

In-situ-Kraftanpassung an gekrümmten Werkzeugkonturen ermöglicht gleichmäßiges Schleifergebnis

Variationskraftgeregeltes 5-Achs-Schleifen

S. Hähnel, K. Jahnle, T. Grunwald, T. Bergs

Eine variierende Anpresskräfteeinstellung im Werkzeugeingriff des Schleifstiftes entlang stark gekrümmter Werkzeugkonturen ermöglicht eine konstante Schleifprofiltiefe. Dies verhindert unerwünschte Bauteilformabweichungen und erlaubt eine automatisierte Nachbearbeitung komplex geformter Konturen in einer Aufspannung. So wird ein durch einen Werkzeugwechsel unterbrochener Schnitt vermieden. Insbesondere Übergänge von ebenen auf stark gekrümmte, konvexe Flächen und kleine Radien in Kantenbereichen lassen sich mit diesem Verfahren automatisiert nachbearbeiten.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Schleifen, Werkzeugbau

The variation force-controlled finishing of curved tool steel surfaces with mounted points

A varying contact force setting in the tool engagement of the mounted point along strongly curved tool contours enables constant grinding profile depth. It prevents undesirable component shape deviations and allows automated reworking of complex curved contours in one clamping position. This avoids interrupted cutting due to a tool change. Transitions from flat to strongly curved, convex surfaces and small radii in edge areas can be automatically reworked with this process.

1 Einleitung

Moderne 5-Achs-Werkzeugmaschinen ermöglichen den Einsatz von flexiblen Schleifkinematiken. Ursprünglich im Bereich des NC (Numerical Control)-Formschleifens verortet, erlaubt der Einsatz von Schleifstiften in Kombination mit einem kraftgeregelten Prozess eine automatisierte Nachbearbeitung von stark gekrümmten Werkzeugkonturen. Aufgrund der geringen Flächenleistung von Schleifstiften werden eher kleine Oberflächenbereiche adressiert. Die dem Schlichtfräsen ähnelnde NC-Programmierung und die geometrische Auslegung des Werkzeuges schafft Synergien, welche eine wirtschaftliche, automatisierte Feinbearbeitung von Bauteilen kleiner Losgrößen erlaubt. Zu beachten ist aber, dass die Kontaktzone im Schneideneingriff während der Bearbeitung von verschiedenen gekrümmten Flächen variiert. Dies kann zu einem ungleichmäßigen Schleifergebnis führen. [1–4]

Aus diesem Grund wurde ein Prozess entwickelt, welcher die Pressung im Werkzeugeingriff durch eine gezielt variierende Kräfteeinstellung konstant einstellt. Damit soll eine gleichmäßige Schleifprofiltiefe entlang variierend gekrümmter Konturen erreicht werden.

Das kraftgeregelte Schleifen findet Anwendung in den verschiedensten Branchen [1]. Es existiert eine weite Bandbreite an Vorrichtungen, die die Ausführung eines kraftgeregelten Schleifprozesses ermöglichen. Die Kraftregelung dient in der Regel der Einstellung einer definierten, konstanten Anpresskraft während des Prozesses. Die Kräfteeinstellung erfolgt entweder passiv, zum Beispiel über nachgiebige Apparaturen und Halter mit Federn, oder aktiv über verschiedene Regelsysteme. Aktuelle

Systeme weisen oft eine Nachgiebigkeit auf. Somit wird über einen definierten Ausgleichsweg eine konstante Anpresskraft realisiert und es werden automatisch Referenzierungsfehler und Werkzeugverschleiß kompensiert. Die Einstellung einer konstanten Kraft stößt jedoch an Grenzen, da eine sich ändernde Werkzeugkontaktfläche bei variierenden Oberflächenkrümmungen nicht berücksichtigt wird. Aufgrund einer fehlenden Kraftanpassung variiert die Pressung in der Werkzeugkontaktzone, was zu Abweichungen in der Schleifprofiltiefe führen kann.

Bauteile mit variierenden, stark gekrümmten Bereichen erfordern den Einsatz flexibler Schleifkinematiken, wie zum Beispiel Schleifstifte. In Kombination mit einer 5-Achs-Werkzeugmaschinenkinematik ändern sich die Kontaktbedingungen zwischen Schleifwerkzeug und Werkstück fortwährend. Eine reduzierte Kontaktlänge im Schneideneingriff des Werkzeuges resultiert in einer kleineren Kontaktzone. Dadurch ändert sich die flächenabhängige Pressung im Wirkbereiche Werkzeug/Werkstück. Bei konstanter Anpresskraft wirkt ein höherer Druck im Schneideneingriff, was wiederum in einer gesteigerten Schleifprofiltiefe resultiert. So können unerwünschte Formabweichungen und ein ungleichmäßiges Schliffbild entstehen. [5–11].

