

# Einsatz von Industrierobotern in der Zerspanung

## Messtechnische Untersuchungen zum Einfluss des Arbeitseingriffs auf die Bearbeitungsgenauigkeit

Thomas Götz, M.Sc., Dipl.-Ing. Andreas Gebhardt, Simon Kleinhenz, M.Eng., Dr.-Ing. Marco Schneider  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12, D-70569 Stuttgart  
Tel. +49 (0)711 / 970-1572  
Fax +49 (0)711 / 970-1570  
E-Mail: thomas.goetz@ipa.fraunhofer.de  
Internet: www.ipa.fraunhofer.de

### Vorspann (deutsch)

Voraussetzung für den zunehmenden Einsatz von Industrierobotern in der Zerspanung ist eine deutliche Erhöhung der Bearbeitungsgenauigkeit. Dies bedingt aufgrund der Steifigkeitseigenschaften von Robotern eine Optimierung der Bearbeitungsstrategien und Zerspanparameter. Der Fachbeitrag befasst sich mit der experimentellen Untersuchung des radialen Arbeitseingriffs bei der Kunststoffzerspanung, um über die Wahl geeigneter Eingriffsgrößen das Schwingungs- und Abdrängungsverhalten des Roboters und damit die Bearbeitungsqualität zu verbessern.

### Use of industrial robots in machining - metrological investigation on the influence of the radial depth of cut on the machining accuracy in robot-guided machining

#### Abstract (englisch)

The prerequisite for an extended use of industrial robots in machining is a significant increase in machining accuracy. This requires an optimization of machining strategies and cutting parameters due to the stiffness of the robot. This technical paper deals with the experimental investigation of the radial depth of cut in plastics machining in order to improve both the vibration and displacement behavior of the robot and the machining quality by selecting suitable intervention variables.

### 1 Motivation und Problemstellung

Die Wertschöpfung am Produkt mithilfe spanender Fertigungsverfahren ist für das produzierende Gewerbe von elementarer Bedeutung [1]. Zur spanenden Bearbeitung komplexer Bauteile finden in der industriellen Praxis in der Regel hochentwickelte und kostenintensive Werkzeugmaschinen Anwendung, die sich durch eine hohe Bearbeitungsgenauigkeit sowie hohe statische und dynamische Steifigkeiten auszeichnen [2, 3, 4]. Allerdings gewinnt angesichts kürzerer Produktlebenszyklen, steigender Produktvarianz und sinkender Stückzahlen [3, 5] die Fertigungsflexibilität in der Produktion zunehmend an Bedeutung und stellt Hersteller und Anwender von Werkzeugmaschinen vor große Herausforderungen.

Um die Wettbewerbsfähigkeit der produzierenden Industrie in Deutschland zu wahren, stellen Industrieroboter (IR) als Führungskinetik für Zerspanaufgaben ein enormes Potenzial dar. Die mit bis zu sechs Achsen ausgestatteten Vertikal-Knickarmroboter, wie sie in der industriellen Praxis bisher größtenteils für Handhabungs- und Schweißaufgaben zum Einsatz kommen [1, 2], weisen im Vergleich zu Werkzeugmaschinen ein besseres Arbeits- zu Bauraum-Verhältnis bei geringeren Investitionskosten auf [1, 5, 6, 7]. Zudem ist durch die hohe Flexibilität der Roboterkinematik eine spanende 5-Achs-Bearbeitung möglich, wodurch die Bearbeitung großer, komplexer Werkstücke ermöglicht wird [3, 4].

Allerdings wirkt sich der serielle Aufbau der Roboterkinematik nachteilig auf die Bearbeitungsqualität und Maßhaltigkeit am Werkstück aus [7, 8]. Dies ist neben einer verminderten Bahn Genauigkeit [1, 8, 9, 10] auf die geringere und stark posenabhängige Steifigkeit der Roboterstruktur im Vergleich zu einem Bearbeitungszentrum (BAZ) zurückzuführen [8, 9, 11]. Die Bearbeitungskräfte führen zu einer statischen Abdrängung der Werkzeugspitze (Tool Center Point – TCP) von der Soll-Bahn [2, 5, 7, 9, 12]. Bedingt durch die vergleichsweise hohe Nachgiebigkeit der einzelnen Komponenten ist der Roboter zudem schwingungsanfällig [5, 11, 12], sodass es bei der Bearbeitung zusätzlich zu dynamischen Effekten durch selbst- und fremderregte Schwingungen kommen kann. Aus den genannten Gründen ist der Einsatz von IR in der spanenden Fertigung gegenwärtig auf Anwendungsfelder begrenzt, in denen geringere Genauigkeitsanforderungen vorliegen [5], oder bei denen

prozessbedingt vergleichsweise geringe Zerspankräfte auftreten, wie bei der Kunst- und Holzwerkstoffbearbeitung [1, 9]. **Tabelle 1** zeigt die beschriebenen Werkzeugmaschinenkonzepte, wobei fundamentale (Prozess-) Anforderungen an die Konzepte der Bewertung zugrunde liegen.

