

Bearbeitungswinkel zur Produktivitätsoptimierung beim Schleifen freigeformter Oberflächen

Einfluss der Schleifscheibenanstellung auf die Oberflächenqualität

B. Denkena, A. Krödel, M. Wilckens

Eine steigende Nachfrage an komplex geformten Bauteilen fordert neue, produktivere Fertigungsverfahren sowohl für die Luftfahrt wie auch für die Medizintechnik. Die Bahnplanung für diese Bauteile kann durch die gezielte Verwendung von Bearbeitungswinkeln verbessert werden. Bisher ist der Einfluss sich ändernder Winkel während der Bearbeitung auf die Oberflächenqualität des Bauteils jedoch unzureichend untersucht. Dieser Artikel zeigt vorteilhafte Winkelbereiche für zwei beispielhafte Maschinen und Werkzeuge auf.

STICHWÖRTER

Fertigungstechnik, Schleifen

1 Einleitung

In der Europäischen Union werden jährlich mehr als 500 000 Kniegelenke ganz oder teilweise durch Endprothesen ersetzt. Eine Optimierung der Fertigungsprozesse für diese Prothesen bietet somit ein enormes wirtschaftliches Potenzial. Das 5-Achs-Fräsen ist ein verbreitetes Verfahren für die Herstellung dieser Bauteile sowie auch für andere Bauteile mit freigeformten Oberflächen. Es unterliegt jedoch verfahrensspezifischen Grenzen bezüglich der erreichbaren Bearbeitungs- und Standzeiten sowie geometrischen Genauigkeiten und Oberflächengüten. Darüber hinaus können harte und schwer zerspanbare Werkstoffe nur bedingt bearbeitet werden.

Die Fertigung dieser Bauteile stellt besondere Anforderungen an die Kinematik des Bearbeitungsprozesses. Hinzu kommen häufig hohe Anforderungen bezüglich der Oberflächenqualität und der Formgenauigkeit [1, 2]. Wichtige Bestandteile in der aktuellen Fertigungskette sind das NC-Fräsen und die Funkenerosion. Jedoch besitzen die so hergestellten Bauteile zum Teil nicht die erforderlichen Maß- und Formgenauigkeiten sowie Oberflächengüten. Aus diesem Grund ist oft ein weiterer Feinbearbeitungsschritt erforderlich, auf den 10% bis 15% der Fertigungskosten entfallen [3]. Diese Feinbearbeitung kann durch Hartfräsen, Schleifen oder Polieren erfolgen [1].

Das Hartfräsen hat sich in den letzten Jahren im Bereich der Endbearbeitung als Alternative zum Schleifen und Polieren am Markt etabliert [4]. Eine wesentliche Limitierung ist jedoch

Influence of grinding wheel angle on surface quality. Utilization of different machining angles to improve productivity when machining free form surfaces

An increasing demand for complex shaped parts requires new methods for increasing the productivity in machining of those parts. The path planning for free form grinding can be improved by fitting the surface curvature of the workpiece to the shape of engagement of the tool. So far, there has been little investigation concerning the effects of the yaw angle on the surface quality. This paper shows beneficial yaw angles for a set of process parameters on two different machines and tools.

durch den zu bearbeitenden Werkstoff gegeben. So wird beispielsweise die Bearbeitung von keramischen Werkstoffen auch in der Zukunft nicht mit Hartfräsen möglich sein [5].

Das sogenannte Formschleifen bietet hingegen die Möglichkeit, großflächige und komplex geformte Bauteile aus sprödharten Werkstoffen zu bearbeiten. Eine mögliche Technologie hierzu ist das NC-Formschleifen mit torischen Werkzeugen.

Beim NC-Formschleifen erfolgt die Bearbeitung mit Profilwerkzeugen (hier: Form 1F) entlang der NC-gesteuerten Werkzeugbahnen. Durch eine geeignete Führung der Werkzeuge mittels simultaner Bewegung von bis zu fünf CNC-gesteuerten Achsen ist eine flexible Anpassung an eine komplexe Werkstückoberfläche möglich [2, 6–9].