Die gezielte Kraftanpassung zur Einstellung einer konstanten Pressung zwischen Werkzeug und Werkstück entlang einer sich ändernden Krümmung der Werkstückkontur soll eine gleichmäßige Schleifprofiltiefe erreichen und Formabweichungen vermeiden. Die Systematik wird in diesem Beitrag als Variationskraftregelung bezeichnet. Zur Umsetzung wurde eine modellbasierte Prozesssystematik entwickelt und empirisch anhand von Versuchsreihen validiert.

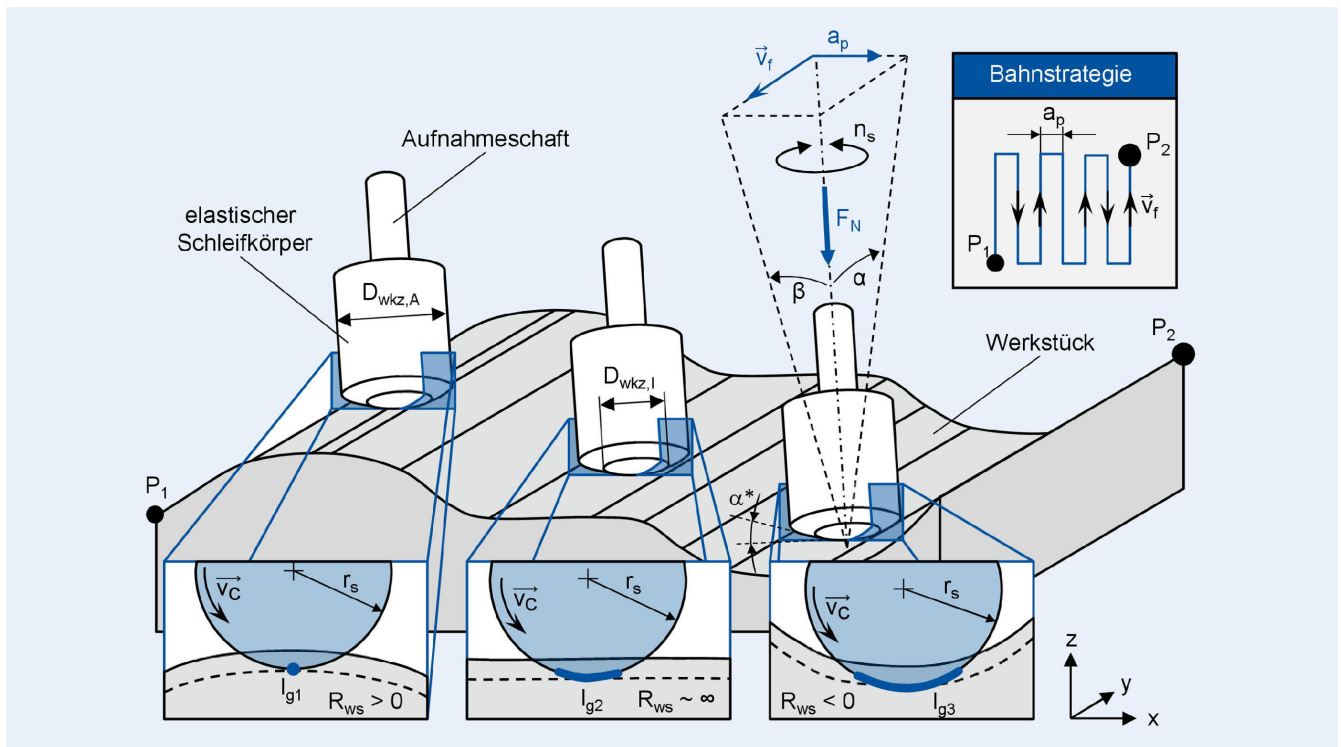


Bild 1. Verwendete flexible Kinematik eines Schleifstiftes im Eingriff auf einer variierend gekrümmten Werkzeugkontur mit dargestellter Änderung der Kontaktlänge l_g . Grafik: Fraunhofer IPT

2 Der Prozess

Schleifstifte werden in der Bauteilnachbearbeitung in verschiedensten geometrischen Ausführungen, Korn- und Bindungsarten eingesetzt. Zur Nachbearbeitung von geschichteten Bauteilen aus Werkzeugstahl haben sich gummigebundene Schleifstifte bewährt. Mit diesen Schleifstiften können Zielrauheiten von $R_a < 0,3 \mu\text{m}$ im Anschluss an die Schlichtfräsbearbeitung erreicht werden. In kraftgeregelten Systemen sind Schleifbearbeitungen mit Schleifstiften in Kugelform beziehungsweise mit abgesetztem, stirnseitigem Radius eingehend beschrieben. [6, 12–14]

In **Bild 1** ist eine Kinematik eines Schleifstiftes mit stirnseitig abgesetztem Fasenwinkel α^* dargestellt.