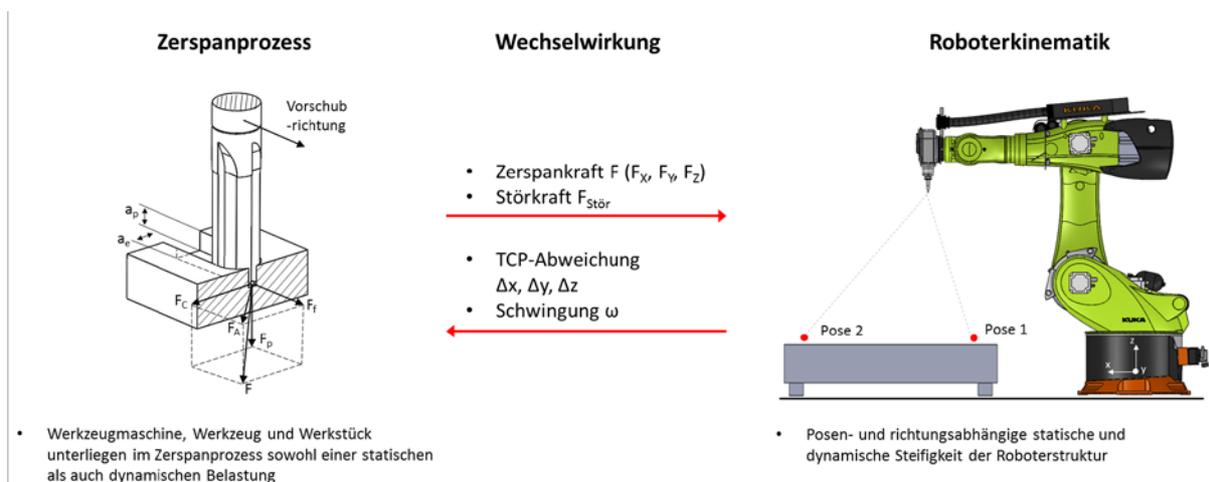
**Tabelle 1:** Qualitative Einordnung verschiedener Werkzeugmaschinenkonzepte, in Anlehnung an [6]

	Konventionelle Werkzeugmaschine	Industrieroboter
	 Bild: DMG Mori	 Bild: KUKA
Anschaffungskosten	hoch	gering
Arbeitsraum	gering	hoch
Raumnutzungsgrad	mittel	hoch
Steifigkeit	hoch	gering
Bahngenauigkeit	hoch	gering
Bearbeitete Werkstoffe	vorwiegend metallische Werkstoffe	vorwiegend Kunststoffe

## 2 Wechselwirkung von Zerspanprozess und Fräsroboter

Ein Industrieroboter unterliegt zahlreichen Prozesslasten, durch die sowohl die erreichbare Bearbeitungsqualität (Oberflächenwelligkeit und -rauheit) als auch die Genauigkeit (Maßhaltigkeit und Formhaltigkeit) des Zerspanprozesses beeinflusst werden [10, 13]. Diese Prozesslasten basieren auf Kräften, die relativ zwischen Werkzeug und Werkstück wirken (**Bild 1**) und somit zur Verformung der im Kraftfluss liegenden Strukturkomponenten des Roboters führen [1, 13, 14].

Die an jeder Werkzeugschneide angreifende resultierende Zerspankraft  $F$  ergibt sich nach DIN 6584 [15] aus der Summe der Aktivkraft  $F_a$  und der Passivkraft  $F_p$  (**Bild 1**, links). Die Aktivkraft liegt in der Arbeitsebene und setzt sich aus der Schnittkraft  $F_c$  als der betragsmäßig größten Komponente sowie der Vorschubkraft  $F_f$  zusammen. Die Passivkraft steht senkrecht zur Arbeitsebene. Die Roboterkinematik wird somit durch die Zerspankraft mehrachsig belastet, wodurch das poseabhängige, statische Nachgiebigkeitsverhalten der seriellen Kinematik in allen drei Raumrichtungen für das Arbeitsergebnis bestimmend ist [1, 16].



**Bild 1:** Wechselwirkung zwischen Zerspanprozess und Roboterstruktur, in Anlehnung an [2]

Neben dem Last-Verformungsverhalten der Roboterkinematik, das durch die Zerspankräfte bedingt ist [13], können während des Zerspanprozesses dynamische Störungen in Form unterschiedlicher Schwingungsphänomene auftreten, deren Ausprägung stark von der jeweiligen Pose abhängig ist [1, 5]. Je nach Ursache lassen sich diese in selbst- und fremderregte Schwingungen unterteilen [1]. Typischerweise wirkt bei

einer fremderregten Schwingung neben der Zerspankraft kontinuierlich auch eine wechselnde Störkraft, die entweder durch eine impulsförmige Störkrafteinleitung bspw. über das Fundament der Maschine entsteht oder mit einer periodischen Anregung auftritt. Von besonderer Bedeutung sind die durch den unterbrochenen Schnitt der einzelnen Zähne vorkommenden wechselnden Schnittkräfte, bei denen die Struktur mit der periodischen Zahneingriffsfrequenz mitschwingt [17].

Im Gegensatz dazu schwingt die Roboterkinematik bei selbsterregten Schwingungen mit einer oder mehreren Eigenfrequenzen ohne andauernde Einwirkung äußerer Störkräfte [1]. Die Schwingungen resultieren aus der Wechselwirkung zwischen Zerspanprozess und der nachgiebigen Roboterstruktur. Durch eine einmalige, zumeist impulsartige Störkraft wird die Kinematik in Schwingung versetzt. Diese Schwingung erzeugt auf dem Werkstück eine wellenförmige Oberfläche. Zugleich entstehen dabei periodische Spandickenänderungen, die wiederum die Zerspankraft beeinflussen.

### 3 Versuchsplanung und -durchführung

Bei der spanenden Bearbeitung werden die resultierenden Zerspankräfte und das dynamische Verhalten von der Frässtrategie sowie den gewählten Werkzeug- und Zerspanparametern beeinflusst [14].

Um den roboterassistierten Zerspanprozess und damit die erreichbare Bearbeitungsqualität zu verbessern, wurden in zahlreichen Studien primär zur Metallbearbeitung ausgewählte Parameter experimentell untersucht. Dabei wurden neben der Auswirkung von Drehzahlbereich [1], Schnittgeschwindigkeit [14] und Laufrichtung [14, 18] auch die Effekte axialer und radialer Schnitttiefen [19] modelliert. Als Ergänzung zu bestehenden Studien zeigt die vorliegende Veröffentlichung Untersuchungen zu unterschiedlichen radialen Eingriffsgrößen (Arbeitseingriff) bei der Bearbeitung von Kunststoffen mittels Umfangsplanfräsen.

#### 3.1 Versuchsaufbau

Ziel der Versuchsreihe ist es, den Einfluss des radialen Arbeitseingriffs auf das Schwingungs- und Abdrängungsverhalten der Roboterkinematik zu untersuchen.

