

## Effizienzsteigerung durch Einsatz eines Industrieroboters beim Fliehkraftgleitschleifen

# Oberflächenfinishing additiv gefertigter Bauteile

E. Uhlmann, M. Kopp, R. Kröger

Der Beitrag stellt das Fliehkraftgleitschleifen mit fixiertem Werkstück zur Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile vor. Mit diesem Verfahren konnte die Rauheit von Werkstücken aus Ti6Al4V in einem zweistufigen Prozess in einer Gesamtprozesszeit von 30 min von  $R_a = 17,5 \mu\text{m}$  auf  $R_a < 0,3 \mu\text{m}$  reduziert werden. Infolge der Werkstückfixierung ergab sich jedoch eine ungleichmäßige Bearbeitung der Werkstückoberflächen und -kanten. Für eine gleichmäßige Bearbeitung ist daher eine geeignete Werkstückführung erforderlich.

### STICHWÖRTER

Feinbearbeitung, Industrieroboter, Additive Fertigung

## 1 Einleitung

Additive Fertigungsverfahren wie das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen (LPBF) erlauben die wirtschaftliche Herstellung von individualisierten, strukturoptimierten und funktionsintegrierten Bauteilen, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder nur unter hohem Aufwand hergestellt werden können. Wegen der verfahrensbedingt hohen Rauheit LPBF-gefertigter Bauteile müssen diese in der Regel nachbearbeitet werden, um die mechanischen und tribologischen Eigenschaften des Bauteils zu verbessern [1–3]. Dabei kommen auch Gleitschleifverfahren zum Einsatz [4–6]. Aufgrund der geringen Zeitspannungsvolumina  $Q_w$  von Gleitschleifverfahren bei gleichzeitig hoher Rauheit der Bauteile resultieren beim weit verbreiteten Vibrationsgleitschleifen allerdings lange Prozesszeit  $t_p$ . So wird beispielsweise von einer Prozesszeit von  $t_p = 48 \text{ h}$  berichtet, um die Rauheit von additiv gefertigten Werkstücken aus Ti6Al4V durch Vibrationsgleitschleifen von einem arithmetischen Mittelwert der Profilordnaten von  $R_a = 17,9 \mu\text{m}$  auf  $R_a = 0,9 \mu\text{m}$  zu reduzieren [4].

Durch den Einsatz hochenergetischer Gleitschleifverfahren wie dem Fliehkraftgleitschleifen können die Prozesszeiten  $t_p$  erheblich reduziert werden. So wurde durch Fliehkraftgleitschleifen die Rauheit von additiv gefertigten Werkstücken aus Ti6Al4V innerhalb einer Prozesszeit von  $t_p = 2 \text{ h}$  von  $R_a = 17,9 \mu\text{m}$  auf  $R_a = 2,1 \mu\text{m}$  verringert [7]. Beim konventionellen Fliehkraftgleitschleifen werden die Werkstücke frei beweglich innerhalb der Schleifkörperschüttung bearbeitet. Eine hohe Geschwindigkeit des Drehtellers, über den die Schleifkörper und die Werkstückbewegungen induziert werden, sowie der Einsatz von Schleif-

## Surface finishing of additively manufactured components – Increased efficiency using an industrial robot in centrifugal disc finishing

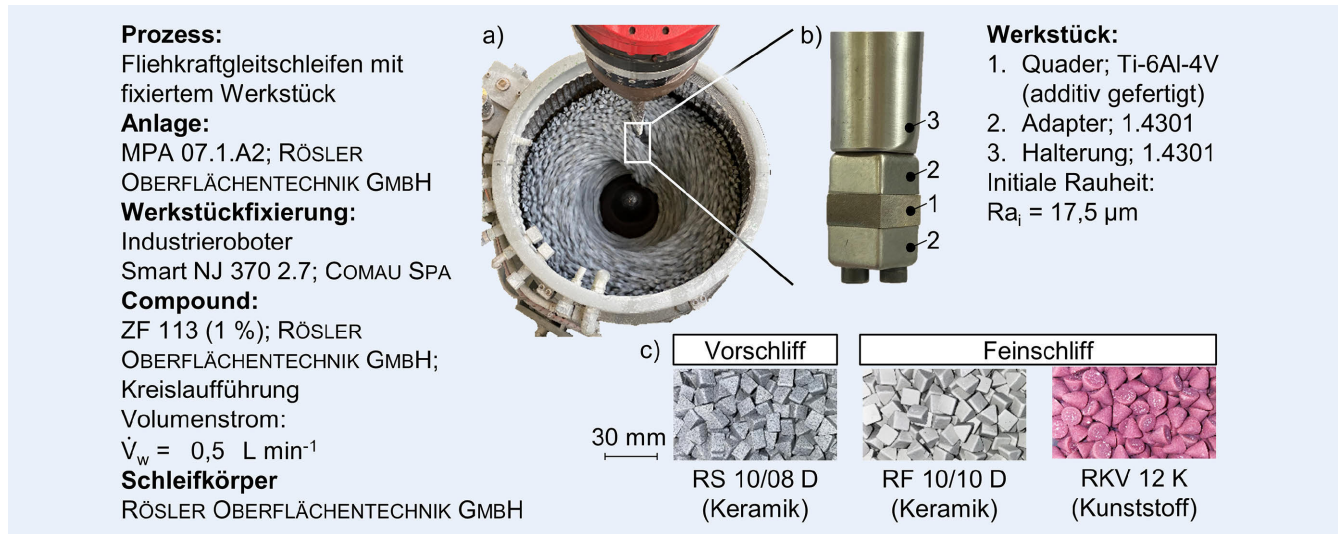
This paper presents centrifugal disc finishing with a fixed workpiece for the postprocessing of additively manufactured components. This method reduces the roughness of workpieces made of Ti6Al4V from  $R_a = 17.5 \mu\text{m}$  to  $R_a < 0.3 \mu\text{m}$  in a two-stage process in a total processing time of 30 min. However, the fixation of the workpiece resulted in heterogenous machining of the surfaces and edges. Therefore, a suitable workpiece guidance is required for homogenous machining.

körpern mit einer hohen Anzahl von Ecken und Kanten begünstigen dabei die Rate der Rauheitsreduzierung [7, 8].