Eine etablierte Fertigungstechnologie des CNC-Formschleifens mit torischen Werkzeugen stellt das 3-achsige Abzeilen der zu bearbeitenden Oberfläche dar [10]. Die Produktivität und die erzielbaren Formgenauigkeiten dieses Verfahrens sind jedoch begrenzt, da die Werkzeuganstellung konstant ist und nicht an die lokal vorliegenden Oberflächenkrümmungen angepasst wird. Aus diesem Grund ändern sich während des Schleifens die Eingriffsverhältnisse und somit die Prozessbelastungen deutlich. Dies führt beispielsweise zu unterschiedlichen Werkzeugabdrängungen und damit zu Überschreitungen der Form- und Maßtoleranzen. Des Weiteren bleibt beim Abzeilen des Werkstücks der Kontaktpunkt zwischen Schleifscheibe und Bauteil auf dem Werkzeug konstant. Dies kann bei hohen Bearbeitungszeiten oder schwer zu bearbeitenden Werkstoffen dazu führen, dass ein punktueller

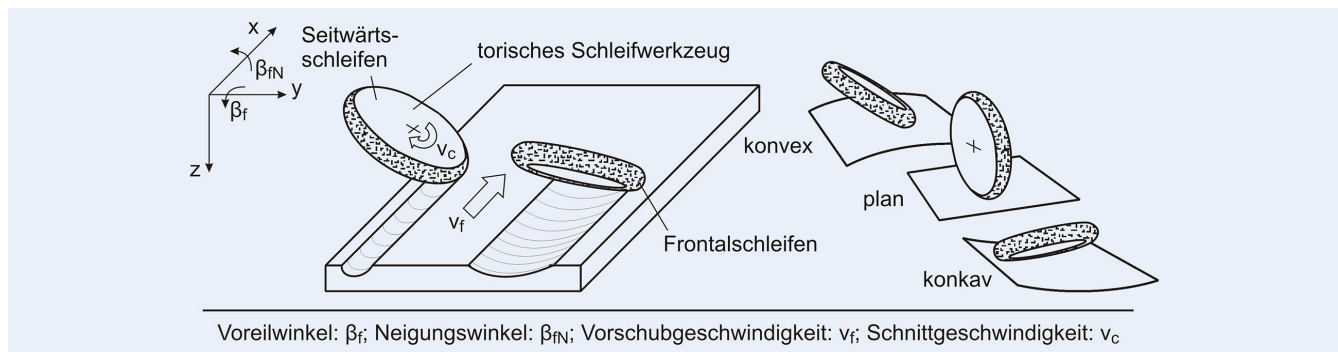


Bild 1. Seitwärts- und Frontalschleifen mit torischen Werkzeugen. Bild: IFW/Beh65769