Für die Fräsversuche kommt ein *KUKA KR 300 R 2500 ultra* 6-Achs-Vertikal-Knickarmroboter mit *Siemens Sinumerik 840D* Steuerung sowie eine *16 kW HSD ES951 Frässpindel* mit einer maximalen Drehzahl von 24000 U/min zum Einsatz. Die Aktivkräftekräfte werden werkzeugseitig mittels eines Werkzeughalters *Spike* der Firma *proMicron* aufgezeichnet. Die Erfassung der Schwingungen erfolgt über einen an der Frässpindel angebrachten *MSR 165* Beschleunigungssensor.

In den Untersuchungsreihen werden Prüfwerkstücke aus dem Werkstoff *NECURON® 1007* gefräst und messtechnisch untersucht. Als Werkzeug wird durchgängig ein zweischneidiger PKD-Fräser der Firma *Gühring* mit einem Durchmesser von 8 mm im Neuzustand verwendet. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt in allen Versuchen 3000 mm/min bei einer Spindeldrehzahl von 12000 U/min.

Die Prüfwerkstücke werden an zwei unterschiedlichen Positionen im Arbeitsraum gefräst (**Tabelle 2**). Durch die Platzierung nahe an der Roboterbasis (Pose 1) und in weiterer Entfernung von ihr (Pose 2) finden die poseabhängigen Eigenschaften des IR in den Untersuchungen Berücksichtigung. Zur Erfassung des Einflusses der Fräsrichtung werden Prüfwerkstücke zudem in weiteren Versuchen an den ausgewählten Positionen um 90° gedreht. Für jede Position und Ausrichtung werden jeweils drei Prüfwerkstücke gefertigt, sodass insgesamt 12 Versuchsreihen zur Analyse des radialen Arbeitseingriffs vorliegen.

Abschließend werden die gefertigten Prüfwerkstücke hinsichtlich von Gestaltabweichungen 1. Ordnung (Formabweichung) und 2. Ordnung (Welligkeit) unter Einsatz einer Koordinatenmessmaschine *Werth VideoCheck HA* untersucht.

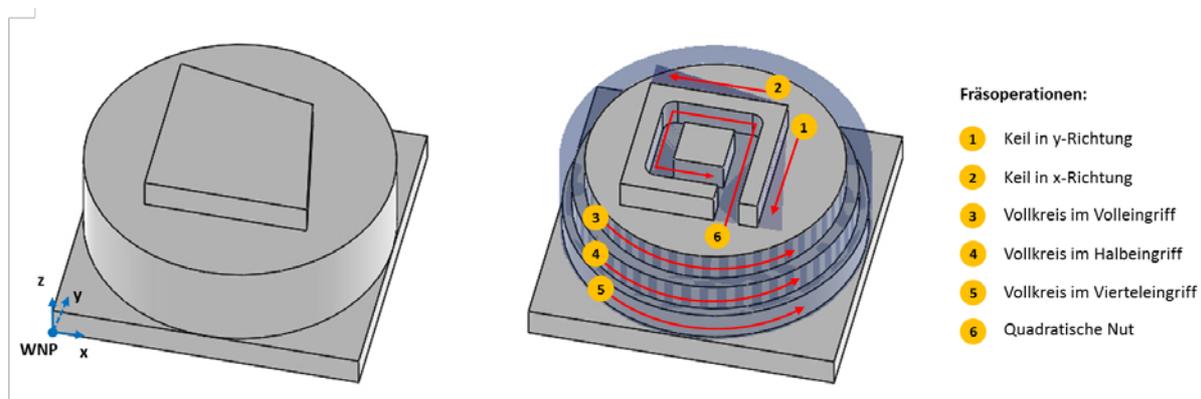
Für die Einordnung der Versuchsergebnisse werden drei mit einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum vom Typ *DMG Mori HSC 70* gefertigte Referenzwerkstücke herangezogen, bei deren Bearbeitung identische verfahrenstechnische Einstellgrößen angewendet wurden.

**Tabelle 2:** Positionierung der Prüfwerkstücke

Pose	Roboter-Weltkoordinaten (x/y/z) des Werkstücknullpunktes (WNP) in mm
1	(1240/345/630)
2	(2425/345/630)

## 3.2 Geometrie des Prüfwerkstücks

Für die Untersuchungen wurde ein Prüfwerkstück (**Bild 2**) entwickelt, das die Variation der radialen Eingriffsgrößen an verschiedenen Formelementen ermöglicht. Als Bearbeitungsstrategie kommt das Umfangsplanfräsen zur Anwendung. Um das richtungsabhängige Verhalten des Roboters zu erfassen, werden ausgehend von einem Rohkörper zunächst nacheinander die beiden Keile an den Außenkanten des oberen Formelements in y- (1) bzw. x-Richtung (2) im Gegen- bzw. Gleichlauf gefräst, wobei eine sukzessive Zunahme des radialen Arbeitseingriffs bis zum Volleingriff erfolgt. Diese Fräsoperation ermöglicht die Identifikation des Abdrängungs- und Schwingungsverhaltens bei Vergrößerung des Arbeitseingriffs. Im Anschluss werden drei Vollkreise im Gegenuhrzeigersinn im Gegenlauf gefertigt, wobei abnehmende Zustellbreiten beginnend vom Voll- (3) über den Halb- (4) bis zum Viertelringriff (5) gewählt werden. Abschließend wird eine quadratische Nut in der Bauteilmitte des oberen Formelements im Volleingriff in  $\pm x$ - und  $\pm y$ - Richtung gefräst (6). Aufgrund der Umkehrung der Verfahrrichtung in x und y kann zusätzlich das Umkehrspiel der Achsen in die experimentellen Untersuchungen einbezogen werden. Um einheitliche Bedingungen bei der radialen Eingriffsgrößenvariation zu schaffen, wird bei allen Fräsoperationen die axiale Zustellung von 10 mm konstant gehalten.



