}(\mathbf{F}_{xyz}, \mathbf{q})$$

$$\mathbf{K}(\Theta - \mathbf{q}) = \mathbf{M}_G \quad (1)$$

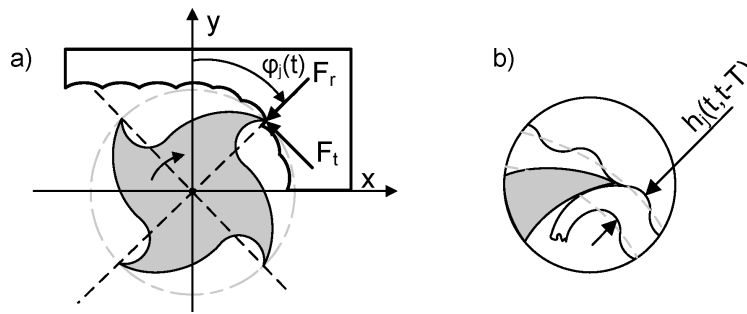
Hierbei entspricht  $\mathbf{M}(\mathbf{q})$  der Massenträgheitsmatrix der Armteile,  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$  den Zentrifugal- und Corioliskräften und  $\mathbf{G}(\mathbf{q})$  dem Vektor der Gravitationsmomente. Die abtriebsseitigen Achswinkel  $\mathbf{q}$  sind die Ausgangsgrößen des Gleichungssystems und die antriebsseitigen Achswinkel  $\Theta$  die Eingänge des Gesamtmodells. Die rechte Seite der Gleichung (1) bildet die abtriebsseitigen Achsdrehmomente  $\mathbf{M}_G$ . Diese berechnen sich aus der Differenz zwischen Antriebs- und Abtriebswinkel sowie der Getriebesteifigkeit  $\mathbf{K}$ . Die externen Fräskräfte, welche am TCP angreifen, müssen nun ebenfalls auf Achsebene

zurückgerechnet werden. Durch die nichtlineare Abbildung  $\mathbf{S}(\mathbf{F}_{xyz}, \mathbf{q})$  werden die externen Fräskräfte  $\mathbf{F}_{xyz}$  als auf die Gelenkebene projizierten Kräfte beschrieben. Stehen die zeitlichen Verläufe der Gelenkstellungen  $\mathbf{q}$  der Achsen aus Gleichung (1) zur Verfügung, lässt sich der zeitliche Verlauf der TCP-Position im kartesischen Raum über eine Vorwärtsdynamik berechnen.

Die Verifikation des Strukturmodells erfolgt durch einen Fräsversuch in Modellwerkstoff. Aufgrund des weichen Materials sind die Fräskräfte gering und können so näherungsweise vernachlässigt werden, womit eine Verifikation des reinen Strukturmodells zunächst ohne Fräskraftanregung möglich ist. Die zu erwartende Trajektorie umfasst daher lediglich die Einflüsse der Armträgheiten sowie Steifigkeiten und Dämpfungen der Getriebe. Durch das nachträgliche Vermessen des Werkstücks beziehungsweise der gefrästen Bahn mit Hilfe einer Koordinatenmessmaschine werden die Abweichungen des TCP von der programmierten Rechteckbahn deutlich. Die Auswertung der Messpunkte zeigt ein Absenken/Anheben insbesondere in den Ecken der Fräsbahn sowie ein Ausschwingen



**Bild 3. Verifikation des Strukturmodells**



**Bild 4. Fräskraftmodell [3]**

in Z-Richtung nach einem Richtungswechsel des TCP (**Bild 3**, rote Kurve). Weiterhin sind auf dem Werkstück ebenfalls Schwingungen in der XY-Ebene nach einem Richtungswechsel in der Fräsbahn vorhanden (Bild 3, grün/blau Kurve).