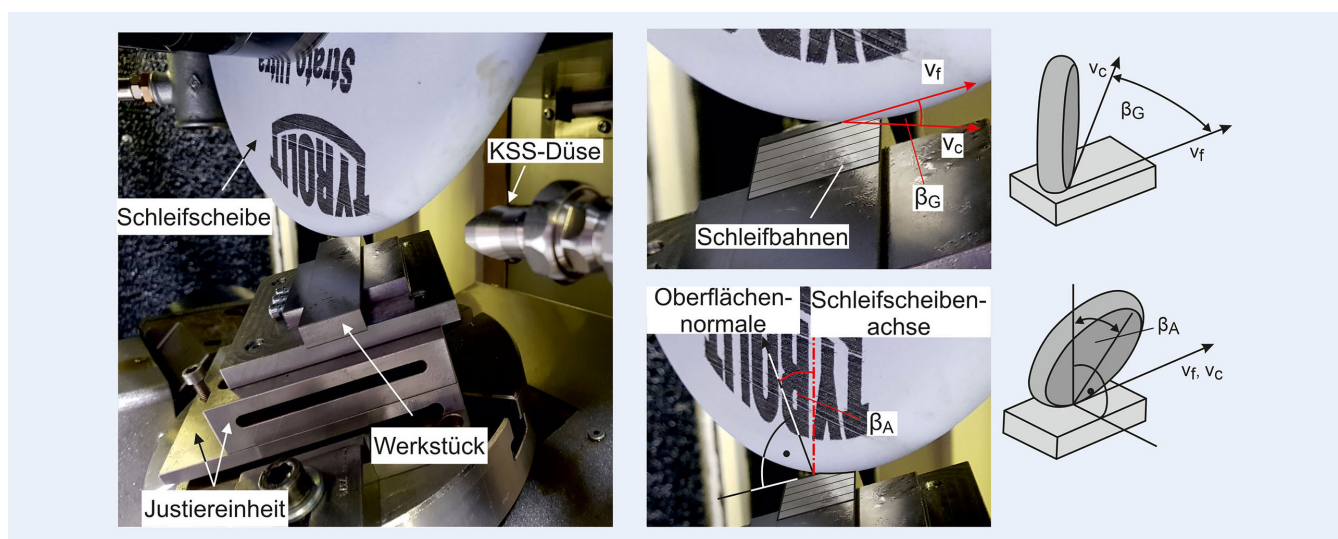


Bild 2. Versuchsaufbau. Bild: IFW/Wi92327

Verschleiß auf der Schleifscheibe auftritt und dieser aufgrund der geänderten Werkzeuggeometrie einen Formfehler am Werkstück hervorruft [11].

Neuartige Weiterentwicklungen dieses Formschleifprozesses mit torischen Werkzeugen sind im Sonderforschungsbereich SFB 599 „Zukunftsfähige, bioresorbierbare und permanente Implantate aus metallischen und keramischen Werkstoffen“ und dem SFB 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover (LUH) erfolgt. Im SFB 599 wurden die Hauptmechanismen der Oberflächenausprägung beim Schleifen untersucht. Hierbei wurde sowohl die Verwendung von Seitwärts- als auch Frontalschleifstrategien bei der Bearbeitung keramischer Knieimplantate untersucht. Das torische Schleifwerkzeug wird dabei gezielt orthogonal zur Vorschubrichtung v_f durch den Neigungswinkel β_{fN} (Seitwärtsschleifen) oder in Vorschubrichtung durch den Voreilwinkel β_f (Frontalschleifen) angestellt (Bild 1). Das Seitwärtsschleifen eignet sich besonders zur Bearbeitung von Kavitäten mit kleinen Radien. Demgegenüber steht das Frontalschleifen, das durch den Einsatz des Torushaupttringradius ein Schleifen mit hohem Zeitspanvolumen an weniger gekrümmten Oberflächensegmenten ermöglicht.

Durch die Kombination dieser beiden Schleifstrategien ist eine flexible Anpassung des Werkzeugeingriffs an komplex geformten Oberflächen und somit die Bearbeitung mit einem maximalen

Zeitspanvolumen bei Einhaltung geforderter Bauteilqualitäten möglich [2, 7]. Die dabei auftretenden technologischen Auswirkungen wurden für Fräsprozesse bereits ermittelt und zeigen variierende Prozesskräfte und richtungsabhängige Oberflächenrauheiten in Abhängigkeit der Werkzeuganstellwinkel [12, 13].

Im AIF-geförderten Forschungsprojekt Opti5Grind werden diese Aspekte durch das Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover nun technologisch für das Schleifen erforscht und steuerungstechnisch durch die Haas Schleifmaschinen GmbH umgesetzt.