**Bild 2:** Prüfwerkstück – Rohkörper (links) und Fräsoperationen (rechts)

## 4 Versuchsergebnisse

Die nachfolgende Analyse der Versuchsergebnisse wird unter verschiedenen Aspekten durchgeführt. Den Schwerpunkt der Betrachtung bilden die Effekte des Arbeitseingriffs auf die beim Zerspanen resultierenden Kräfte und Schwingungen und deren Auswirkung auf die Oberflächengüte (Welligkeit) und Abdrängung von der Soll-Geometrie (Formhaltigkeit).

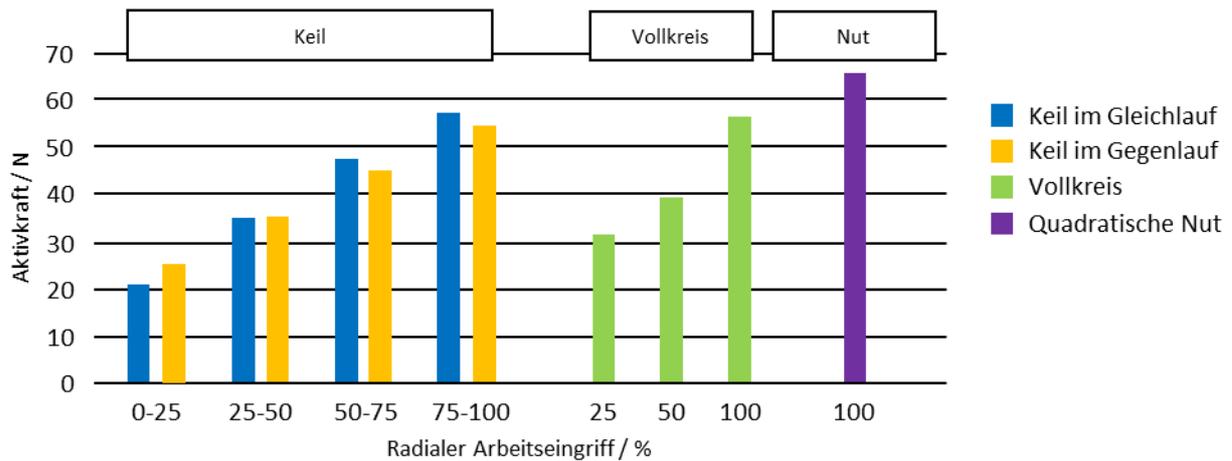
### 4.1 Zerspankraft

Um den Einfluss radialer Eingriffsgrößen auf die Aktivkraft zu untersuchen, wurde für jede Fräsoperation (Keil, Vollkreis, quadratische Nut) aus dem Kraftverlauf das arithmetische Mittel bestimmt (**Bild 3**), wobei der Mittelwert bezogen auf die Keile für vier Intervallbereiche (0%-25%, 25%-50%, 50%-75% und 75%-100% Arbeitseingriff vom Werkzeugdurchmesser) berechnet wurde.

Hinsichtlich der Keile konnte in den Versuchen mit zunehmendem Arbeitseingriff ein linearer Kraftanstieg beobachtet werden. Hierbei kam es bei der geringen Eingriffsbreite im Intervallbereich I zu einer höheren resultierenden Aktivkraft beim Fräsen im Gegenlauf, die sich im zweiten Intervallbereich dem Wert beim Fräsen im Gleichlauf annäherte. Ab einem Arbeitseingriff von 50% wies die Ausführung im Gegenlauf im Vergleich zum Gleichlauf geringere Zerspankräfte auf.

Bei den Ausführungen der Vollkreise wurde die Gegenlaufstrategie gewählt. Der Vergleich der Kraftverläufe für Viertel-, Halb- und Volleingriff lässt erkennen, dass sich der Kraftanstieg proportional zur Erhöhung des Arbeitseingriffes verhält.

Die im Volleingriff gefräste, quadratische Nut zeigte bei der Auswertung der mittleren resultierenden Aktivkraft den höchsten Wert.