Die Wirkfläche im Eingriff begrenzt sich auf die Fasenfläche, welche sich aus der Differenz der Durchmesser $D_{\text{wzk},A}$ und $D_{\text{wzk},I}$ ergibt. Zur Vermeidung von Null-Schnittgeschwindigkeiten und Minimierung einer verschleißbedingten Kontaktzonenänderung kann der Bereich $D_{\text{wzk},I}$ mit einer Innenbohrung versehen sein. Mit einer 5-Achs-Bearbeitung ist das Werkzeug mit einer Orientierung in Relation zur Werkzeugoberfläche einstellbar, sodass die Werkzeugfase bei sich ändernden Eingriffsverhältnissen jederzeit vollständig im Eingriff ist. Prozessgrenzen durch limitierte Anstellwinkel sind von der Kraftregelung und Werkzeugzugänglichkeit abhängig. Als Bahnstrategie ist beispielhaft eine S-Raster-Strategie dargestellt [6].

Vorteil einer Fasenwirkfläche im Vergleich zu einer sich im Eingriff befindenden Kugelfläche ist, dass idealisiert ein Linienkontakt und kein punktförmiger Kontakt auf der Oberfläche besteht. So ist aufgrund von Werkzeugverschleiß von einer Änderung der Grundkörperform auszugehen, was durch einen linienförmigen Kontakt einer Fasenfläche reduziert oder vermieden werden kann.

Schematisch dargestellt ist eine sich bei variierender Krümmung ändernde Kontaktlänge l_g des Schleifstiftes. So besteht bei einer konvexen Werkstückkrümmung mit $R_{\text{ws}} > 0 \text{ mm}$ eine geringe Kontaktlänge l_g im Vergleich zu einem Werkzeugeingriff auf einer konkaven Oberflächenkontur $R_{\text{ws}} < 0 \text{ mm}$. Der kleinere Umschlingungswinkel äußert sich in einer geringeren Kontaktfläche im Werkzeugeingriff. Die flächenabhängige Pressung im Wirkspalt zwischen Werkzeug und Werkstück nimmt bei kleiner werdender Kontaktfläche zu. Bei einem kraftgeregelten Schleifprozess kann der Zusammenhang zwischen der Schleifprofiltiefe und dem Druck im Schneideneingriff basierend auf der Preston-Gleichung vereinfacht wie folgt beschrieben werden [15]:

Zeitabhängige Schleifprofiltiefe: $dz/dt = K \cdot p^* \cdot v$, wobei $p = F/A$

$dz/dt =$ Schleifprofiltiefe pro Zeiteinheit

$K =$ materialabhängige Preston-Konstante

$p_{\text{kon}} =$ Druck/Pressung in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück

$v =$ Relativgeschwindigkeit (zum Beispiel Schnittgeschwindigkeit, Vorschub)

$F =$ Anpresskraft

$A =$ Kontaktfläche

Demnach korreliert die Schleifprofiltiefe proportional mit der im Wirkspalt zwischen Werkzeug und Werkstück bestehenden Pressung p_{kon} . Die Pressung ist wiederum von dem Verhältnis der Anpresskraft F und der Kontaktfläche A abhängig. Entsprechend lässt sich ableiten, dass eine Kraftänderung Abweichungen der Kontaktzone kompensieren und eine konstante Pressung einstellen kann. Dieser Zusammenhang soll nun anhand von Versuchen untersucht und zur Einstellung einer konstanten Schleifprofiltiefe

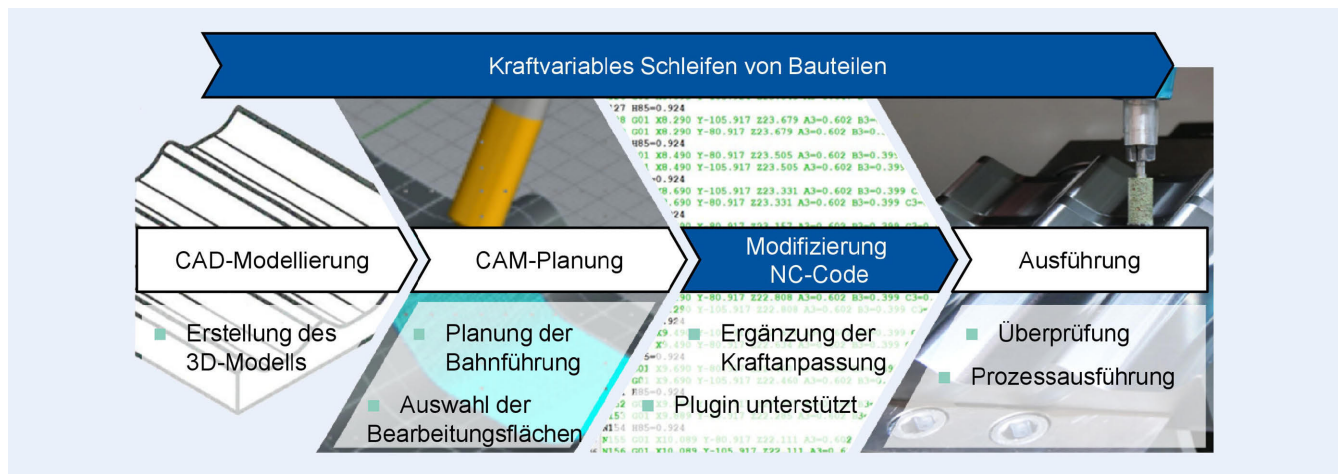


Bild 2. Grundlegendes Vorgehen für eine variationskraftgeregelte Nachbearbeitung von Bauteilen. Grafik: Fraunhofer IPT