2 Versuchsaufbau

Die bisher üblichen Bearbeitungswinkel des Voreilwinkels β_f im Frontalschleifen und des Neigungswinkels β_{fN} im Seitwärtsschleifen (Bild 1) sind für die folgenden Untersuchungen ungeeignet, da sie beide den Winkel zwischen der Schleifscheibe und der Werkstückoberfläche beschreiben. Sie unterscheiden sich dabei lediglich durch den eingesetzten Prozess. Weiterhin ist derzeit kein Winkel zwischen dem Frontal- und Seitwärtsschleifen definiert. Um den Bearbeitungswinkel für die folgenden Untersuchungen jederzeit eindeutig zu identifizieren, werden der Anstellwinkel β_A und der Gierwinkel β_G eingeführt. Der Anstellwinkel wird als Winkel zwischen der Aufrechtachse der Schleifscheibe und der Oberflächennormalen der Schleifscheibe definiert (Bild 2, unten). So ist der Anstellwinkel für alle Bearbeitungs-

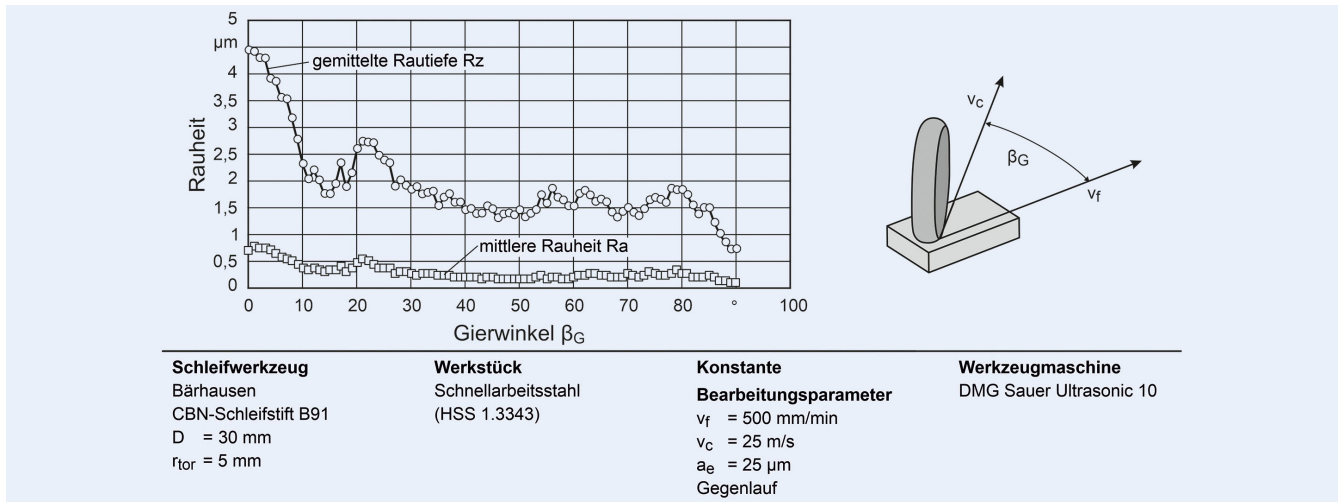


Bild 3. Ergebnis der Voruntersuchung zum Einfluss des Gierwinkels auf die Oberflächenrauheit. Bild: IFW/Wi92323

winkel zwischen Seitwärts- und Frontalschleifen fest definiert. Der Gierwinkel hingegen wird zwischen den Vektoren der Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit definiert. Durch diese beiden Winkel können jegliche Kontaktbedingung mit dem Werkstück beschrieben werden. Hauptaugenmerk liegt für dieses Projekt auf der Oberflächenqualität der bearbeiteten Werkstücke. Dazu werden zunächst winkeldiskrete Voruntersuchungen für beide Winkel von jeweils $\beta_G/\beta_A = 0^\circ$ bis 90° durchgeführt und die geschliffenen Oberflächen in Bezug auf ihre Rauheit untersucht.