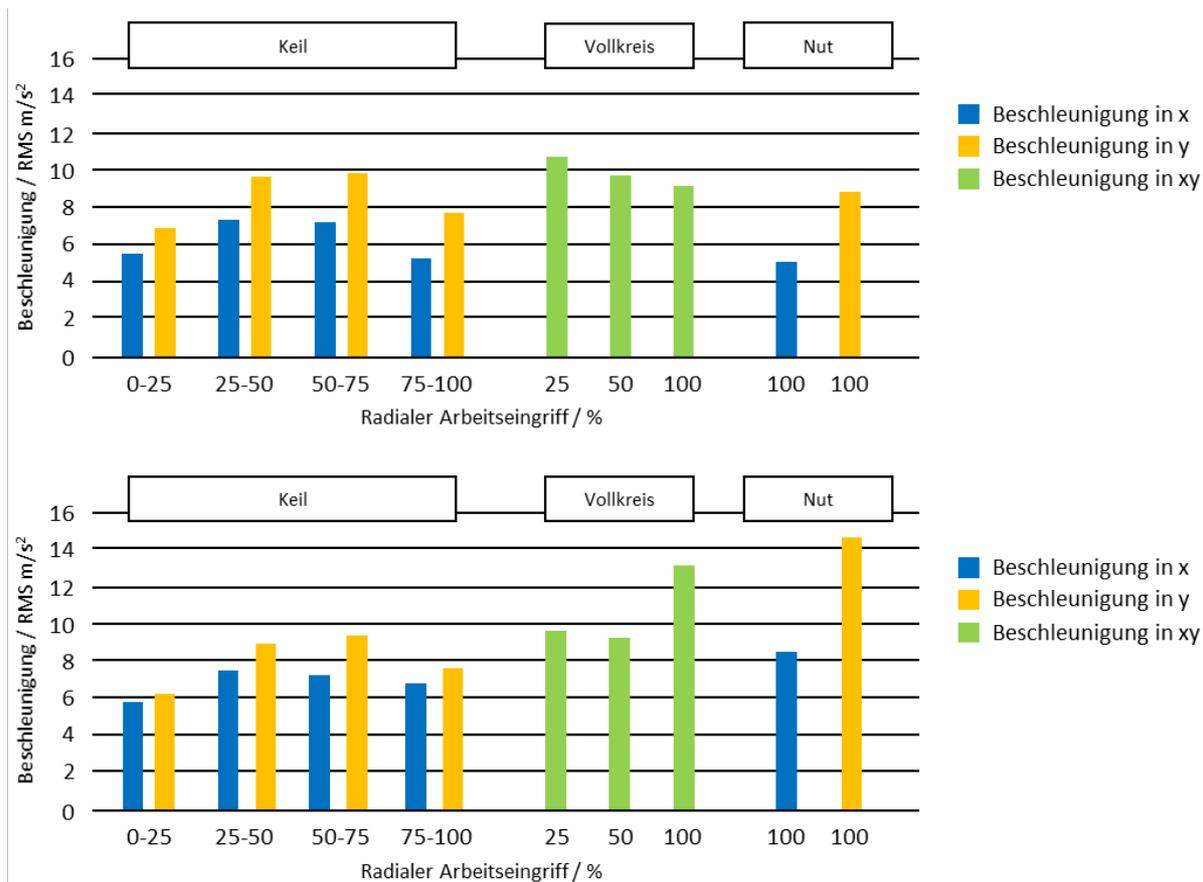


**Bild 3:** Mittlere Aktivkraft der einzelnen Fräsoperationen

## 4.2 Schwingungen

Zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens wurde auf Basis der erhobenen Beschleunigungs-Messwerte für jede einzelne Fräsoperation der jeweilige quadratische Mittelwert, Root Mean Square (RMS), bestimmt. Die Ergebnisse (**Bild 4**) zeigten, dass beim Fräsen der Keile die durch den Spanbildungsvorgang induzierte Schwingungsanregung der Roboterstruktur bis zum dritten Eingriffsintervall sukzessiv ansteigt und im Volleingriff abfällt. Dies ist auf wechselnde Schnittkräfte aufgrund des unterbrochenen Schnitts sowie den periodischen abrupten Schneidenaustritten mit Spanungsdicke  $> 0$  mm des zweischneidigen Fräasers bei geringeren Eingriffsbreiten gegenüber dem Volleingriff zurückzuführen. Die Fräsversuche der Vollkreise bestätigen, dass mit zunehmendem Arbeitseingriff die an der Spindel gemessenen mittleren Beschleunigungsamplituden abnehmen. Eine Ausnahme bildet das Fräsen der Kreisbahn im Volleingriff in Pose 2. Dies lässt sich damit erklären, dass neben den fremderregten Schwingungen zusätzlich eine Selbsterregung auftritt, wobei die Roboterkinematik in ihrer posenabhängigen Eigenfrequenz aufschwingt.

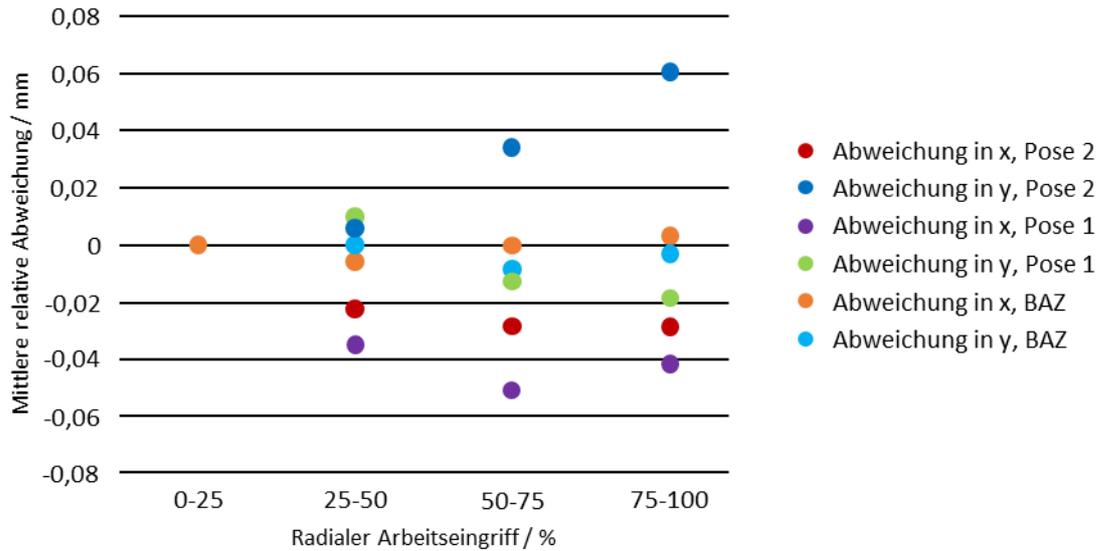
Die Ergebnisse spiegeln zudem eine signifikante Abhängigkeit des dynamischen Nachgiebigkeitsverhaltens der Roboterkinematik von der Vorschubbewegung wider. So zeigten sich in beiden Posen sowohl beim Fräsen der Keile als auch der quadratischen Nuten bei Vorschubbewegung in x-Richtung höhere Beschleunigungsamplituden (hier in y-Richtung) als beim Fräsen mit Vorschubbewegung in y-Richtung (hier Beschleunigungsamplituden in x-Richtung), was die höhere Gesamtnachgiebigkeit der Roboterkinematik in y-Richtung belegt.



