

Einfluss der Eingriffsbedingungen von komplexen Werkzeugen auf die Oberflächenausbildung

Gratbildung beim 5-Achs-Fräsen

B. Denkena, B. Bergmann, M. Keitel

ZUSAMMENFASSUNG Im Werkzeug- und Formenbau spielen komplexe Bauteile mit Freiformflächen eine zentrale Rolle, die meist durch spanende Fertigungsverfahren, insbesondere das 5-Achs-Fräsen, hergestellt werden. Sphärische Werkzeuge, wie beispielsweise Kugelkopffräser, bieten dabei eine hohe Profiltreue und geringe Oberflächenrauheit, führen aber zu einer verstärkten Gratbildung. Der Gratbildung kann durch gezielte Prozessstellgrößen entgegengewirkt werden. Um dies umzusetzen, zeigt der Beitrag die Zusammenhänge zwischen den Prozesseinstellgrößen und der Gratbildung auf.

Burr formation during 5-axis end milling

ABSTRACT Complex components with free-form surfaces are a key part of tool and mold making, usually produced by machining, in particular 5-axis milling. Spherical tools, such as ball-end mills, offer high profile accuracy and low surface roughness, though leading to more burr formation. However, burr formation can be counteracted by specific process parameters. This article shows how to achieve this, presenting the relationships between process parameters and burr formation.

STICHWÖRTER

Feinbearbeitung, Fräsen, Werkzeug-/Formenbau

1 Einleitung

Im Werkzeug- und Formenbau werden oft Bauteile gefertigt, die zu den komplexen und kostenintensiven Investitionsgütern zählen. Dabei handelt es sich zumeist um Bauteile mit komplexen Geometrien, wie Freiformflächen, die vollständig oder teilweise durch spanende Fertigung hergestellt werden. Um die Anforderungen der Bauteile an Form- und Maßhaltigkeit sowie Oberflächenqualität sicherzustellen, stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. So ist das Fräsen beispielsweise das Hauptfertigungsverfahren für Freiformflächen von Spritzgießwerkzeugen [1]. Das 5-Achs-Fräsen mit sphärischen Werkzeugen, wie Kugelkopffräsern oder Kreissegmentfräsern, ist besonders für die spanende Bearbeitung von gekrümmten oder doppelt gekrümmten Oberflächengeometrien geeignet. Dabei eignen sich sphärische Werkzeuge im Gegensatz zu Schaftfräsern aufgrund ihrer hohen Profiltreue für die Schlichtbearbeitung geometrisch komplexer Oberflächen [2]. Außerdem zeichnet sich das Kugelkopffräsen, ebenso wie das Fräsen mit Kreissegmentfräsern, durch eine geringe Oberflächenrauheit aus. Dies ist beispielsweise bei Turbineschaufeln von besonderer Bedeutung, da bereits geringe Änderungen in der Oberflächenrauheit zu signifikanten Leistungsverlusten führen [3].

Jedoch treten je nach Geometrie der Freiformfläche wechselseitige Kontaktbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück auf, wodurch die spanende Oberflächengenerierung nicht gleichmäßig auf dem Werkstück stattfindet. Die Folge ist eine ungleichmäßige Oberflächentopographie oder eine Gestaltabweichung. Neben hoher Geometriegenauigkeit und einer geringen Oberflächen-

rauheit wird zum Beispiel bei Bauteilen für die Luft- und Raumfahrt, aber auch bei Spritzgieß- und Umformwerkzeugen, häufig ein Druckeigenspannungszustand gefordert, um einer möglichen Rissinitiierung im Betrieb entgegenzuwirken und somit die Lebensdauer eines komplexen Investitionsgutes zu erhöhen.

So zeigten Denkena *et al.* für das Fräsen von Titanlegierungen, dass Druckeigenspannungen durch eine gezielte Schneidkantenverrundung zwischen 15–30 µm eingestellt werden können [4]. Dies geht jedoch mit höheren Prozesskräften aufgrund von Ploughing-Effekten einher. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Wahrscheinlichkeit der Gratbildung zunimmt [5–7]. Dies kann auf eine veränderte Mindestspanungsdicke h_{min} infolge größerer Schneidkantenverrundungen zurückgeführt werden, die für die Materialtrennung beziehungsweise die Spanbildung nötig ist [8]. Eine Folge der Unterschreitung der Mindestspanungsdicke ist das vermehrte Auftreten von Grat auf der Bauteiloberfläche.