3 Ergebnisse

Die Voruntersuchungen werden auf einer Sauer „Ultrasonic 10“ mit keramisch gebundenen CBN-Schleifstiften ($D = 30$ mm, $r_{\text{tor}} = 5$ mm, B91) durchgeführt. Es wurden jeweils sechs Schleifbahnen pro Bearbeitungswinkel mit einem Versatz von je 1 mm geschliffen, um eine normgerechte Auswertung der Flächen zu ermöglichen. Dabei wurde festgestellt, dass der Anstellwinkel über den gesamten Winkelbereich einen untergeordneten Einfluss auf die Oberflächenqualität hat. Die Rauheit steigt über Anstellwinkel von $0^\circ < \beta_A \leq 79^\circ$ geringfügig und linear von $Rz = 3,5 \mu\text{m}$ auf $Rz = 4,0 \mu\text{m}$ und linear an. Hierzu ist zu bemerken, dass die Untersuchungen bis zu einem Anstellwinkel von $\beta_A = 79^\circ$ durchgeführt wurden, da bei einem höheren Anstellwinkel und der gewählten Zustellung von $a_e = 100 \mu\text{m}$ die nicht abgerichtete Stirnfläche der Schleifscheibe ebenfalls an der Materialtrennung beteiligt wäre und die Ergebnisse beeinflussen würde.

Im Gegensatz dazu zeigen die analysierten Oberflächen der Werkstücke, die unter variierendem Gierwinkel bearbeitet wurden, einige Auffälligkeiten und klare Abhängigkeiten, die im Verlauf dieses Beitrags näher erläutert werden. **Bild 3** zeigt zum einen, dass zwischen Seitwärtsschleifen mit $\beta_G = 0^\circ$ und Frontalschleifen mit $\beta_G = 90^\circ$ die Oberflächenrauheit um 80 % abnimmt. Zum anderen wird deutlich, dass bereits ein Gierwinkel von $\beta_G = 16^\circ$ zu einer Verringerung der gemittelten Rautiefe Rz um 60 % führt. Weiterhin ist ein Winkelbereich zwischen $30^\circ < \beta_G \leq 80^\circ$ erkennbar, über den sich die Rauheit nicht signifikant ändert. Zwischen $16^\circ < \beta_G \leq 30^\circ$ steigt sie ($\beta_{G,\text{max}} = 24^\circ$) noch einmal an, bevor sie bei $\beta_G = 30^\circ$ das beschriebene Plateau erreicht, das einer Verbesserung der Oberflächenrauheit von etwa 70 % entspricht. Die Kontinuität der Ergebnisse zeigt, dass dieser

Effekt trotz lediglich einfacher Versuchswiederholung nicht auf Ausreißer der Messung zurückzuführen sind. Ursache der variierenden Rauheit mit dem Gierwinkel ist die unterschiedliche Anzahl von Körnern, die an der Zerspaltung beteiligt sind. Dieser Effekt wird später genauer beschrieben.

Um die Skalierbarkeit der Ergebnisse zu belegen, werden die weiteren schleiftechnologischen Untersuchungen auf einer Blohm Profimat 407 MC durchgeführt. Die verwendeten Schleifscheiben der Tyrolit Swarowski Schleifmittelwerke KG haben dabei einen Hauptdurchmesser von $D = 350$ mm und einen Torusradius von $r_{\text{tor}} = 10$ mm. Sie sind damit mehr als zehnmals so groß wie die zuvor verwendeten Schleifstifte und verfügen über einen doppelt so großen Torusradius. Es handelt sich um keramisch gebundene Sinterkorund-Schleifscheiben der Strato-Ultra-Reihe. Aus den Ergebnissen der Voruntersuchung werden für die Hauptuntersuchungen zehn diskrete Gierwinkel ausgewählt, die charakteristische Punkte des in **Bild 3** dargestellten Verlaufes repräsentativ abbilden.