Im Vergleich zum konventionellen Fliehkraftgleitschleifen kann die Rate der Rauheitsreduzierung durch eine Fixierung des Werkstücks im Arbeitsbehälter um ein Vielfaches erhöht werden, wie in Untersuchungen mit zylindrischen Bauteilen aus C45 (1.0503) mit einer initialen Rauheit von  $R_a = 3,5 \mu\text{m}$  gezeigt wurde [9]. Die Rate der Rauheitsreduzierung ist umso höher, je näher das Werkstück im Bereich des Drehtellers positioniert ist [9], da hier die höchsten Schleifkörpergeschwindigkeiten und somit die höchsten Bearbeitungskräfte vorliegen [10, 11]. Aufgrund der hohen Bearbeitungskräfte ist die erreichbare Rauheit allerdings größer als beim konventionellen Fliehkraftgleitschleifen mit frei beweglichen Werkstücken [9].

Auf Grundlage der Untersuchungen mit gedrehten Bauteilen aus C45 [9] soll das Fliehkraftgleitschleifen mit fixiertem Werkstück an additiv gefertigten Werkstücken aus Ti6Al4V erprobt werden. Neben der Tellerdrehzahl  $n_t$  und der Eintauchtiefe des Werkstücks  $z_w$  wird auch die Orientierung des Werkstücks  $\phi_w$  im Bezug zur Schleifkörperbewegung untersucht, da zu erwarten ist, dass diese die Bearbeitungsergebnisse beeinflussen.

Beim Gleitschleifen steht eine hohes Zeitspannungsvolumen  $Q_w$  im Zielkonflikt mit dem Erreichen einer geringen Rauheit [12]. Soll an einem Werkstück viel Material getrennt werden, beispielsweise aufgrund einer starken Gratbehaftung oder ausgeprägten Rauheitsspitzen, und gleichzeitig eine geringe Rauheit erzielt werden, so ist der Einsatz mehrstufiger Bearbeitungsprozess üblich [12, 13]. Daher soll in diesen Untersuchungen die Anwendung einer zweistufigen Bearbeitung erprobt werden. In einer ersten Prozessstufe mit hohem Zeitspannungsvolumen  $Q_w$  (Vorschleif)



**Bild 1.** Versuchsbedingungen: a) Gleitschleifanlage; b) Werkstück; c) Schleifkörper. Grafik: IWF

soll zunächst der Kernbereich der Oberfläche freigelegt werden. Anschließend soll in einer zweiten Prozessstufe eine geringe Rauheit erzeugt werden (Feinschleif). Das Ziel ist, einen zeiteffizienten zweistufigen Prozess zur Oberflächenbearbeitung additiv gefertigter Bauteile abzuleiten.

## 2 Versuchsbedingungen und Messmethoden

Die Bearbeitungsversuche wurden mit einer Tellerfliehkraft-Gleitschleifanlage des Typs „MPA 07.1 A2“ der Firma Rösler Oberflächentechnik GmbH mit einem maximalen Innendurchmesser von  $d_i = 500 \text{ mm}$ , einem Arbeitsvolumen von  $V_a = 54 \text{ L}$  sowie einer maximalen Tellerdrehzahl von  $n_t = 168 \text{ min}^{-1}$  durchgeführt (Bild 1 a).

Für die Prozessspülung wurde das universelle Reinigungsmittel mit Korrosionsschutz „ZF 113“ der Firma Rösler Oberflächentechnik GmbH eingesetzt, das in einem Verhältnis von 1:100 mit Wasser verdünnt ist und mit einem Volumenstrom von  $\dot{V}_c = 0,5 \text{ L min}^{-1}$  in einer Kreislaufführung dem Bearbeitungsprozess hinzugefügt wird. Die Werkstücke wurden in Form länglicher Quader mit einer Grundfläche von  $A_w = 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  in einem einzelnen Fertigungsprozess mittels LPBF mit der Anlage „RenAM 500Q HT“, Renishaw PLC, aus Ti6Al4V hergestellt. Anschließend erfolgte ein Trennen der einzelnen Werkstücke auf die Maße  $V_w = 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  mittels Drahterodieren. Für die Fixierung des Werkstücks wurde der 6-Achs-Industrieroboter „Smart NJ 3702.7“ der Firma Comau Spa eingesetzt, an dem die Werkstücke mit einer Halterung befestigt sind (Bild 1b). Zwecks Abstandshaltung zum Werkstückhalter sowie zum Schutz vor starker Kantenverrundung an den Stirnseiten wurden an die Werkstücke Adapter aus Edelstahl 1.4301 geschraubt (Bild 1b). Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Bearbeitung durch die Werkstückhalterung beeinflusst wird [9]. Da die Halterung in allen Versuchen identisch war, ist eine vergleichende Betrachtung der Bearbeitungsergebnisse dennoch möglich.

Im Vorschleif wurde der prismenförmige Keramiksleifkörper „RS 10/08 D“ eingesetzt (Bild 1c). Diese Schleifkörperspezifikation hat einen volumetrischen Anteil an Abrasivmittel von  $K_k = 12 \%$  [14] und bietet so beim Fliehkraftgleitschleifen einen

angemessenen Kompromiss aus Materialabtrennung am Werkstück und Eigenverschleiß [15]. Im Feinschleif wurden einerseits der prismenförmige Keramiksleifkörper „RF 10/10 D“ ohne Abrasivmittel und andererseits der kegelförmige Kunststoffschleifkörper „RKV 12 K“ eingesetzt. Da der Schleifkörper RF 10/10 D kein Abrasivmittel enthält, kann mit diesem eine geringe Rauheit erzeugt werden [16]. Gleiches gilt für den Schleifkörper RKV 12 K, der aufgrund der Kunststoffbindung nachgiebiger ist als Keramiksleifkörper, sodass eine schonende Bearbeitung von Werkstücken möglich ist [12].

Die Messung der Rauheit erfolgte mit dem Tastschnittgerät „Surftest SJ210“ der Firma Mitutoyo Deutschland GmbH unter Anwendung eines Tastspitzenradius von  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$ , einer Grenzwellenlänge von  $\lambda_c = 2,5 \text{ mm}$  und einer Messstrecke von  $l_n = 12,5 \text{ mm}$ . Die Kantenprofilinien der Werkstücke wurden mit einem Linienlaser „LJX8020“ der Firma Keyence Deutschland GmbH erfasst.