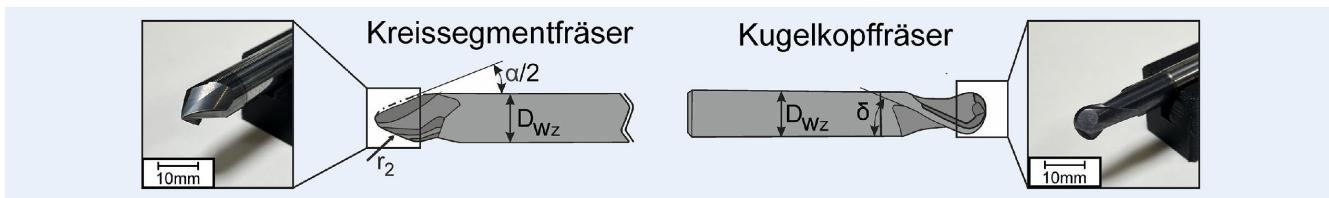
Beim Kugelkopffräsen steigt die Spanungsdicke über den Eingriffsboden an, bis die für die Spanbildung notige Mindestspanungsdicke h_{min} erreicht wird [9]. In Bereichen, in denen die Mindestspanungsdicke unterschritten wird, kann es zur Gratbildung auf der Bauteiloberfläche kommen. Dies kann die Oberflächengüte des Bauteils in einen nicht anforderungsgerechten Bereich herabsetzen und Nachbearbeitung erfordern [10]. Daher ist die gezielte Steuerung der Gratbildung bei Schlichtprozessen von wesentlicher Bedeutung. Dennoch ist diese Steuerung der Gratbildung beim Kugelkopffräsen nach wie vor eine Herausforderung, da die Gratbildung nicht nur von den Prozessstellgrößen, sondern auch vom Werkstoff, der Werkzeuggeometrie

Tabelle 1. Spezifikationen der Versuchswerkzeuge.

Werkzeug	Durchmesser $D_{J,J}$	Zähnezahl $z_{J,J}$	Drallwinkel δ	Radius [mm]	Schneidkantenmikrogeometrie \bar{S}
Kugelkopf (KK)	10 mm	2	30°	5	15 / 30 µm
Kreissegment (KS)	12 mm	3	0°	200	15 µm

Tabelle 2. Chemische Zusammensetzung des Versuchswerkstoffs 1.2379.

[wt-%]	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P	V	Fe
1.2379	1,50	0,31	0,27	12,82	0,74	0,01	0,03	0,70	Rest

**Bild 1** Kreissegmentfräser – Kugelkopffräser. Grafik: IFW / Emuge Franken

und der Prozesskinematik abhängt [11]. Zudem ist bei der Verwendung von Kugelkopffräsern zu beachten, dass sowohl die Schnittgeschwindigkeit v_c als auch die Spanungsdicke h in Abhängigkeit vom Durchmesser variieren. So liegt im Bereich des TCP (tool center point) eine relative Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 0 \text{ m/min}$ vor, wodurch in diesem Punkt keine Materialtrennung erfolgt. Es kommt zur plastischen Verformung.

Neben den weit verbreiteten Kugelkopffräsern können komplexe Freiformflächen auch mit Kreissegmentfräsern, auch Tonnenfräser genannt, bearbeitet werden. Diese zeichnen sich vor allem durch einen großen Radius im Schneidenbereich aus, der ein Segment eines Kreises abbildet. Durch die großen Radien können die Bahndistanzen vergrößert werden und somit eine Produktivitätssteigerung bewirken. Jedoch finden diese Art von Werkzeugen bisher nur geringe Verwendung in der Industrie.

Ganser führt dies auch auf schwankende Zerspanbarkeitskriterien, wie Prozesskräfte, und somit unregelmäßige Oberflächen zurück [12]. Ebenfalls zeigte Ganser in seinen Untersuchungen an unterschiedlichen Werkstoffen, dass durch die Verwendung von Kreissegmentfräsern neben der Produktivitätssteigerung auch eine verbesserte Oberflächenqualität erreicht werden kann. In den Untersuchungen wurde gezeigt, dass die generierten Oberflächen von den Prozesseinstellgrößen abhängig sind [12]. Gdula [13] und Marin [14] konnten bei der Bearbeitung und Simulation von Luftfahrtkomponenten aus Inconel 718 ebenfalls Einflüsse der Prozesseinstellgrößen auf die generierten Oberflächen identifizieren.