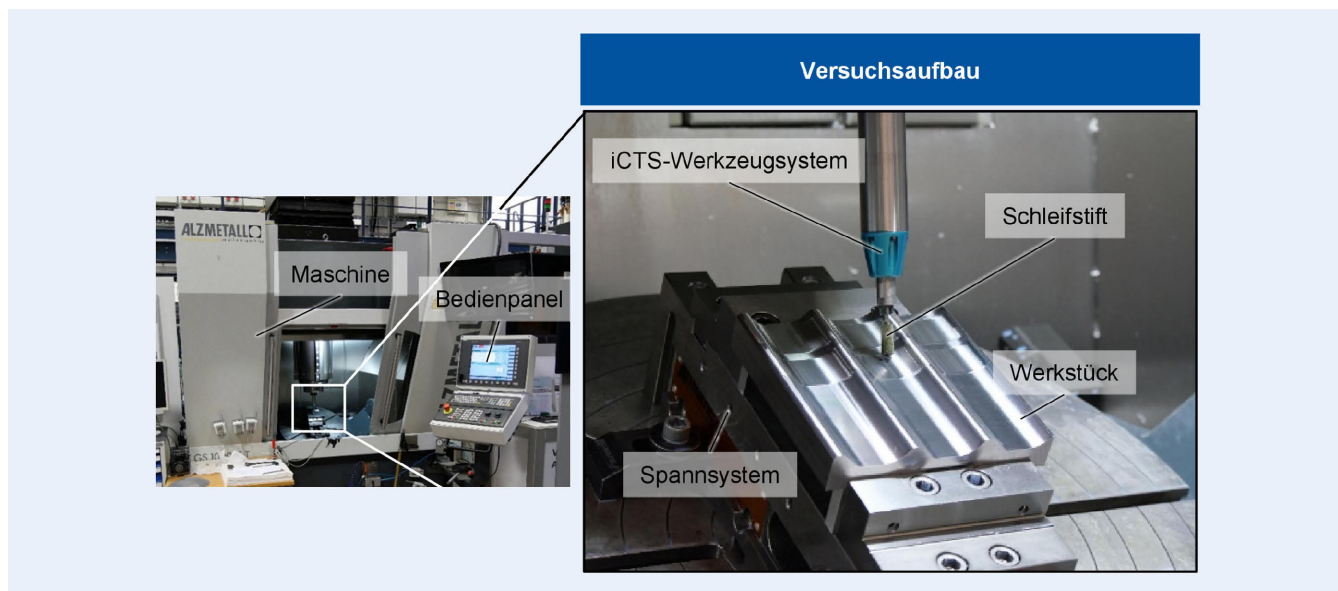


Bild 3. Versuchsaufbau und Kraftregelungssystematik für das variationskraftgeregelte Schleifen. Grafik: Fraunhofer IPT

entlang variierender Oberflächenkonturen verwendet werden. **Bild 2** zeigt die grundlegende Vorgehensweise bei der Realisierung einer variationskraftgeregelten Schleifbearbeitung.

Im Rahmen der CAD/CAM-Modellierung wird zunächst die virtuelle Bahnplanung vorgenommen. Zudem werden Bearbeitungsflächen ausgewählt und identifiziert. Die Krümmungen der ausgewählten Flächen können nun ausgelesen werden. Mit einer Applikation wird der NC-Code an den variierenden Krümmungsbereichen durch entsprechende Kraftregelwerte ergänzt. Anschließend werden die überarbeiteten Maschinendaten auf das Maschinensystem geladen und der Prozess kann gestartet werden.

3 Variationskraftschleifen von gekrümmten Oberflächen

3.1 Versuchsaufbau und Methodik

Zur Umsetzung einer variablen Anpresskraftregelung des Schleifprozesses wurde ein pneumatisch kraftgeregelter Werkzeughalter „iCTS“ der Hi.automize GmbH eingesetzt [16]. Der

Werkzeughalter ist axial-nachgiebig (entlang der Z-Achse der Maschine) und erlaubt eine stufenlose Einstellung der Prozesskraft in einem Bereich von 5 – 40 N. **Bild 3** zeigt den Versuchsaufbau in einer 5-Achs-Werkzeugmaschine des Typs „GS 1000/5-FDT“ des Herstellers Alzmetall [17].