**Bild 4:** Mittlere Schwingungsamplituden der Fräsoperationen in Pose 1 (oben) und Pose 2 (unten)

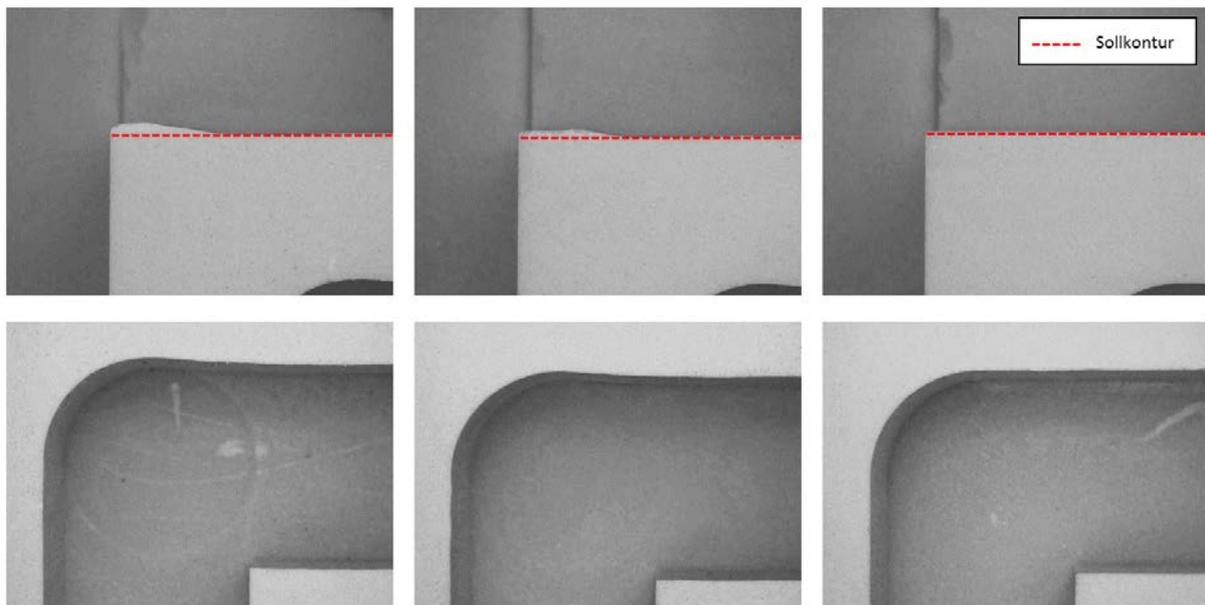
### 4.3 Bearbeitungsgenauigkeiten

Um den Einfluss radialer Eingriffsgrößen auf die Bearbeitungsgenauigkeit zu untersuchen, wurden die Ist-Konturen der gefrästen Keile in Bezug auf den Werkstücknullpunkt (WNP) messtechnisch erfasst und die jeweiligen örtlichen Abweichungen der Messpunkte von der theoretischen Soll-Bahn entlang der x- bzw. y-Koordinate bestimmt. Anschließend wurde der Mittelwert aus den örtlichen Abweichungen jedes Intervallbereichs berechnet, wobei die Messwerte der Fräsein- und austritte nicht in die Bildung des arithmetischen Mittels einbezogen wurden. Um Nullpunktfehler auszuschließen, wurden die relativen Abweichungen der Mittelwerte als Differenz vom Mittelwert des jeweils ersten Eingriffsintervalls (0% - 25%) herangezogen. Aus den Ergebnissen (**Bild 5**) ist aufgrund des begrenzten Versuchsumfangs und der Vielzahl zusätzlicher Einflussfaktoren (Fräsrichtung, Pose) keine eindeutige Systematik ableitbar. Die größte Abweichung von der Soll-Bahn (hier in y-Richtung) konnte in Pose 2 beim Fräsen des Keils mit Vorschub in x-Richtung festgestellt werden. Bei Belastung in y-Richtung liegt die erste Hauptachse im Kraftfluss, die bei Bewegung des TCPs in x-Richtung jedoch nicht vorgespannt ist. Die Kraft in y-Richtung zusammen mit dem verlängerten Hebelarm in Pose 2 wirken als Moment um diese rotatorische Achse, wodurch die größere Abweichung resultiert.



**Bild 5:** Mittlere relative Abweichung in Abhängigkeit des Arbeitseingriffs

Die gefrästen Keile wiesen zudem eine Formabweichung beim Fräser-Auslauf auf (**Bild 6**, oben). Dies lässt sich auf den Abfall der Prozesskräfte am Schneidenaustritt zurückführen, wodurch die elastischen Verformungen der Roboterkinematik abgebaut werden und dieser auf die lastfreie Bahn zurückfedert.