Insgesamt zeigen bisherige Untersuchungen, dass sowohl die Werkzeuggeometrie als auch die Prozesseinstellgrößen für die Oberflächengenerierung entscheidend sind. Einzelne Effekte sind zwar bekannt, doch die Zusammenhänge zwischen Prozessparametern, Werkzeuggeometrie und Oberflächenkrümmung in Bezug auf die Gratausbildung werden bislang nicht hinreichend verstanden. Dieses fehlende Verständnis erschwert eine zielgerichtete Prozessführung, da für eine gratafreie Oberflächenherstellung vor allem die Bahnplanung eine zentrale Rolle spielt. Dabei müssen zahlreiche Parameter und Einstellungen, wie etwa

der Voreilwinkel, berücksichtigt werden. Dafür ist es erforderlich, die Einflüsse der einzelnen Prozessstellgrößen sowie die Wechselwirkungen zwischen Oberflächenkrümmung und Werkzeuggeometrie systematisch zu untersuchen. Ziel der Arbeit ist es daher, den Einfluss des Voreilwinkels, des Zahnvorschubs, der werkzeugseitigen Schneidkantenmikrogeometrie sowie der Werkzeuggeometrie auf die Gratbildung bei unterschiedlich gekrümmten Oberflächen darzustellen.

2 Versuchstechnik

2.1 Versuchswerkstoff und Werkzeuge

Die Fräsuntersuchungen wurden zunächst mit beschichteten Hartmetall Kugelkopffräsern des Typs „1820A.010“ von Emuge Franken mit einer Zähnezahl $z_{KK} = 2$ und einem Durchmesser $D_{KK} = 10 \text{ mm}$ durchgeführt (**Bild 1, rechts**).

Zusätzlich wurden Kreissegmentfräser vom Typ „3540L.12200A“ (Emuge Franken) mit einer Zähnezahl $z_{KS} = 3$ und einem Durchmesser $D_{KS} = 12 \text{ mm}$ (**Bild 1, links**) eingesetzt. Der Kreissegmentfräser besitzt insgesamt drei Radien, wovon lediglich der Radius $r_2 = 200 \text{ mm}$ im Eingriff ist. Die Werkzeugspezifikationen sind in **Tabelle 1** aufgelistet.

Beide Werkzeuge besitzen eine TiAlN-PVD-Beschichtung. Als Werkzeugaufnahmen wurden „Präzisions-Spannhülsen-Aufnahmen FPC“ mit Wuchtgewinden in Kombination mit FPC-Spannhülsen der Firma Franken verwendet. Die resultierenden Oberflächen wurden mit den Oberflächen verglichen, die mit Kugelkopffräsern hergestellt wurden.

Als Versuchswerkstoff wurde ein Werkzeugstahl 1.2379 (X155CrVMo12-1 oder D2) mit einer Härte von 249 HV1 gewählt, da dieser im Bereich des Werkzeug- und Formenbaus weit verbreitet ist. Die chemische Zusammensetzung zeigt **Tabelle 2**.

2.2 Versuchsmaschine und Prozess

Die Untersuchungen wurden auf einem 5-Achs-Fräszentrum „HSC 55 Linear“ (DMG Mori) ohne Einsatz von Kühlshmier-