Die Kraftregelung ist in die Maschinensteuerung integriert und ermöglicht eine Krafteinstellung über die Eingabe von NC-Maschinenbefehlen. Für die schleiftechnischen Untersuchungen wurde der Werkzeugstahl 1.2738 ausgewählt. Das Werkstück ist mit einem Maschinenschraubstock auf dem Dreh-Schwenktisch der Maschine gespannt. Die Oberflächenkontur weist variierende Krümmungen von konvexen ($R \sim 5 \text{ mm}$), ebenen und konkav gekrümmten Bereichen ($R \sim 20 \text{ mm}$) auf. Das iCTS-Werkzeugsystem mit eingespanntem Schleifstift ist in der HSK-A63-Aufnahme der Maschinenspindel montiert und wird automatisch über den Werkzeugwechsler der Maschine dem Prozess zugeführt. Die Oberflächengüte nach dem Fräsen wurde der Güte eines üblichen Schlichtprozesses ($R_a \sim 0,8 - 1,2 \mu\text{m}$; $R_z 4 - 6 \mu\text{m}$) eingestellt. Als Schleifstift wurde ein gummigebundener Schleifstift der Firma Daiwa Rabin des Typs „NK220“ eingesetzt [18]. Die Ausführ-

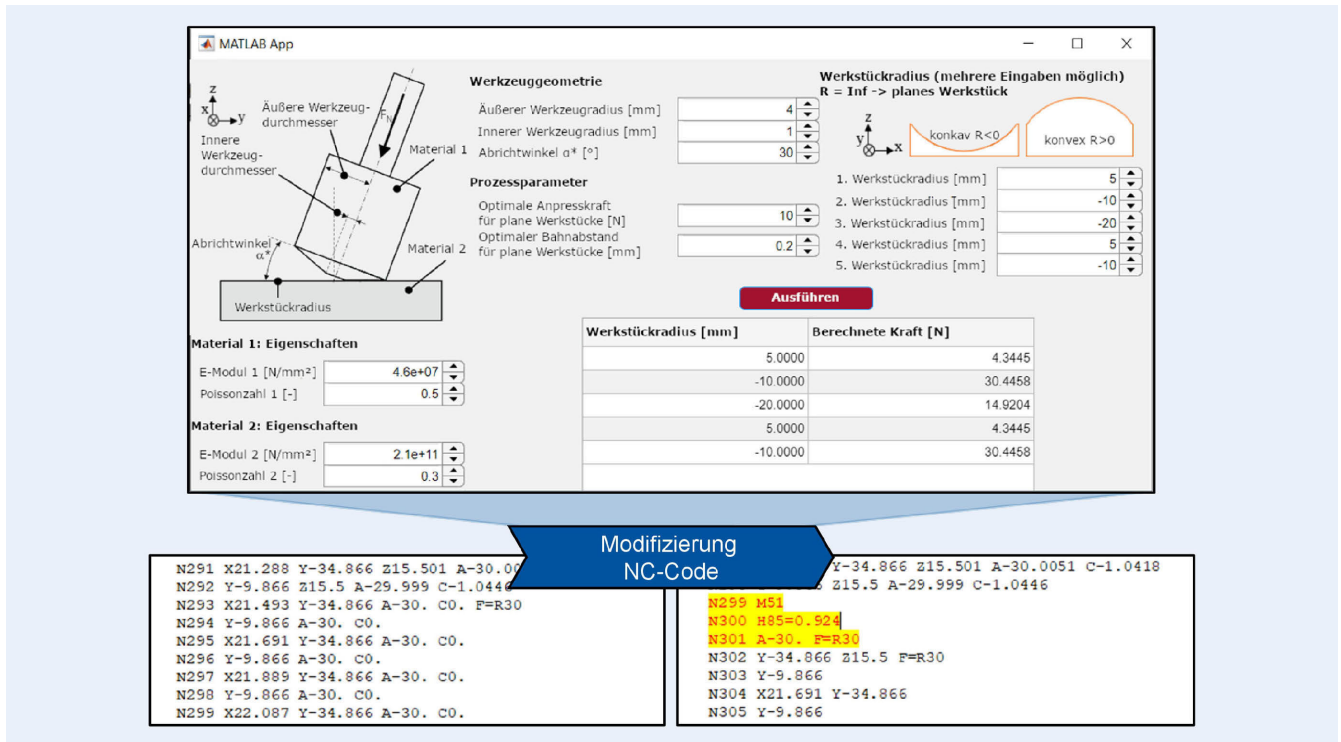


Bild 4. Eingabeoberfläche der Applikation zur Bestimmung der krümmungsabhängigen Anpresskraftwerte. Grafik: Fraunhofer IPT

Die Ermittlung der kontaktzonenabhängigen Anpresskraft hat das Fraunhofer IPT ein empirisch-analytisches Modell entwickelt. Zur versuchstechnischen Anwendung wurde eine Applikation mit Eingabeoberfläche erstellt, in welche die für die Berechnung der Anpresskräfte benötigten Werte (Prozessparameter, werkzeug- und werkstückspezifische Größen) eingegeben werden können. In Versuchsreihen wurden bei der Modellentwicklung zudem Prozessgrenzen (zum Beispiel minimale und maximale Anpresskraft, krümmungsspezifische Bahnabstände) ermittelt. Diese sind berücksichtigt, werden jedoch nicht thematisiert. Bild 4 zeigt die Eingabeoberfläche der entwickelten Applikation.