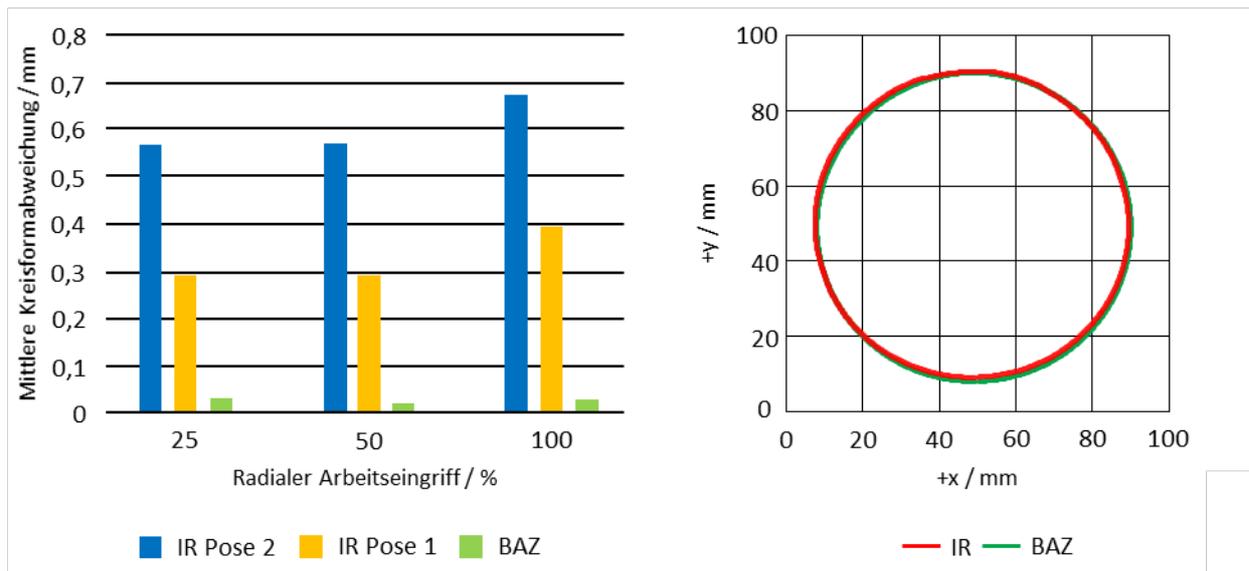


**Bild 6:** Formabweichung beim Fräserauslauf (oben) – IR Pose 2 (links), IR Pose 1 (Mitte) und BAZ (rechts) und Umkehrpunkte (unten) – IR Pose 2 (links), IR Pose 1 (Mitte) und BAZ (rechts)

Des Weiteren wurde der Einfluss radialer Eingriffsgrößen bei gleichzeitiger Bewegung der Roboterachsen in xy-Richtung anhand des Kreisformtests analysiert (**Bild 7**, links).

Die aus den Differenzen zwischen Hüll- und Pufferkreis der Messpunkte je Faktorkombination gebildeten Mittelwerte zeigen, dass die mit dem IR im Viertel- und Halbeingriff gefrästen Kreisbahnen geringe Divergenzen hinsichtlich der Rundheitsabweichung aufwiesen, wohingegen im Volleingriff nach Überschreiten einer Grenzschnitttiefe ein sprunghafter Anstieg der Abweichungen zu verzeichnen war. Aus den Ergebnissen lassen sich zudem die posesabhängigen Eigenschaften des Roboters aufzeigen, da die Kreisformabweichungen in Pose 2 im Vergleich zu Pose 1 aufgrund der größeren Entfernung des TCPs von der Roboterbasis zunehmen.

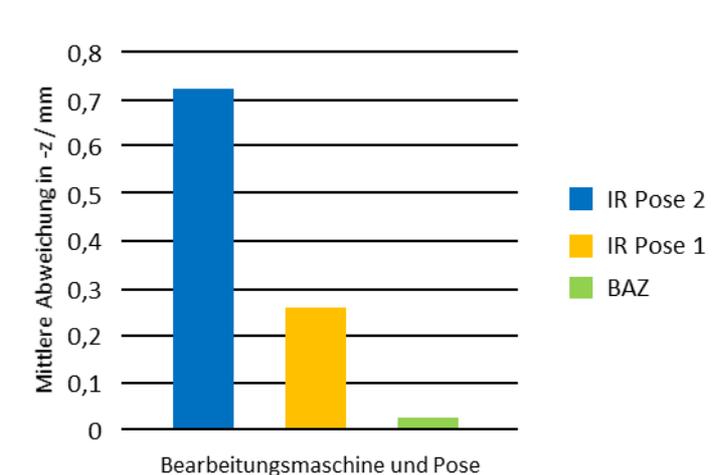
**Bild 7** (rechts) zeigt ergänzend die gemessene Kreisform einer mit IR und BAZ gefertigten Kreisbahn, wobei die im Vergleich zum BAZ höheren Abweichungen vom Kreisprofil primär auf Haftreibung und Umkehrspiel des Roboter-Getriebes der ersten Drehachse zurückzuführen sein dürften.



**Bild 7:** Mittlere Kreisformabweichung in Abhängigkeit des Arbeitseingriffs (links) und Darstellung der Kreisformabweichung mit IR (rechts oben) und BAZ (rechts unten)

Das Fräsen der quadratischen Nut ermöglicht die Untersuchung von Abweichungen bei Richtungswechseln im Volleingriff. Die mit dem IR gefrästen Nuten wiesen in den Umkehrpunkten aufgrund der abrupten Wechsel um 90° in x- und y-Richtung ein Ausschlagen des Fräswerkzeugs in der xy-Ebene auf (**Bild 6**, unten), das sich mit zunehmendem Abstand zur Roboterbasis verstärkte.

Zudem zeigte sich in den Umkehrpunkten ein deutliches Absenken der Fräsbahn in negativer z-Richtung, wobei die Abweichungen in Pose 2 um etwa den Faktor 3 höher lagen als in Pose 1 (**Bild 8**). Dies ist insbesondere auf die Gewichtskraft der Frässpindel zurückzuführen, die in ausgestreckter Pose aufgrund des verlängerten Hebelarms zu einem stärkeren Nachschwingen führt. Bei den auf dem BAZ gefertigten Referenzwerkstücken konnte kein Überschwingen in den Umkehrpunkten beobachtet werden.



**Bild 8:** Mittlere Abweichung in z in Abhängigkeit von der Bearbeitungsmaschine und Pose

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Versuchsreihe untersuchte den Einfluss des radialen Arbeitseingriffs in der Kunststoffzerspanung auf die Wechselwirkung zwischen Zerspanprozess und Industrieroboter. Die Versuche zeigen, dass sich der radiale Arbeitseingriff auf die resultierende Aktivkraft und aufgrund der Zahneingriffsbedingungen auf die dynamische Anregung der Roboterkinematik und damit auf die Bearbeitungsqualität auswirkt. Der Zusammenhang zwischen radialem Arbeitseingriff und Abweichung von der Sollgeometrie ließ sich vor allem bei den Kreisformtests nachweisen. Insbesondere die Roboterpose erwies sich

in den Versuchen als erheblicher Einflussfaktor. So fielen die Formabweichungen bei der am weitesten von der Roboterbasis entfernten Fräsposition am größten aus, auch wurden in dieser Pose die größten Schwingungen an der Frässpindel gemessen. Hierbei fielen die Schwingungen im Vollschnitt bzw. bei kleinem radialen Arbeitseingriff tendenziell geringer aus als beim Fräsen mit mittlerem radialen Arbeitseingriff, was auf den abrupt auftretenden Schneidenein- bzw. austritt zurückzuführen ist.