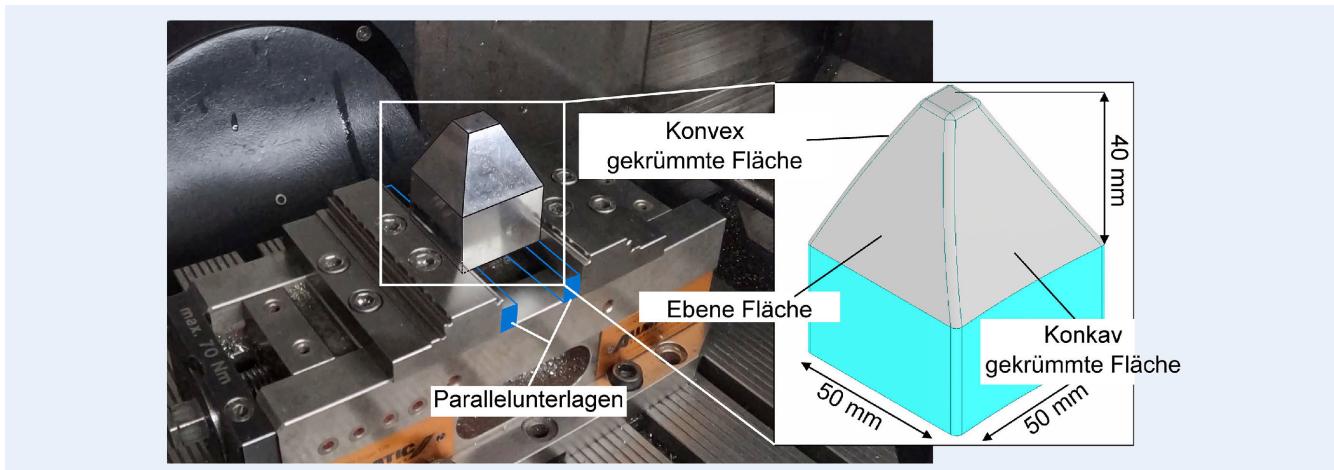


Bild 2 Versuchsaufbau (links) und Analogiebauteil (rechts). Foto/Grafik: IFW

Tabelle 3. Prozesseinstellgrößen

Werkzeug	Zahnvorschub f_z [mm]	Schneidkantenmikrogeometrie \bar{S} [μm]	Voreilwinkel λ [$^\circ$]	Zeilenbreite a_o [mm]
KK	0,05	15	15	0,5
KK	0,15	15	15	0,5
KK	0,15	15	45	0,5
KK	0,15	30	15	0,5
KS	0,05	15	15	5
KS	0,15	15	15	5

stoffen durchgeführt. Um die unterschiedlichen Eingriffsbedingungen bei der Bearbeitung von Freiformflächen abzubilden, wurde ein Analogiebauteil mit unterschiedlichen Oberflächengeometrien konstruiert.

Dabei handelte es sich um einen Pyramidenstumpf mit doppelt konkav und doppelt konvex gekrümmten Flächen sowie zwei ebenen Flächen. Der Versuchsaufbau und ein CAD-Modell des Analogiebauteils sind in **Bild 2** dargestellt.

Die verwendeten Prozesseinstellgrößen sind in **Tabelle 3** aufgeführt, wobei die Schnittgeschwindigkeit $v_c = 250 \text{ m/min}$, die Zustellung $a_p = 0,2 \text{ mm}$ und der Kippwinkel $\tau = 0^\circ$ konstant gehalten wurden.

Die in dieser Arbeit genutzten Winkel, Voreilwinkel λ und Kippwinkel τ , lehnen sich an die Notation von Camacho an [15]. Die resultierenden Werkzeugvektoren in Abhängigkeit von den eingestellten Winkeln sowie die darauf resultierenden Eingriffsbedingungen wurden von Nespor [16] und Mücke [6] für das Kugelkopffräsen bereits ausführlich beschrieben.

2.3 Analytikmethoden

Für die Bewertung der Gratbildung wurde eine Klassifizierung der Oberflächen anhand einer Einteilung in vier Gratklassen vorgenommen, wie sie von Mücke beschrieben wird [6]. Zur Veranschaulichung sind in **Bild 3** Mikroskopaufnahmen der unterschiedlichen Gratklassen dargestellt (Gratkasse 1: kein Grat, Gratkasse 2: schwacher Grat, Gratkasse 3: mittlerer Grat, Gratkasse 4: starker Grat).

Hierfür wurden mit einem Digitalmikroskop „VHX 5000“ von Keyence Aufnahmen der Oberflächen angefertigt und anschließend einer Gratklasse zugeordnet. Die Zuordnung erfolgte jeweils an drei unterschiedlichen Stellen an den Bearbeitungsflächen. Neben der subjektiven Einordnung in Gratklassen wurden dreidimensionale Oberflächenaufnahmen mit einem „DUO Vario“ der Confovis GmbH erstellt und anschließend mit der Software „MountainsMap“ von Digital Surf ausgewertet. Zur Beurteilung der Oberflächenqualität wurde die mittlere arithmetische Höhe Sa nach ISO 25718 genutzt.