Nach erfolgter Berechnung der Kraftwerte erfolgt eine Anpassung des NC-Codes. Dabei werden die berechneten Kraftwerte an den entsprechenden Stellen ergänzt. Die Anpassung des NC-Codes kann sowohl manuell als auch automatisiert über ein in der CAM-Umgebung integriertes Plug-in durchgeführt werden. Im Anschluss kann der NC-Code auf das Maschinensystem geladen und der Prozess gestartet werden.

Zur Untersuchung des Einflusses einer Variationskraftregelung auf die Homogenität der Schleifprofiltiefe wurden Vergleichsversuche (in Kapitel 3.2) durchgeführt. Es wurde jeweils eine Schleifbearbeitung mit konstanter Anpresskraft und eine Vergleichsbearbeitung mit Variationskraftregelung vorgenommen. Nach den Prozessuntersuchungen wurde die Schleifprofiltiefe an den jeweiligen Krümmungsbereichen der Bauteilproben taktill gemessen. Im Anschluss an die Messungen, wurden die Messpunkte in Form von Liniendiagrammen visualisiert.

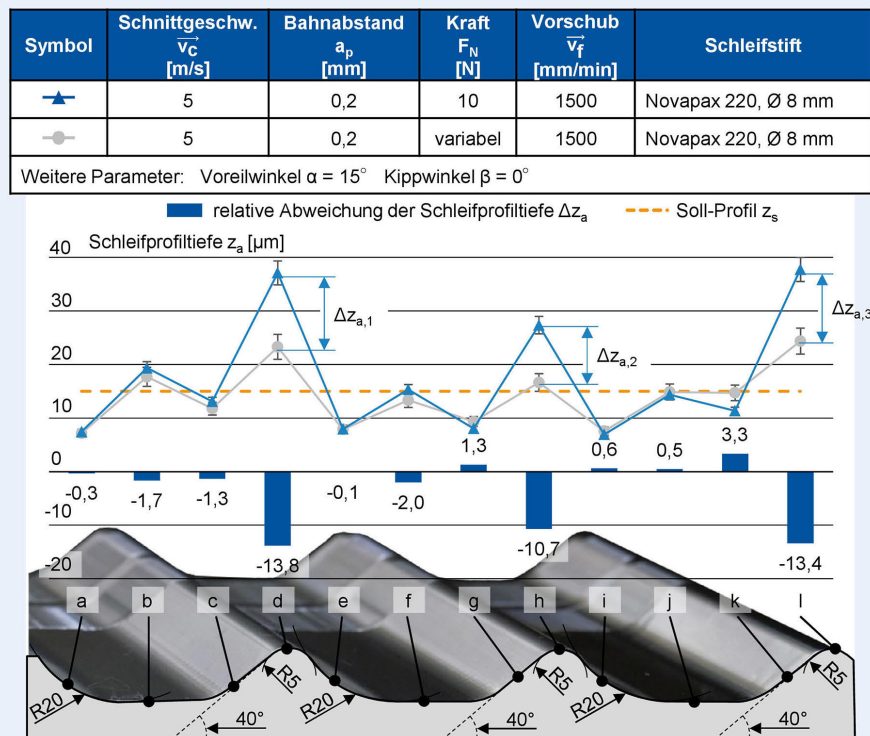
3.2 Versuchsergebnisse und Diskussion

Bild 5 stellt die Versuchsergebnisse der Prozessuntersuchungen mit konstanter Anpresskraft und mit Variationskraftregelung in Form von Liniendiagrammen visualisiert gegenüber.

Die Messergebnisse sind als Mittelwerte aufgetragen, die Standardabweichung ist in Form von Fehlerbalken dargestellt. Auf der vertikalen Achse ist die gemessene Schleifprofiltiefe z_a aufgetragen, welche an den jeweiligen Krümmungsbereichen (vertikale Achse, a-l) der Bauteilprobe gemessen wurde. Die orange markierte Linie beschreibt die Soll-Schleifprofiltiefe ($z_s \sim 15 \mu\text{m}$) und ist die Profiltiefe, welche möglichst über das gesamte Bauteil hinweg erzielt werden soll. Mit einem mit konstanter Anpresskraft geregelten Prozess wurden in Bereichen starker konvexer Krümmungen ($R \sim 5 \text{ mm}$) Abweichungen von $\Delta z_a = 0,6\text{--}26 \mu\text{m}$ gemessen. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von circa 4 – 172 % vom Sollprofil.

Im Vergleich zu einem mit konstanter Anpresskraft geregelten Prozesses, weist der Prozess mit Kraftvariation eine deutlich geringere Abweichung auf. Die Abweichungen reduzieren sich auf eine Bandbreite von circa $0,2\text{--}12 \mu\text{m}$. So konnte die absolute prozentuale Schleifprofilabweichung auf circa 5 – 82 % reduziert werden.