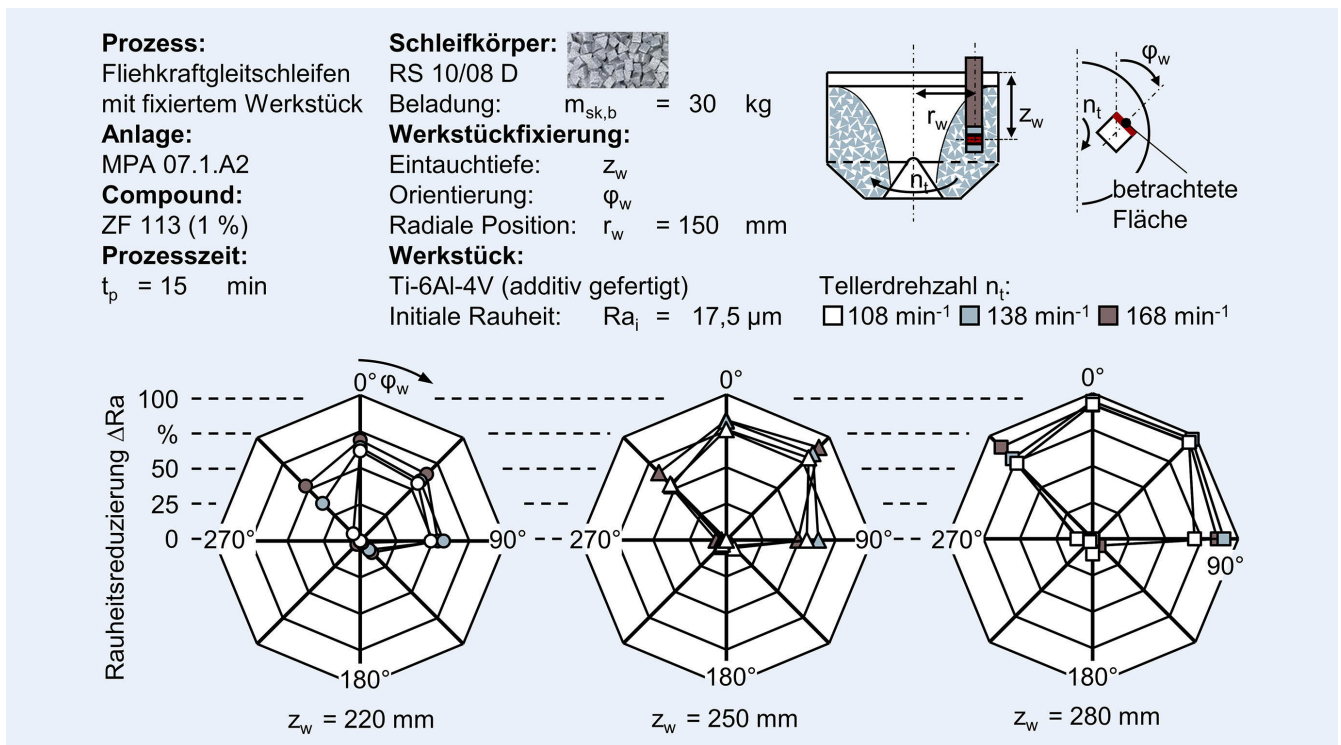
## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Rauheitsreduzierung im Vorschleif

Die Bearbeitungsversuche wurden mit zwei Werkstückstellungen durchgeführt. In der ersten Stellung wiesen die vier Flächen des Werkstücks die Orientierungen  $\varphi_w = 0^\circ$ ,  $\varphi_w = 90^\circ$ ,  $\varphi_w = 180^\circ$  und  $\varphi_w = 270^\circ$  auf. In der zweiten Stellung wurde das Werkstück um  $45^\circ$  rotiert, sodass die Orientierungen der Flächen  $\varphi_w = 45^\circ$ ,  $\varphi_w = 135^\circ$ ,  $\varphi_w = 225^\circ$  und  $\varphi_w = 315^\circ$  resultierten. Bei allen Eintauchtiefen  $z_w$  und Tellerdrehzahlen  $n_t$  wiesen die Flächen mit den Orientierungen  $\varphi_w = 0^\circ$ ,  $\varphi_w = 45^\circ$  und  $\varphi_w = 315^\circ$ , welche der Schleifkörperbewegung zugewandt waren, hohe Rauheitsreduzierungen  $\Delta Ra$  auf (Bild 2).

Dies kann auf die teilweise frontale Anströmung der Flächen durch die Schleifkörper zurückgeführt werden, wodurch hohe Kontaktkräfte auf die Flächen ausgeübt werden. Im Gegensatz dazu fand an den Flächen mit den Orientierungen  $\varphi_w = 135^\circ$ ,  $\varphi_w = 180^\circ$  und  $\varphi_w = 225^\circ$ , welche der Schleifkörperbewegung abgewandt waren und somit im Strömungsschatten des Werkstücks standen, keine Bearbeitung statt (Bild 2).

Weiterhin ist festzustellen, dass die Fläche mit der Orientierung  $\varphi_w = 90^\circ$ , welche in Richtung der Behälterwand gerichtet



**Bild 2.** Rauheitsreduzierung in Abhängigkeit der Orientierung der zu bearbeitenden Fläche  $\varphi_w$ . Grafik: IWF

war, bei allen Eintauchtiefen  $z_w$  und Tellerdrehzahlen  $n_t$  ebenfalls stark bearbeitet wurde. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Behälterwand einen Strömungswiderstand darstellt. Im Bereich zwischen dem Werkstück und der Behälterwand entstand somit ein hoher Staudruck in der Schleifkörperschüttung. Dadurch wurden auf die Werkstückflächen, die der Behälterwand zugewandt waren, hohe Kräfte ausgeübt. Im Gegensatz dazu konnten die Schleifkörper, die sich entlang der nach innen gerichteten Werkstückflächen bewegen, ohne Widerstand ins Behälterinnere ausweichen, sodass auf diese Flächen nur geringe Kräfte ausgeübt wurden. Daher erfuhr die Fläche mit der Orientierung  $\varphi_w = 270^\circ$  keine Bearbeitung. Durch den erhöhten Staudruck durch die Behälterwand lässt sich auch die erhöhte Rauheitsreduzierung  $\Delta Ra$  an der Fläche mit der Orientierung  $\varphi_w = 45^\circ$  im Vergleich zur Fläche mit der Orientierung  $\varphi_w = 315^\circ$  erklären.

Im Folgenden werden nur die Bearbeitungsergebnisse der Oberfläche mit der Orientierung  $\varphi_w = 45^\circ$  betrachtet, weil bei dieser die effizienteste Bearbeitung realisiert werden konnte. Die Rauheit nimmt an dieser Fläche bis zu einer Prozesszeit von  $t_p = 15 \text{ min}$  bei allen Prozessparameterkombinationen kontinuierlich ab (**Bild 3a**).