2.4 Definition Grat

Mit Gratbildung wird meistens die makroskopische Gratbildung an den Kanten eines Werkstücks assoziiert. Jedoch kann Gratbildung auch auf der bearbeiteten Oberfläche auftreten. Beim Mikrostrukturieren beispielsweise tritt ebenfalls Gratbildung bei einzelnen Schneideneingriffen auf [10]. Dies kann ebenso auf das Kugelkopffräsen übertragen werden. Hierbei handelt es sich um plastisch verformtes Werkstoffvolumen, das nicht abgetragen wurde. Zumeist befindet sich der Grat auf oder entlang der Kämme einzelner Fräsbahnen [7]. Um ein Verständnis für die Klassifizierung der Gratbildung zu erhalten, sind in **Bild 4** unterschiedliche Oberflächentopographien für verschiedene Oberflächengeometrien und Schneidkantenmikrogeometrien dargestellt. Die Gratbildung entlang der Fräsbahnen ist in der unteren Bildmitte besonders gut zu erkennen.

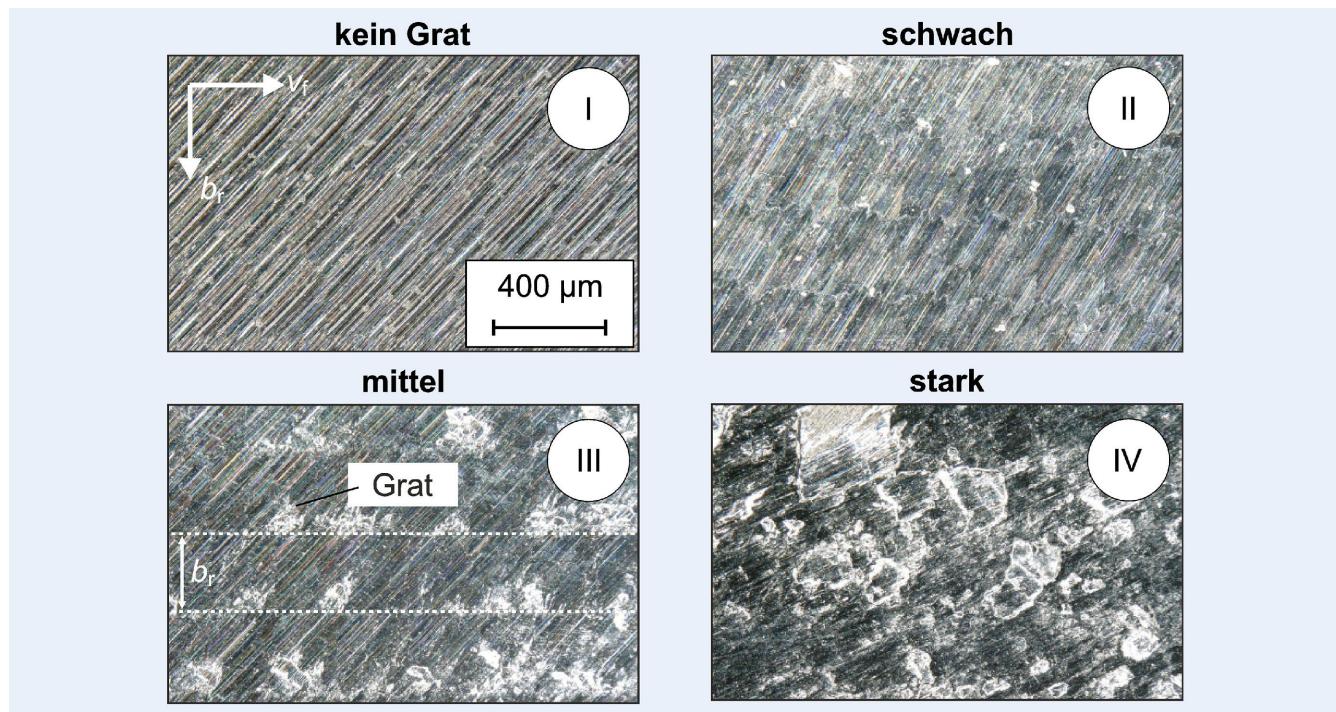


Bild 3 Gratklassifizierung nach Mücke [6]. Grafik: Mücke [6] IFW

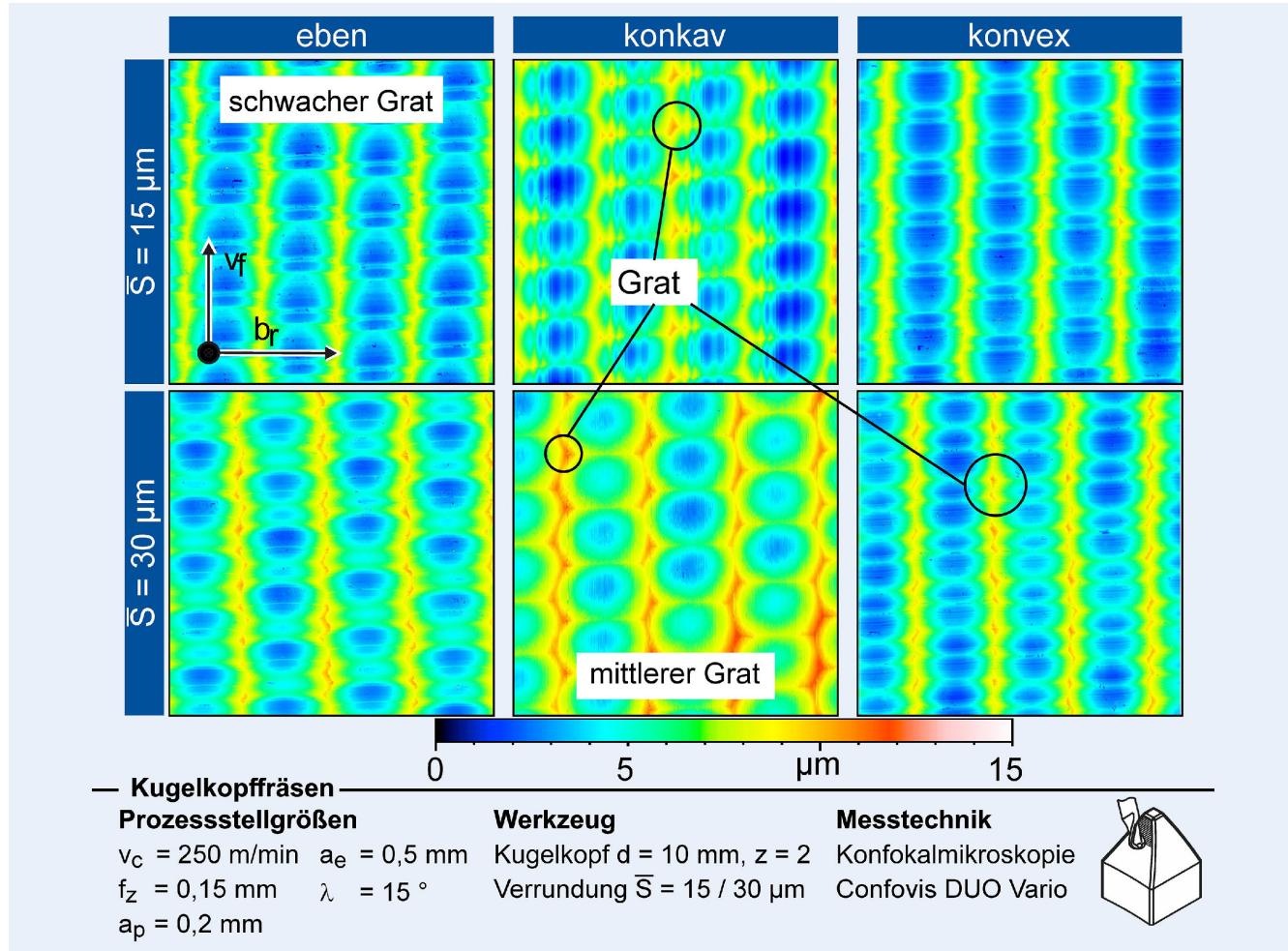


Bild 4 Oberflächentopographien in Abhängigkeit von der Schneidkantenmikrogeometrie. Grafik: IFW