In konkaven Krümmungsbereichen ($R = 20 \text{ mm}$) konnte größtenteils eine Reduktion der Profiltiefeabweichung um circa $0,1\text{--}2,2 \mu\text{m}$ beobachtet werden. Dies entspricht einer Verbesserung um circa 4 – 14%. Zu beachten ist jedoch, dass während der Voruntersuchungen prozessbedingte Grundabweichungen der Schleifprofiltiefe von circa 5 – 7 % aufgetreten sind. Auch wurde beobachtet, dass trotz Kraftanpassung in konkaven und konvexen Bereichen die gemessene Schleifprofiltiefe um circa $5\text{--}15 \mu\text{m}$ abweichen kann. Ein Einfluss der Kraftvariation auf Oberflächenrauheitswerte konnte nicht festgestellt werden. Zu beachten ist,



- Vergleich der gemittelten Werte für die angegebenen Parameter.
- Die Kurve fix-var ist ohne den Ausreißer 2C
- Die Kurve fix-fix ist ohne den Ausreißer 2D
- Differenz aus der Sicht von fix-fix

Bild 5. Vergleich eines mit konstanter Kraft und Anpresskraftvariation geschliffenen Bauteils. Grafik: Fraunhofer IPT

dass eine Bandbreite der Kraftvariation mit circa 5 – 30 N eingestellt wurde. In Voruntersuchungen konnte ebenfalls kein signifikanter Einfluss einer Kraftvariation auf die in den vorliegenden Versuchen eingestellten Prozessparametern festgestellt werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den Prozessuntersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass ein variationskraftgeregelter Prozess eine gleichmäßigere Schleifprofiltiefe und damit höhere Formtreue erreichen kann als ein mit konstanter Anpresskraft geregelter Prozess. Insbesondere eine in stark gekrümmten, konvexen Oberflächenbereichen mit geringer Kontaktlänge l_g zwischen Werkzeug und Werkstück (etwa Kantenzonen von Bauteilen) abweichende Schleifprofiltiefe konnte deutlich reduziert werden. Dies wird durch eine Reduktion der Anpresskraft und damit einhergehenden Einstellung einer konstanten Pressung im Wirkspalt des Werkzeugeingriffs erreicht. In konkaven Krümmungsbereichen mit größerer Umschlingung zwischen Werkzeug und Werkstück bewirkt die Krafterhöhung eine relativ geringere Verbesserung. Die Absoluteabweichung vom Soll-Schleifprofil fällt insgesamt niedriger aus. Grund für einen geringeren Einfluss in Bereichen mit größerer Kontaktlänge können Änderungen im Spanbildungsmechanismus sein. Ein Einfluss der Kontaktlänge l_g auf den Spanbildungsmechanismus konnte bereits beim NC-Formschleifen mit Schleifstiften beobachtet werden. So kann eine ansteigende Kontaktlänge l_g zu einer erschwerten Spanabfuhr und Zusetzungen führen, die sich negativ auf die Spanbildung auswirkt [21].

Die vorgestellte Variationskraftregelung adressiert primär eine Anpassung der Anpresskraft zur Kompensation von Größenänderungen der Kontaktzone. Weitere Möglichkeiten einer Schleifprofilanpassung können Änderungen der Relativgeschwindigkeiten,

das heißt eine Anpassung der Schnittgeschwindigkeit v_c oder des Werkzeugvorschubs v_f sein [21]. Zudem können in Bereichen stark konvex gekrümmter Werkstückkonturbereiche Kontaktzonenabweichungen auftreten. So kann theoretisch, in Abhängigkeit der gewählten Bahnstrategie, die Kontaktlänge l_g den Werkzeugbahnabstand a_p unterschreiten. Dadurch muss eine Anpassung des Bahnabstandes gegebenenfalls in Betracht gezogen werden.

Neben dem Einsatz von Schleifstiften kann eine Variationskraftregelung auf verschiedenste kraftgeregelter Schleifverfahren und -werkzeuge (Honen, Bandschleifen, Schleifscheiben) angewendet werden. Dadurch ergibt sich ein weites Spektrum industrieller Anwendungsmöglichkeiten. Neben einer Integration der Variationskraftregelung in die CAD/CAM-Umgebung besteht zudem die Möglichkeit einer Kopplung der Systematik an Sensoren, welche die Bauteilkrümmung detektieren.

FÖRDERHINWEIS

Die Ergebnisse stammen aus Entwicklungen in dem Projekt „InnoFlex“ (Förderkennzeichen: EFRE-0801665). Besonderer Dank gilt der tatkräftigen Mitwirkung und Unterstützung der Konsortial- und Kooperationspartner Grunewald GmbH & Co. KG, ModuleWorks GmbH und August Rüggeberg GmbH & Co. KG. Das Projekt InnoFlex wurde durch Mittel des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2014–2020 im Rahmen des Programms „Leitmarktwettbewerb Produktion.NRW“ gefördert.