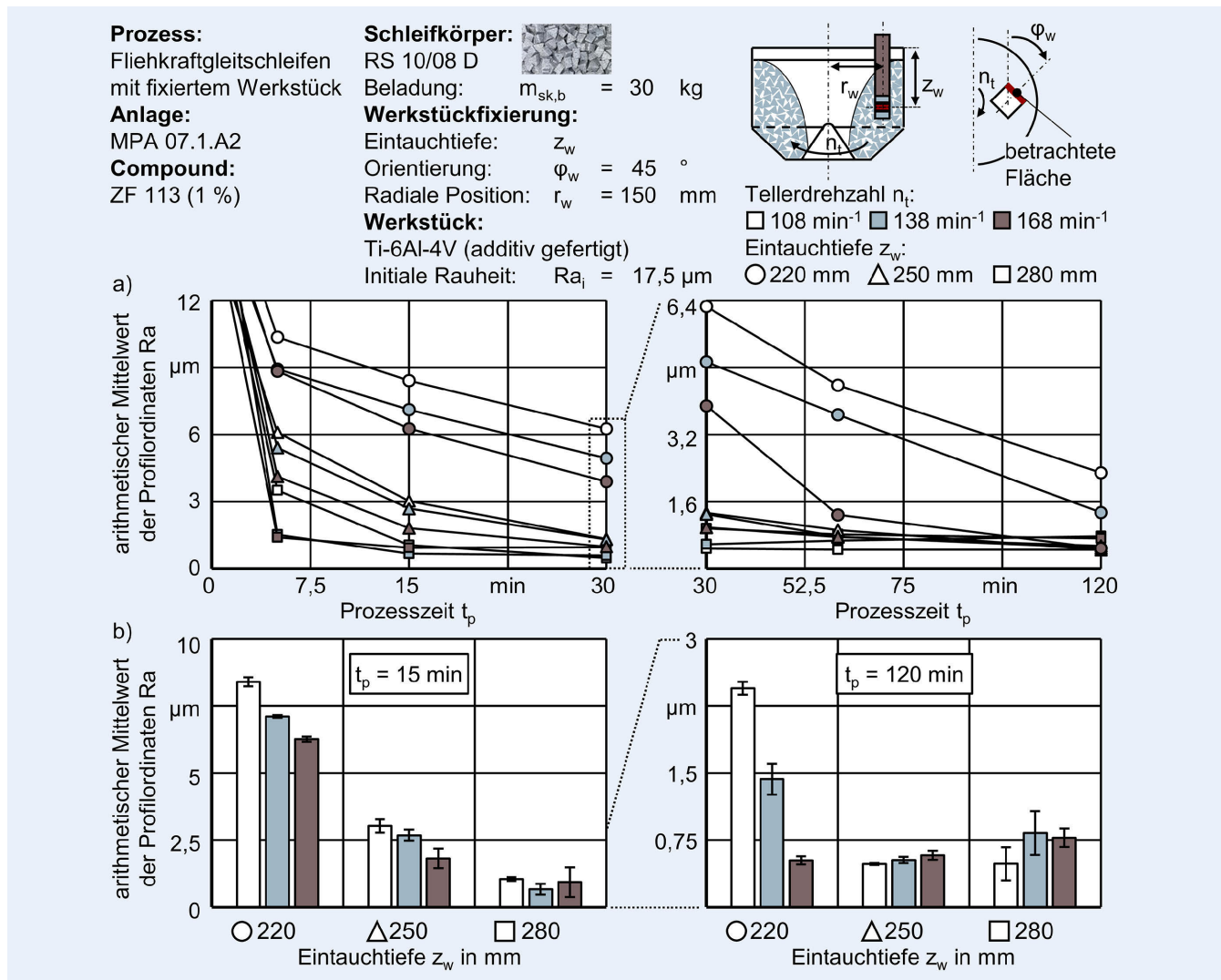
Die Rate der Rauheitsreduzierung wurde dabei wesentlich von der Eintauchtiefe des Werkstücks  $z_w$  beeinflusst. So lag nach einer Prozesszeit von  $t_p = 15 \text{ min}$  bei der geringsten Eintauchtiefe  $z_w = 220 \text{ mm}$  eine Rauheit von  $Ra = 6,3$  bis  $8,4 \mu\text{m}$  vor. Bei der mittleren und größten Eintauchtiefe  $z_w = 250$  und  $280 \text{ mm}$  betrug die Rauheit zu dieser Prozesszeit  $t_p$   $Ra = 1,8$  bis  $3,0 \mu\text{m}$  beziehungsweise  $Ra = 0,9$  bis  $1,1 \mu\text{m}$  (**Bild 3b**).

Der Einfluss der Eintauchtiefe  $z_w$  steht dabei im Einklang mit Ergebnissen aus vorherigen Untersuchungen [9] und kann auf die Beschleunigung der Schleifkörper durch den Drehteller am Boden des Arbeitsbehälters zurückgeführt werden. In der Nähe des Drehtellers liegen folglich die höchsten Schleifkörper-

geschwindigkeiten vor und somit – bei einer Fixierung des Werkstücks in diesem Bereich – die höchsten Relativgeschwindigkeiten sowie die höchsten Kontaktkräfte zwischen dem Werkstück und den Schleifkörpern [10, 11]. Daraus resultiert ein hohes Zeitspannungsvolumen  $Q_w$  am Werkstück, was bei Werkstücken mit hoher initialer Rauheit eine hohe Rate der Rauheitsreduzierung zur Folge hat. Die Relativgeschwindigkeiten und damit auch die Kontaktkräfte steigen zudem bei einer Erhöhung der Tellerdrehzahl  $n_t$ . Neben einer Steigerung der Eintauchtiefe  $z_w$  erhöht sich die Rate der Rauheitsreduzierung daher auch mit zunehmender Tellerdrehzahl  $n_t$ . Bis zu einer Prozesszeit von  $t_p = 30 \text{ min}$  wurde die Rauheit bei der geringsten und mittleren Eintauchtiefe  $z_w = 220$  und  $250 \text{ mm}$  weiterhin deutlich auf  $Ra = 3,9$  bis  $6,3 \mu\text{m}$  beziehungsweise auf  $Ra = 1,0$  bis  $1,3 \mu\text{m}$  reduziert (**Bild 3a**).