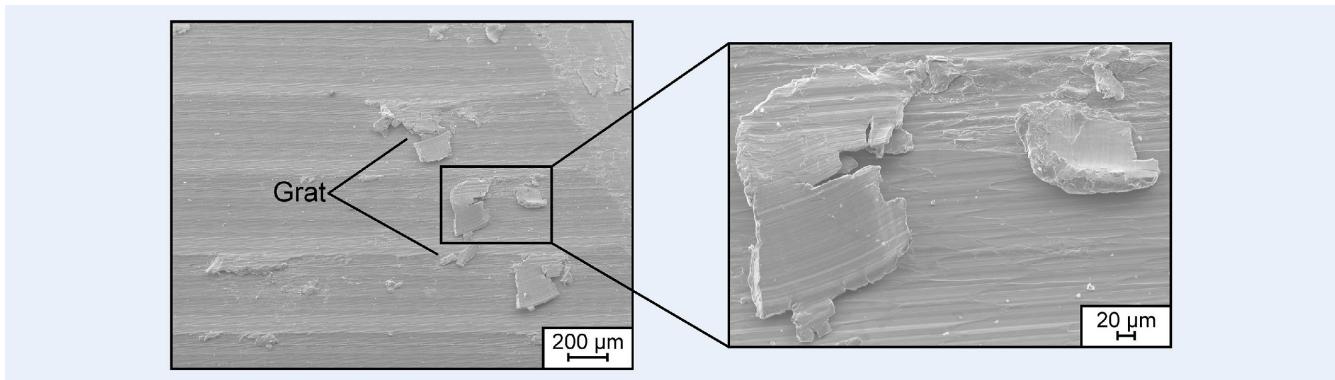


Bild 5 REM-Aufnahme vom Grat auf einer kugelkopfgefrästen Oberfläche. Grafik: IFW