Ein externes Datenerfassungssystem kann die Gelenkwinkel des Roboters während der Verfahrbewegung aufzeichnen. Die ausgelesenen Gelenkwinkel des Experiments dienen als Eingangsgrößen für das Simulationsmodell. Somit fährt der virtuelle Roboter die gleiche Bahn wie zuvor der reale Industrieroboter im Experiment. Im Vergleich beider Bahnen, der gemessenen Werkstückbahn und der berechneten TCP-Bahn können die charakteristischen Abweichungen in den Ecken der Bahn nachgebildet werden (Bild 3). Das Ausschwingen bei Richtungssumkehr ist jedoch nur schwach erkennbar. Durch die Identifikation der Dämpfung an der realen Roboterstruktur und Anpassungen der Modelldämpfung wird eine Verbesserung der Fräsbahnberechnung erwartet. Grundsätzlich lässt sich das Verhalten des Roboters mit dem vorliegenden Modell beschreiben.

### 3.2 Fräskraftmodell

Mit Hilfe des Fräskraftmodells kann unter Berücksichtigung der Technologieparameter der Verlauf der Prozesskräfte in x-, y- und z- Richtung am TCP berechnet werden. Zur Vereinfachung erfolgt die Betrachtung der Schnittkräfte hier ausschließlich in der Ebene (x-, y-Richtung). Grundlage des Modells ist die Beschreibung der Fräskraft (Gleichung 2) an einem Fräserzahn in radialer und tangentialer Richtung  $F_{rt} = [F_r, F_t]$  nach Altintas [6, 7] (siehe **Bild 4 a**).

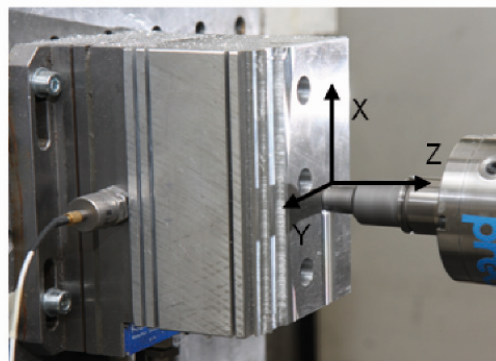
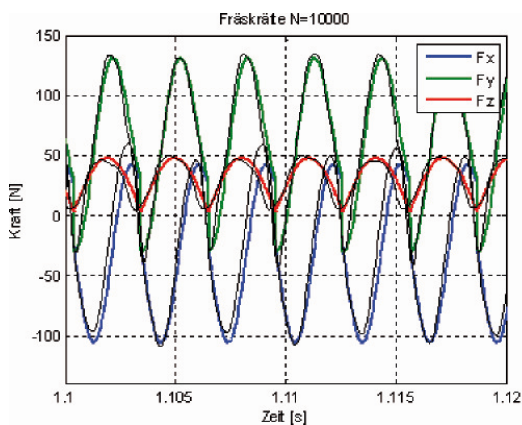
$$F_{rt} = K_c a_p h + K_e a_p \quad (2)$$

Dieses mechanistische Fräskraftgesetz besteht aus zwei Teilen, dem Schnittkraftanteil und dem Reibkraftanteil. Die Schnittkraft besteht aus dem Vektor der Schnittkraftkoeffizienten  $K_c = [K_{cr}, K_{ct}]$  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  $a_p$ . Besondere Bedeutung kommt der Spandicke  $h$  zu (Gleichung 3). Diese besteht aus einem statischen Anteil  $h_{stat}$  und einem dynamischen Anteil  $h_{dyn}$ :

$$h(t, t - \tau) = h_{stat} + h_{dyn} = f_z \sin(\varphi(t)) + (u(t) - u(t - \tau)) \quad (3)$$

Der statische Anteil in Bild 4 b) wird durch die gestrichelte Spandicke beschrieben. Sie ist abhängig von dem Zahnvorschub  $f_z = f / (n \cdot N_z)$  und damit indirekt von der Drehzahl  $n$ , dem Achsvorschub  $f$  sowie vom Schneidenwinkel  $\varphi(t)$ .