In **Bild 4** ist der Vergleich der ersten Versuchsreihe mit den Voruntersuchungen abgebildet. Zur Visualisierung des Dimensionsunterschieds der verwendeten Werkzeuge sind diese gemeinsam auf der rechten Seite abgebildet. Es ist ersichtlich, dass das zuvor beschriebene lokale Rauheitsmaximum (LRM) in Abhängigkeit des Gierwinkels unabhängig von den Werkzeugspezifikationen und der verwendeten Werkzeugmaschine auftritt. Bei der verwendeten Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 25$ m/s und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 500$ mm/min steigt die Rauheit der bearbeiteten Flächen nach einem Abfall über geringere Gierwinkel, bei einem Gierwinkel von $\beta_G = 20^\circ$ sprunghaft an, bleibt über einen gewissen Gierwinkelbereich erhöht und fällt erst ab einem Gierwinkel von $\beta_G = 50^\circ$ wieder unter den bei $\beta_G = 15^\circ$ erreichten Wert.

Wie bereits bei den Voruntersuchungen angedeutet, ist dieser Effekt vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Variation des Gierwinkels dazu führt, dass tiefe Riefen einzelner exponierter Körner durch nachfolgende Körner überschleift werden. Durch die Verwendung eines Gierwinkels sind also mehr Schleifkörner an der Oberflächenentstehung beteiligt. Das lokale Rauheitsmaximum bei $\beta_G = 20^\circ$ ist hierbei darauf zurückzuführen, dass, abhängig von den Prozessstellgrößen Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit, ein kritischer Gierwinkel existiert, an dem diese Riefen

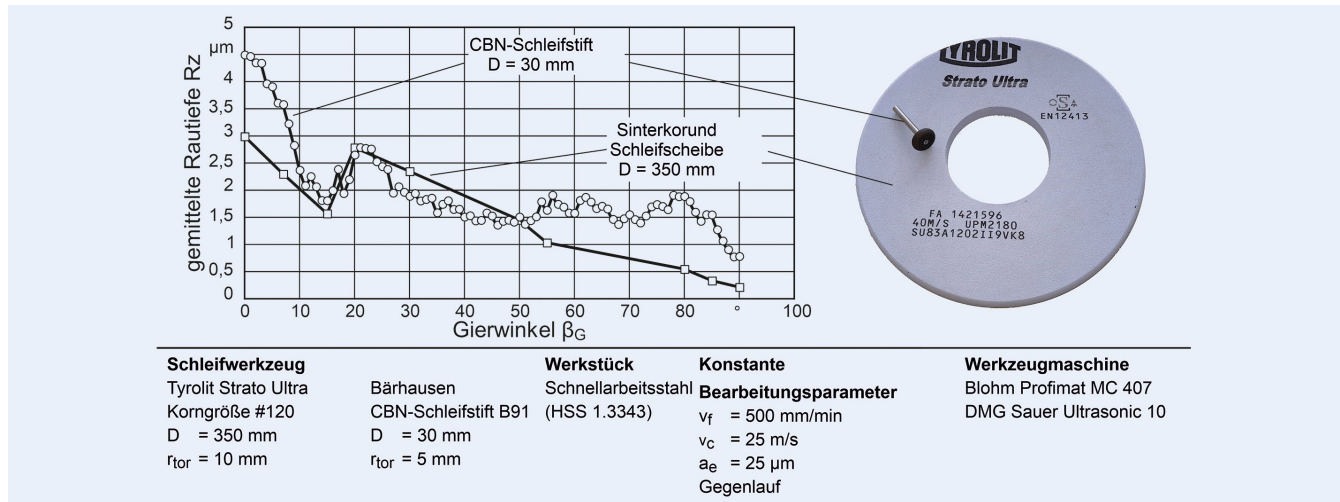


Bild 4. Vergleich der Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Werkzeugen und Maschinen. Bild: IFW/Wi92322