Im Gegensatz dazu änderte sich die Rauheit bei der größten Eintauchtiefe  $z_w = 280 \text{ mm}$  bis zu einer Prozesszeit von  $t_p = 30 \text{ min}$  nur noch geringfügig auf  $Ra = 0,5$  bis  $1,0 \mu\text{m}$ . Bei dieser Eintauchtiefe  $z_w$  stagnierte die Rauheit im weiteren Verlauf der Bearbeitung (**Bild 3a**). Auch bei der mittleren Eintauchtiefe  $z_w = 250 \text{ mm}$  änderte sich die Rauheit ab einer Prozesszeit von  $t_p = 60 \text{ min}$  nur noch geringfügig, wohingegen bei der geringsten Eintauchtiefe  $z_w = 220 \text{ mm}$  bei einer Prozesszeit von  $t_p = 120 \text{ min}$  weiterhin eine Abnahme der Rauheit zu erkennen war (**Bild 3a**).

Nach einer Prozesszeit von  $t_p = 120 \text{ min}$  lagen bei der mittleren Eintauchtiefe  $z_w = 250 \text{ mm}$  Rauheiten von  $Ra = 0,45$  bis  $0,54 \mu\text{m}$  vor (**Bild 3b**). Durchschnittlich waren die Rauheiten damit um 24% geringer als bei der größten Eintauchtiefe  $z_w = 280 \text{ mm}$ , bei der Rauheiten von  $Ra = 0,45$  bis  $0,78 \mu\text{m}$  vorlagen. Hierdurch wird der Zielkonflikt zwischen einem hohen Zeitspannungsvolumen  $Q_w$  und einer geringen Grenzrauheit  $Ra_g$  deutlich: Eine große Eintauchtiefe  $z_w$  hat einen Anstieg der Kontaktkräfte zwischen dem Werkstück und den Schleifkörpern zur



**Bild 3.** Rauheitsreduzierung im Vorschleiff: a) Rauheit in Abhängigkeit der Prozesszeit  $t_p$  bei variierenden Prozessparametern; b) Vergleich der erreichten Rauheit nach unterschiedlichen Prozesszeiten  $t_p$  bei variierenden Prozessparametern. Grafik: IWF

Folge, wodurch die Eindringtiefe der Schleifkörper in das Werkstückmaterial steigt [8]. Dadurch steigt das Zeitspannungsvolumen  $Q_w$  und die Profilspitzen werden effektiv getrennt, was sich in einer hohen Rate der Rauheitsreduzierung äußert. Sobald allerdings der Kernbereich der Oberfläche freigelegt ist, sorgen die hohen Eindringtiefen der Schleifkörper für eine fortwährende Zerklüftung der Werkstückoberfläche, was erhöhte Grenzrauheiten  $Ra_g$  zur Folge hat. Derselbe Effekt ist bei der Tellerdrehzahl  $n_t$  festzustellen: Eine hohe Tellerdrehzahl  $n_t$  führt zunächst zu einer hohen Rate der Rauheitsreduzierung. Sobald allerdings der Kernbereich der Oberfläche freigelegt ist, führt eine hohe Tellerdrehzahl  $n_t$  zu erhöhten Grenzrauheiten  $Ra_g$ . Dies war bei der mittleren und größten Eintauchtiefe  $z_w = 250$  und  $280$  mm nach einer Prozesszeit von  $t_p = 120$  min anhand der in Abhängigkeit der Tellerdrehzahl  $n_t$  ansteigenden Rauheiten zu erkennen (Bild 3b). Dieser Effekt konnte bei der geringsten Eintauchtiefe  $z_w = 220$  mm nicht beobachtet werden, da die Grenzrauheit  $Ra_g$  nach einer Prozesszeit von  $t_p = 120$  min nicht erreicht wurde.

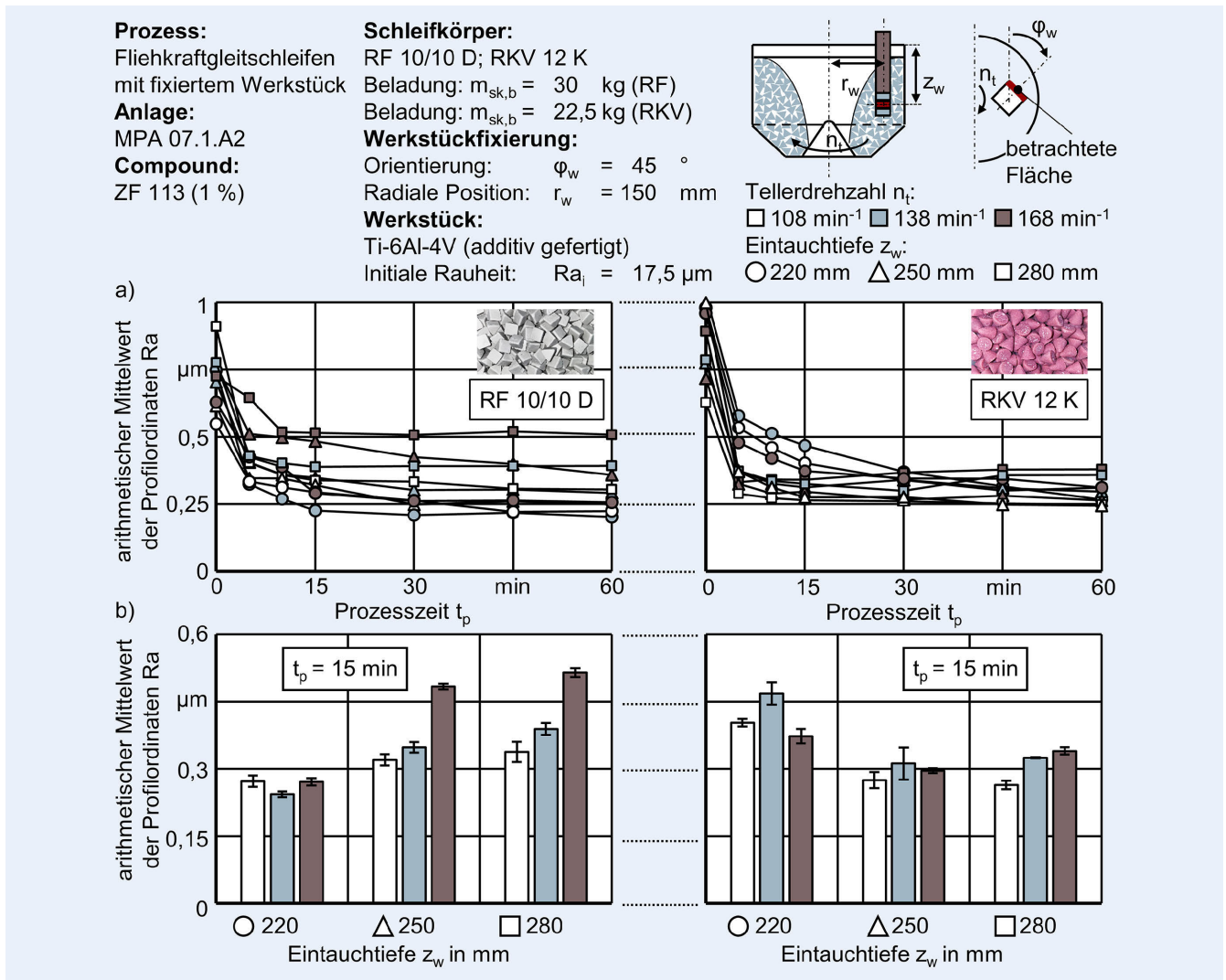
Als Kompromiss zwischen erreichbarer Rauheit und aufgewandter Prozesszeit  $t_p$  wurde für den Vorschleiff eine Prozesszeit