Literatur

- [1] Tawakoli, T. (Hrsg.): Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung 2010. Dissertation, Hochschule Furtwangen University, Villingen-Schwenningen, 2010
- [2] Böß, V.: Werkzeugwege für das Bandschleifen von Freiformflächen. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2007
- [3] Tönshoff, H.-K.; Böß, V.; Urban, B.: Automatisiertes Schleifen von Hohlformen. *wt Werkstattstechnik online* 91 (2001) 7, S. 422–427. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [4] Meyerhoff, M.: NC-Programmierung für das kraftgesteuerte Bandschleifen von Freiformflächen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998
- [5] Timmermann, S.: Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen. Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe, 1990
- [6] Tücks, R.: Automatisierte Feinbearbeitung von komplexen Werkzeugen und Formen aus Stahl. Aachen: Apprimus-Verlag 2012
- [7] Driemeyer Wilbert, A.; Behrens, B.; Dambon, O. et al.: Robot assisted manufacturing system for high gloss finishing of steel molds. In: Su, C. Y., Rakheja, S., Liu, H. (eds.): *Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2012*, pp. 673–685, doi.org/10.1007/978-3-642-33509-9_67
- [8] Denkena, B.; Turger, A.; Wang, B. et al.: Fünffachsige Schleifbearbeitung-Medizintechnik, Turbinenbau, Werkzeug- und Formenbau. 8. Seminar Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung. Neue Entwicklungen und Trends aus Forschung und Praxis 2010, pp. 3.10 – 3.19
- [9] Tönshoff, H.-K.; Denkena, B.; Böß, V. et al.: Automated finishing of dies and molds. *Production Engineering* 9 (2002) 2, pp. 1–4
- [10] Denkena, B.; Lütjens, G.; Böß, V.: Feinbearbeitung von Werkzeugen und Formen. Automatisiertes Schleifen und Bandschleifen von Freiformflächen im Praxiseinsatz. *wt Werkstattstechnik online* 93 (2003) 11, S. 729–734. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [11] Denkena B., Krödel A., Wilkens M.: Einfluss der Schleifscheibenanstellung auf die Oberflächenqualität. *wt Werkstattstechnik online* 110 (2020) 6, S. 389–392. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [12] Nagata, F.; Watanabe, K.; Kusumoto, Y. et al.: New Finishing System for Metallic Molds Using a Hybrid MotiodForce Control. 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422), Taipei, Taiwan, 2003, pp. 2171–2175
- [13] Driemeyer Wilbert, A.; Behrens, B.; Zymła, C. et al.: Robotic finishing process – An extrusion die case study. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 11 (2015), pp. 45–52
- [14] Tücks, R.; Zunke R.; Driemeyer Wilbert, A.: *MoldFinish. Intelligentes Poliersystem zur Automatisierung der Endbearbeitung im Werkzeug- und Formenbau*. Aachen: Verlag Fraunhofer IPT 2011
- [15] Preston, F. W.: The theory and design of plate glass polishing machines. *Journal of the Society of Glass Technology* 11. (1927), pp. 214–256
- [16] Hi.automize GmbH: iCTS-The Intelligent Compliant Tooling System. Internet: www.hi-automize.de/cth-one. Zugriff am 16.05.2023
- [17] Alzmetall Werkzeugmaschinenfabrik und Gießerei Friedrich GmbH & Co. KG: Bearbeitungszentrum GS1000/5-FDT. Internet: alzmetall.de/produkt/bearbeitungszentrum-gs-1000-5-fdt/. Zugriff am 16.05.2023
- [18] Daiwa Kasai Kogyo Co., Ltd: DAIWA RABIN. Internet: www.daiwa-rabin.co.jp/digitalcatalog/pdf_en/daiwa_e_all.pdf. Zugriff am 16.05.2023
- [19] Produktdatenblatt. B-Cool 9665. Stand: 2016. Internet: www.oel-engel.de/mediafiles/Produktblatt/B-Coll_9665_Var_45_PIDS.pdf. Zugriff am 16.05.2023
- [20] Mahr Metering Systems GmbH: MarSurf LD 130 – Konturen- und Rauheitsmessgerät. Internet: metrology.mahr.com/de/produkte/artikel/6720821-kombinierter-konturen-und-oberflaechenmessplatz-mar-surf-ld-130. Zugriff am 16.05.2023
- [21] Klein, T. B.: *Prozessstrategien beim NC-Formschleifen mit Schleifstiften*. Dissertation, Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik; Technische Universität Berlin, 2015


Sebastian Hähnel, M.Sc. 

Foto: Fraunhofer IPT

Kirk Jähnel, M.Sc.

Dr.-Ing. Tim Grunwald

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs MBA

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Steinbachstr. 17, 52074 Aachen
Tel. +49 241 / 8904-727
sebastian.haehnel@ipt.fraunhofer.de
www.ipt.fraunhofer.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)