Um die bisherigen Ergebnisse zu ergänzen, sind weitere Untersuchungen hinsichtlich zusätzlicher Posen sowie eines Fräskraftmodells zur genaueren Auflösung der Richtung von Bahn- und Kraftvektor erforderlich.

## Literatur

- [1] Rösch, O.: Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern. Dissertation, Technische Universität München, 2014
- [2] Abele, E.; Bauer, J.; Friedmann, M. et al.: Einsatz von Robotern in der spanenden Fertigung. Wissenschaftsmagazin der TU Darmstadt (2011), S. 44–49
- [3] Abele, E.; Polley, W.; Ehm, A. et al.: Spanende Bearbeitung mit Industrierobotern. Thermische Einflüsse auf die Bearbeitungsgenauigkeit. *wt Werkstattstechnik online* 103 (2013) 9, S. 706–711
- [4] Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen 1. Maschinenarten und Anwendungsbereiche*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005
- [5] Karim, A.; Jäger, J.; Podewils, C. von et al.: Nachgiebigkeitsverhalten von Industrierobotern. Experimentelle Ermittlung der statischen Nachgiebigkeit in unterschiedlichen Posen. *wt Werkstattstechnik online* 108 (2018) 5, S. 364–370
- [6] Abele, E.; Weigold, M.; Kulok, M.: Spanende Bearbeitung mit Industrierobotern. Statische und dynamische Analyse der vollseriellen Kinematik. *wt Werkstattstechnik online* 95 (2005) 9, S. 666–671
- [7] Karim, A.; Michalkowski, C.; Lechler, A. et al.: Schwingungsanalyse an Industrierobotern. Experimentelle Untersuchung des dynamischen Verhaltens in unterschiedlichen Posen. *wt Werkstattstechnik online* 109 (2019) 9, S. 656–661
- [8] Schnoes, F.; Zaeh, M. F.: Model-based Planning of Machining Operations for Industrial Robots. *Procedia CIRP* 82 (2019), S. 497–502
- [9] Menze, C.; Becker, D.; Stehle, T. et al.: Spanende Bearbeitung mit Industrierobotern und Bearbeitungszentren. Vergleichende Analyse der erzielbaren Bauteilqualität in der Holzbearbeitung. *wt Werkstattstechnik online* 109 (2019) 9, S. 650–655
- [10] Weigold, M.: *Kompensation der Werkzeugabdrängung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern*. Aachen: Shaker 2008
- [11] Leonasio, M.; Villagrossi, E.; Beschi, M. et al.: Vibration Analysis of Robotic Milling Tasks. *Procedia CIRP* 67 (2018), S. 262–267
- [12] Reindl, C.; Friedmann, M.; Bauer, J. et al.: Model-based off-line compensation of path deviation for industrial robots in milling applications. 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Budapest, Hungary, 2011, S. 367–372
- [13] Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen 5. Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität*. Berlin: Springer Vieweg 2013
- [14] Abele, E.; Haddadian, K.; Baier, C. et al.: Fräsen mit Industrierobotern. Untersuchung von Einflussparametern beim robotergeführten Fräsen von Gusseisen mit Kugelgraphit. *wt Werkstattstechnik online* 106 (2016) 1/2, S. 2–8
- [15] DIN 6584:1982-10, Begriffe der Zerspantechnik; Kräfte, Energie, Arbeit, Leistungen, Ausgabe 1982
- [16] Becke, C.: *Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen*, Karlsruher Institut für Technologie, 2011
- [17] Kalveram, M.: *Analyse und Vorhersage der Prozessdynamik und Prozessstabilität beim Hochgeschwindigkeitsfräsen*. Essen: Vulkan-Verl. 2005
- [18] Halbauer, M.; Lehmann, C.; Städter, P. et al. (Hrsg.): *Milling strategies optimized for industrial robots to machine hard materials*. IEEE 18th Conference of Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), Cagliari, Italy, 10 - 13 Sept. 2013. Piscataway, NJ: IEEE 2013 2013
- [19] Tyapin, I.; Hovland, G.; Kosonen, P. et al.: Identification of a static tool force model for robotic face milling. 2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), Senigallia, Italy, 2014, S. 1–6

## Bild- und Tabellenunterschriften

**Bild 1:** Wechselwirkung zwischen Zerspanprozess und Roboterstruktur. Bild: Fraunhofer IPA nach [2].

**Bild 2:** Prüfwerkstück – Rohkörper (links) und Fräsoperationen (rechts). Bild: Fraunhofer IPA.

**Bild 3:** Mittlere Aktivkraft der einzelnen Fräsoperationen. Bild: Fraunhofer IPA.

**Bild 4:** Mittlere Schwingungsamplituden der Fräsoperationen in Pose 1 (oben) und Pose 2 (unten). Bild: Fraunhofer IPA.

**Bild 5:** Mittlere relative Abweichung in Abhängigkeit des Arbeitseingriffs. Bild: Fraunhofer IPA.

**Bild 6:** Formabweichung beim Fräserauslauf (oben) – IR Pose 2 (links), IR Pose 1 (Mitte) und BAZ (rechts) und Umkehrpunkte (unten) – IR Pose 2 (links), IR Pose 1 (Mitte) und BAZ (rechts). Bild: Fraunhofer IPA.

**Bild 7:** Mittlere Kreisformabweichung in Abhängigkeit des Arbeitseingriffs (links) und Darstellung der Kreisformabweichung mit IR und BAZ (rechts). Bild: Fraunhofer IPA.

**Bild 8:** Mittlere Abweichung in -z in Abhängigkeit von der Bearbeitungsmaschine und Pose. Bild: Fraunhofer IPA.

**Tabelle 1:** Qualitative Einordnung verschiedener Werkzeugmaschinenkonzepte nach [6].

**Tabelle 2:** Positionierung der Prüfwerkstücke.