von  $t_p = 15$  min festgelegt. Bei dieser wird mit  $Ra = 0,67$   $\mu\text{m}$  die geringste Rauheit bei einer Eintauchtiefe von  $z_w = 280$  mm und einer Tellerdrehzahl von  $n_t = 138$   $\text{min}^{-1}$  erreicht (Bild 3). Alle weiteren Werkstücke wurden daher im Vorschleiff mit dieser Prozessparameterkombination bearbeitet.

### 3.2 Rauheitsreduzierung im Feinsleiff

Im Feinsleiff konnte die Rauheit sowohl mit dem Keramikschleifkörper RF 10/10 D als auch mit dem Kunststoffschleifkörper RKV 12 K weiterhin deutlich reduziert werden (Bild 4a).

Die Rauheitsreduzierung fand bei beiden Schleifkörpern vor allem bis zu einer Prozesszeit von  $t_p = 15$  min statt. Bei dieser Prozesszeit lag bei dem Keramikschleifkörper RF 10/10 D die geringste Rauheit mit  $Ra = 0,24$  bis  $0,27$   $\mu\text{m}$  bei der geringsten Eintauchtiefe  $z_w = 220$  mm vor (Bild 4b). Mit Zunahme der Eintauchtiefe  $z_w$  stieg die erreichte Rauheit auf  $Ra = 0,32$  bis  $0,48$   $\mu\text{m}$  bei der mittleren Eintauchtiefe  $z_w = 250$  mm und auf  $Ra = 0,34$  bis  $0,52$   $\mu\text{m}$  bei der größten Eintauchtiefe  $z_w = 280$  mm. Wie auch beim Vorschleiffen kann dies auf die stei-



**Bild 4.** Rauheitsreduzierung im Feinschliff: a) Rauheit in Abhängigkeit der Prozesszeit  $t_p$  bei variierenden Prozessparametern; b) Vergleich der erreichten Rauheit nach einer Prozesszeit von  $t_p = 15$  min bei variierenden Prozessparametern. Grafik: IWF

genden Kontaktkräfte und die damit einhergehende Zerklüftung der Oberfläche zurückgeführt werden. Da diese Schleifkörperspezifikation allerdings kein Abrasivmittel enthielt, ist die Bearbeitung der Werkstückoberfläche allein auf das Bindungsmaterial zurückzuführen. Bei den Eintauchtiefen  $z_w = 250$  mm und 280 mm stieg die erreichte Rauheit mit Zunahme der Tellerdrehzahl  $n_t$ , wohingegen bei der geringsten Eintauchtiefe  $z_w = 220$  mm kein eindeutiger Einfluss der Tellerdrehzahl  $n_t$  auf die erreichte Rauheit zu erkennen war. Denkbar ist, dass der Einfluss der Tellerdrehzahl  $n_t$  umso stärker ist je höher die Eintauchtiefe  $z_w$  ist, da vor allem die Geschwindigkeit der Schleifkörper im Bereich nahe des Drehtellers durch die Tellerdrehzahl  $n_t$  beeinflusst wird [10].

Beim Kunststoffschleifkörper RKV 12 K lag nach einer Prozesszeit von  $t_p = 15$  min die höchste Rauheit mit  $Ra = 0,37$  bis  $0,46$   $\mu\text{m}$  bei der geringsten Eintauchtiefe  $z_w = 220$  mm vor (Bild 4b). Anders als beim Keramikschleifkörper RF 10/10 D führte eine Erhöhung der Eintauchtiefe  $z_w$  zu einer Verringerung der erreichten Rauheit. Diese betrug bei der mittleren Eintauchtiefe  $z_w = 250$  mm  $Ra = 0,28$  bis  $0,31$   $\mu\text{m}$  und bei der größten Eintauchtiefe  $z_w = 280$  mm  $Ra = 0,26$  bis  $0,34$   $\mu\text{m}$ . Denkbar ist,

dass aufgrund der erhöhten Nachgiebigkeit der Kunststoffschleifkörper im Vergleich zu den Keramikschleifkörpern trotz hoher Eintauchtiefen  $z_w$  keine hohen Kontaktkräfte zwischen den Schleifkörpern und dem Werkstück entstehen, sondern die Kontaktenergie durch elastische Verformung der Schleifkörper dissipiert. Eine Zerklüftung der Werkstückoberfläche infolge hoher Kontaktkräfte erfolgte somit nicht. Wie auch beim Keramikschleifkörper RF 10/10 D ist bei der geringsten Eintauchtiefe  $z_w = 220$  mm kein eindeutiger Einfluss der Tellerdrehzahl  $n_t$  ersichtlich, wohingegen bei der größten Eintauchtiefe  $z_w = 280$  mm die erreichte Rauheit mit steigender Tellerdrehzahl  $n_t$  zunimmt. Erneut kann geschlussfolgert werden, dass der Einfluss der Tellerdrehzahl  $n_t$  umso stärker ist, je höher die Eintauchtiefe  $z_w$  ist.