wieder von weniger Körnern überschleift werden. Dies konnte bereits in Ansätzen analytisch nachgewiesen werden und wird aktuell validiert.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen den Einfluss des Gierwinkels auf die Oberflächenrauheit. Diese fällt über die untersuchten Winkel zwischen Seitwärts- und Frontalschleifen zwar insgesamt ab, weist aber ein lokales Rauheitsmaximum bei einem Bearbeitungswinkel von $\beta_G = 20^\circ$ auf. Dieses Maximum konnte in zwei unterschiedlichen Prozessen bei konstanten Prozessstellgrößen allerdings unter Verwendung unterschiedlicher Werkzeugmaschinen, Kühlmedien, Kornarten und -größen bestätigt werden. Dieses Maximum wird folglich primär durch die Prozessstellgrößen gesteuert. In folgenden Untersuchungen wird nun der Einfluss dieser Größen auf die Ausprägung und den korrespondierenden Winkeln näher betrachtet.

[3] Jain, V. K.: Abrasive – Based Nano-Finishing Techniques: An Overview. *Machining Science and Technology* 12 (2008) 3, pp. 257–294

[4] Denkena, B.; Tönshoff, H. K.: *Spanen – Grundlagen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 2011

[5] Hahmann D. et. al.: Zukunft technischer Keramik bleibt von der Hartbearbeitung abhängig. *Maschinenmarkt* (2010) Heft 43, S. 48–49

[6] Hegener, G.: *Technologische Grundlagen des Hochleistungs-Außenrund-Formschleifens*. Dissertation, RWTH Aachen, 1999

[7] Denkena, B.; de Leon, L.; Turger, A.; Behrens, L.: Prediction of contact conditions and theoretical roughness in manufacturing of complex implants by toric grinding tools. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, Volume 50 (2010) Issue 7, pp. 630–636, 2010

[8] Denkena, B., de Leon, L.; Behrens, L.: Contact Conditions in 5-Axis-Grinding of Double Curved Surfaces with Toric Grinding Wheels. *Advanced Materials Research*, Volumes 126–128 (2010) pp. 41–46

[9] Zander, M.: *Potentiale beim Mehrachs-Fräsen mit Toruswerkzeugen im Formenbau*. Dissertation, RWTH Aachen, 1995

[10] Jansen, T.: *Entwicklung einer Simulation für den NC-Formschleifprozess mit Torusschleifscheiben*. Dissertation, TU Dortmund, 2007

[11] 5-Achs-Simultanschleifen von optischen Funktionsflächen. Internet: www.diamond-business.de; 2016. Zugriff am 15.06.2020

[12] Kruth, J.P., Klewais, P.: Optimization and Dynamic Adaptation of the Cutter Inclination during Five-Axis Milling of Sculptured Surfaces. *Annals of the CIRP*, Volume 43 (1994) pp. 443–448

[13] Neugebauer, R., et al.: High productive finishing operation of sculptured surfaces, 2nd International CIRP Conference on Design and Production of Dies and Molds, June, 21–23, 2001, Kusadasi. ISBN: 975–429167–5

DANKSAGUNG

Die dargestellten Untersuchungen wurden innerhalb des Forschungsvorhabens ZF4070508PO7 „Innovatives 5-Achs-Schleifen von Freiformflächen“ im Rahmen des Programms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZiM)“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.



Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena
Bild: IFW

Dipl.-Ing. Alexander Krödel

Michael Wilckens, M.Sc.

Institut für Fertigungstechnik
und Werkzeugmaschinen (IFW)
Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2, D-30823 Garbsen
Tel. +49 (0)511 / 762-5940
wilckens@ifw.uni-hannover.de
www.ifw.uni-hannover.de

Literatur

[1] Böß, V.: *Werkzeugwege für das Bandschleifen von Freiformflächen*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2007

[2] Denkena, B.; van der Meer, M.: Diamond Tools for the Grinding of Complex Implant Surfaces. *Advanced Material Research*, 76–78 (2009), pp. 33–37