Der dynamische Anteil der Spandicke  $h_{dyn}$  entspricht der Welligkeit des Spans. Sie entspricht der Differenz der aktuellen Position des Werkzeugmittelpunktes  $u(t) = [x(t), y(t)]$  und damit dem Zahn  $j$  und der Position zum Zeitpunkt  $u(t - \tau)$  des vorherigen Zahns  $j-1$ . Durch Rotation der Kräfte aus Gleichung (2) mittels der Rotationsmatrix  $T(\varphi)$  und summieren über alle Schneiden  $N_z$  ergibt sich die Fräskraft in kartesischen Koordinaten zu



**Bild 5. Fräskräfte des Zerspanversuchs**

$$\mathbf{F}_{xy} = \sum_{j=1}^{N_z} \mathbf{g}_j(\phi) \cdot \mathbf{T}_j(\phi) \cdot \mathbf{F}_{rt,j} \quad (4)$$

Dies sind die Fräskräfte, die auf die Roboterstruktur einwirken.

Eine Verifikation des Fräskraftmodells erfolgt zunächst durch Fräsversuche an einer Standardfräsmaschine. Der Grund hierfür ist die sehr viel steifere Struktur des Maschinensystems; das lässt eine geringere Beeinflussung der Prozesskräfte erwarten. Die Versuchsdurchführung umfasst das Fräsen und Aufzeichnen der Bearbeitungskräfte mit Hilfe eines Kistler-Dynamometers (Typ: 9257A) von linearen Bahnen in Aluminium 3.1325. Bei einer Drehzahl von  $n = 10\,000 \text{ min}^{-1}$ , einem zweischneidigen Werkzeug ( $d = 16 \text{ mm}$ ), einer Zustelltiefe von  $a_p = 1 \text{ mm}$  und einem Vorschub von  $v_f = 3000 \text{ mm/min}$  werden die in **Bild 5** dargestellten Fräskraftverläufe gemessen (schwarz) und mit den Fräskräften des Modells (blau, grün, rot) verglichen. Die dargestellten Kräfte entsprechen den werkzeugseitigen Fräskräften in x-, y- und z-Richtung.

Nach Anpassung der Fräskraftparameter  $\mathbf{K}_c$  und  $\mathbf{K}_g$  konnte eine gute Übereinstimmung des Kraftmodells mit den real aufgenommenen Fräskräften erzielt werden.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der Wechselwirkung zwischen dem Fräsprozess und der Struktur des Industrieroboters ist zur späteren statischen Offlinekompensation der Fräsbahnabdrängung eine Kopplung des Fräskraftmodells mit dem Roboterstrukturmodell erforderlich. Beide Modelle wurden einzeln vorgestellt und zeigen hinsichtlich der praktischen Versuche ihre Einsetzbarkeit. Im nächsten Schritt des Forschungsprojekts erfolgt ein Zusammensetzen beider Modelle zu einem gekoppelten Gesamtmodell. Durch Fräsversuche am Industrieroboter können die Fräskräfte und die Position des TCP messtechnisch erfasst und die Einsetzbarkeit des Gesamtmodells bewertet werden. Mit dem gewonnenen Modell kann die Abdrängung für ein Fräswerkstück a priori abgeschätzt und in der Bahnplanung des Roboters berücksichtigt werden. □

#### Literatur

[1] N. N.: VDMA-Fachverbandsstatistik 2007 – Roboter in Deutschland – Marktdaten und Einsatz von Robotern 2006. VDMA Fachverband Robotik+Automation, Frankfurt am Main

[2] Weigold, M.: Kompensation der Werkzeugabdrängung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern. Dissertation, TU Darmstadt, 2008

[3] Abele, E.: Spanende Bearbeitung mit Industrierobotern. Abschlussbericht ADVOCUT, TU Darmstadt. Bamberg: Meisenbach-Verlag 2007

[4] Abau-El-Ela, A.: Sensorarme Methoden zur Bearbeitung komplexer Werkstücke. Dissertation, TU Darmstadt, 1999

[5] Hölzl, J.: Modellierung, Identifikation und Simulation der Dynamik von Industrierobotern. Dissertation, TU München, 1993

[6] Altintas, Y.: Modeling Approaches and Software for Predicting the Performance of Milling Operations at MAL-UBC. Machining Science and Technology 4/3 (2000), pp. 445-478

[7] Altintas Y.: Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design. Cambridge University Press 2000