### 3.3 Kantenverrundung im Gesamtprozess

Nach dem 15-minütigen Vorschleiff mit dem Schleifkörper RS 08/10 D bei einer Eintauchtiefe von  $z_w = 280$  mm und einer Tellerdrehzahl von  $n_t = 138$   $\text{min}^{-1}$  sowie nach dem 15-minütigen Feinschliff mit dem Schleifkörper RF 10/10 D bei einer Ein-

**Prozess:**

Fliehkraftgleitschleifen mit  
fixiertem Werkstück

**Anlage:**

MPA 07.1.A2

**Compound:**

ZF 113 (1 %)

**Werkstück:**

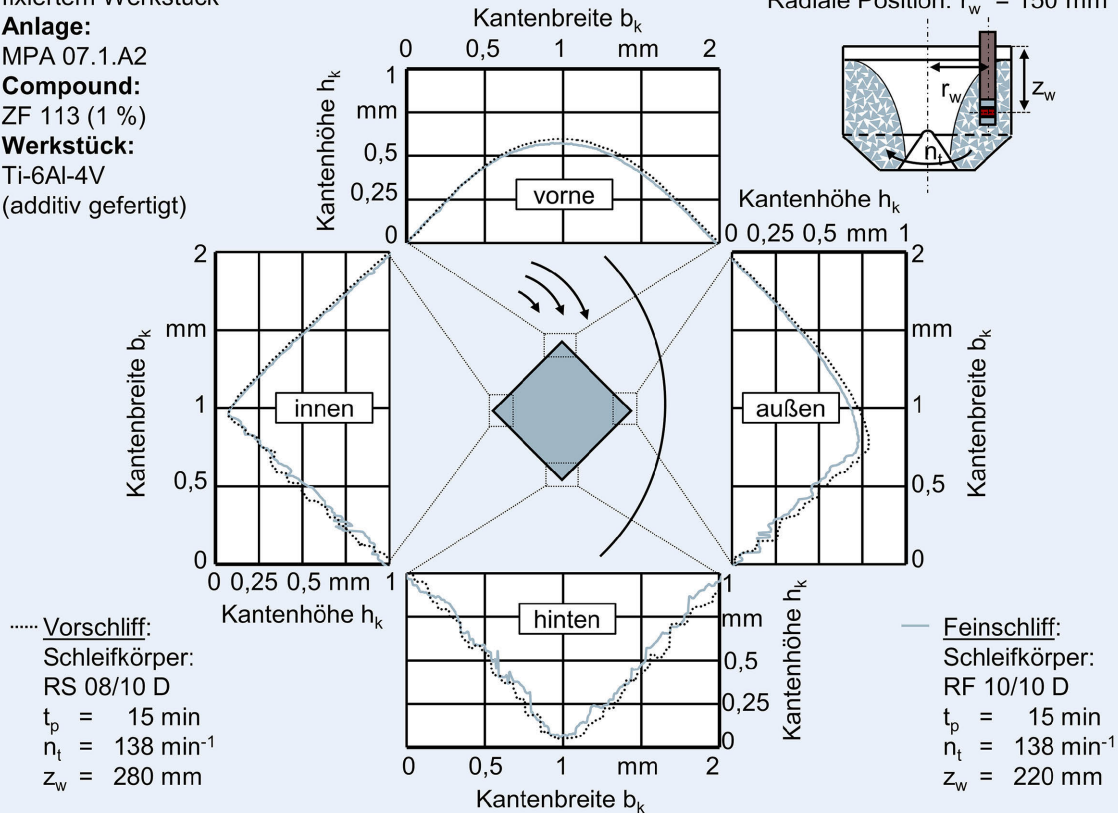
Ti-6Al-4V

(additiv gefertigt)

**Werkstückfixierung:**

Orientierung:  $\varphi_w = 45^\circ$

Radiale Position:  $r_w = 150 \text{ mm}$



**Bild 5.** Kantenverrundung am Werkstück nach einer Gesamtprozesszeit von  $t_p = 30 \text{ min}$ . Grafik: IWF

tauchtiefe von  $z_w = 220 \text{ mm}$  und einer Tellerdrehzahl von  $n_t = 138 \text{ min}^{-1}$  wurden die Kantenverrundungen am Werkstück evaluiert (Bild 5).

Dabei ist festzustellen, dass sich die Kantenverrundung im Feinschleif nur noch geringfügig ändert. Der wesentliche Anteil der Kantenverrundung entsteht folglich im Vorschleif. Die Stärke und Form der Verrundung der vier Werkstückkanten ist dabei von deren Lage abhängig: Bei der nach vorne gerichteten Kante, die frontal von den Schleifkörpern angeströmt wird, lag eine starke aber gleichmäßige Kantenverrundung mit einem Kantenradius von  $r_k = 0,85 \text{ mm}$  vor. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass additiv gefertigte Bauteile in der Regel endkonturnahe gefertigt werden, könnte die vorliegende Kantenverrundung eine unzulässige Formabweichung darstellen, die in der Prozessauslegung berücksichtigt werden sollte.

Aufgrund der einseitigen Anströmung der Schleifkörper bildete sich bei der nach außen gerichteten Kante eine trompetenförmige Verrundung aus. Selbiges war bei der nach innen gerichteten Kante zu beobachten, allerdings war die Kantenverrundung hier geringer ausgeprägt als bei der nach außen gerichteten Kante. Wie auch bei der Rauheitsreduzierung (Bild 2) kann dies auf den Einfluss der Behälterwand zurückgeführt werden. Die nach hinten gerichtete Kante befindet sich im Strömungsschatten des Werkstücks. Hier findet keine Bearbeitung der Kante statt, was insbesondere an dem noch ausgeprägten Rauheitsprofil an den Flanken der Kante zu erkennen ist.

## 4 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Beitrag wurde das Fliehkraftgleitschleifen mit fixiertem Werkstück vorgestellt. Die Rauheit von additiv gefertigten Ti6Al4V-Werkstücken konnte in einem 15-minütigen Vorschleif von  $R_a = 17,5 \mu\text{m}$  auf  $R_a = 0,7 \mu\text{m}$  und anschließend in einem 15-minütigen Feinschleif auf  $R_a < 0,3 \mu\text{m}$  reduziert werden. Im Vorschleif konnte durch eine große Eintauchtiefe des Werkstücks  $z_w$  sowie durch eine hohe Tellerdrehzahl  $n_t$  eine schnelle Rauheitsreduzierung erzielt werden. Allerdings liegt dadurch eine erhöhte Grenzrauheit  $R_{a_g}$  vor. Im Feinschleif konnte mit dem Keramiksleifkörper ohne Abrasivmittel die geringste Rauheit bei geringer Eintauchtiefe des Werkstücks  $z_w$  erreicht werden, wogegen die geringste Rauheit mit dem Kunststoffsleifkörper bei mittlerer und großer Eintauchtiefe  $z_w$  erzielt wurde. Ein wesentlicher Unterschied in der erreichten Grenzrauheit  $R_{a_g}$  lag zwischen den beiden Schleifkörpern jedoch nicht vor.

Die erforderliche Prozesszeit zur Rauheitsreduzierung war erheblich geringer als beim Fliehkraftgleitschleifen mit frei beweglichen Werkstücken, bei dem nach einer Prozesszeit von  $t_p = 120 \text{ min}$  die Rauheit maximal von  $R_a = 17,9 \mu\text{m}$  auf  $R_a = 2,1 \mu\text{m}$  reduziert werden konnte [7]. Diese Rauheit wird beim Fliehkraftgleitschleifen mit fixiertem Werkstück bereits nach einer Prozesszeit von  $t_p = 5 \text{ min}$  unterschritten. Dem Vorteil der geringen Prozesszeit  $t_p$  steht allerdings eine ungleichmäßige Bearbeitung von Werkstückflächen und -kanten gegenüber. Für eine gleichmäßige Bearbeitung ist daher ein erhöhter Auf-

wand in der Prozessauslegung erforderlich, etwa durch eine geeignete Bahnplanung des verwendeten Industrieroboters.

Zudem ist hervorzuheben, dass beim Fliehkraftgleitschleifen mit fixiertem Werkstück – anders als bei der Bearbeitung mit frei beweglichen Werkstücken – eine gleichzeitige Bearbeitung einer Vielzahl von Werkstücken nicht möglich ist. Das vorgestellte Fliehkraftgleitschleifen mit fixiertem Werkstück könnte daher insbesondere für die Bearbeitung von hochwertigen Bauteilen in geringen Stückzahlen wirtschaftlich eingesetzt werden.

## FÖRDERHINWEIS

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Projektnummer 460895790 („Nachbearbeitung additiv gefertigter Werkstücke mittels Fliehkraftgleitschleifen“).

## DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei Rösler Oberflächentechnik GmbH, Untermerzbach, für die Bereitstellung von Gleitschleifkörpern.

## Literatur

- [1] Kahlin, M.; Ansell, H.; Kerwin, A. et al.: Variable amplitude loading of additively manufactured Ti6Al4V subjected to surface post processes. *International Journal of Fatigue* 142 (2021) 6, #105945
- [2] Kaynak, Y.; Tascioglu, E.: Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing* 5 (2020) 2, pp. 221 – 234
- [3] Gerlitzky, G.: Einfluss des Post-Processings auf laserstrahlgeschmolzene Bauteile am Beispiel von  $\beta$ -Titanlegierungen. Dissertation, TU Berlin, 2021
- [4] Bagehorn, S.; Wehr, J.; Maier, H. J.: Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts. *International Journal of Fatigue* 102 (2017) 10, pp. 135 – 142
- [5] Atzeni, E.; Balestrucci, A.; Catalano, A. R. et al.: Performance assessment of a vibro-finishing technology for additively manufactured components. *Procedia CIRP* 88 (2020), pp. 427 – 432
- [6] Boschetto, A.; Bottini, L.; Macera, L. et al.: Post-Processing of Complex SLM Parts by Barrel Finishing. *Applied Sciences* 10 (2020) 4, #1382
- [7] Kopp, M.; Uhlmann, E.: Prediction of the Roughness Reduction in Centrifugal Disc Finishing of Additive Manufactured Parts Based on Discrete Element Method. *Machines* 10 (2022) 12, #1151
- [8] Kopp, M.; Uhlmann, E.; Kneider, C.: Experimental investigations of the workpiece-media-interaction and the surface topography formation in centrifugal disc finishing. *Procedia CIRP* 115 (2022) 12, pp. 24–29
- [9] Kopp, M.; Uhlmann, E.: Potential of Robot-Guided Centrifugal Disc Finishing. In: Behrens, B.-A.; Brosius, A.; Drossel, W.-G. et al. (Hrsg.): *Production at the Leading Edge of Technology*. Cham: Springer International Publishing 2022, pp. 283–291
- [10] Sutowski, P.; Plichta, J.; Kalduński, P.: Determining kinetic energy distribution of the working medium in a centrifugal disc finishing process—part 1: theoretical and numerical analysis with DEM method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 104 (2019) 1 – 4, pp. 1345–1355
- [11] Matsumoto, Y.; Yamaguchi, T.; Kitajima, K. et al.: Study on the Flow Pressure of Mass in Centrifugal Disc Finishing. *Advanced Materials Research* 1017 (2014), pp. 559 – 564
- [12] Prüller, H.: *Praxiswissen Gleitschleifen. Leitfaden für die Produktionsplanung und Prozessoptimierung*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2018
- [13] Hinz, H. E.: *Gleitschlifftchnik. Grundlagen, Anlagen, Chips, Compounds, Verfahren, Abwasser, Kosten*. Ehningen bei Böblingen: Expert Verlag 1988
- [14] Eulitz, A.: *Einsatzverhalten keramisch gebundener Gleitschleifkörper*. Dissertation, TU Berlin, 2021
- [15] Uhlmann, E.; Kopp, M.; Braun, T.: Einfluss des Schleifköperverschleißes beim Fliehkraftgleitschleifen additiv gefertigter Ti5553 Werkstücke. In: Hoffmeister, H.-W.; Denkena, B. (Hrsg.): *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren*. Essen: Vulkan Verlag 2022, S. 61–77
- [16] Uhlmann, E.; Eulitz, A.: Influence of ceramic media composition on material removal in vibratory finishing. *Procedia CIRP* 72 (2018), pp. 1445–1450



Prof. Dr.-Ing. **Eckart Uhlmann**

Foto: Fraunhofer IPK

Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK  
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin  
eckart.uhlmann@ipk.fraunhofer.de  
www.ipk.fraunhofer.de



**Marco Kopp**, M.Sc.

Foto: IWF

**Robin Kröger**, B.Sc.

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF), Technische Universität Berlin  
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin  
Tel. +49 30 / 314-23624  
kopp@iwf.tu-berlin.de  
www.iwf.tu-berlin.de

## LIZENZ



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