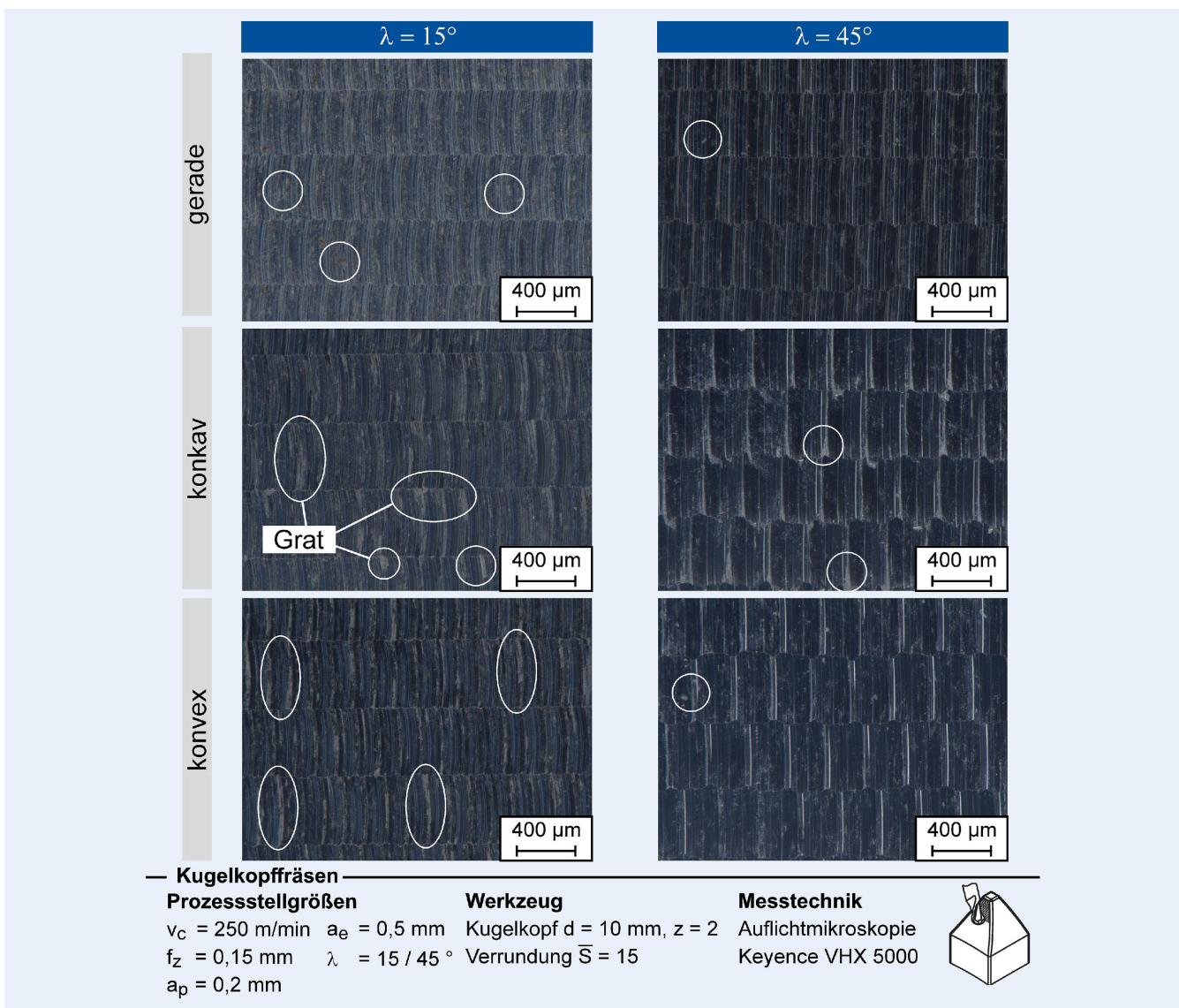
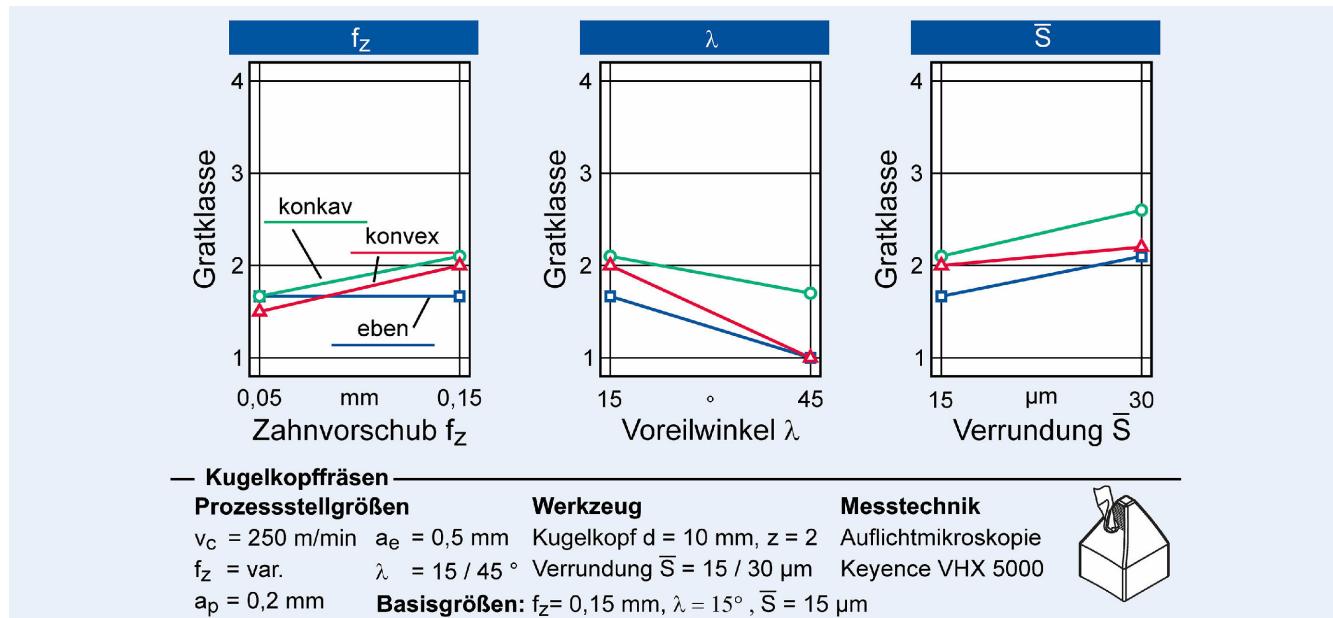


Bild 6 Grat in Abhängigkeit des Voreilwinkels und der Oberflächengeometrie. Grafik: IFW

Eine mikroskopische Darstellung vom Grat ist in Bild 5 anhand von REM-Aufnahmen dargestellt.

3 Gratbildung beim Kugelkopffräsen

Zur Untersuchung der Gratbildung wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden durch die Variation des Zahnvorschubs f_z , der Werkzeugorientierung λ und der

**Bild 7** Gratklassifizierung – Einfluss der Prozesseinstellgrößen. *Grafik IFW*

Schneidkantenmikrogeometrien \bar{S} die Eingriffsbedingungen verändert, wodurch die Gratbildung beeinflusst wird. Die für jede Stellgrößenkombination und Oberflächengeometrie generierten Oberflächen wurden anschließend anhand der angefertigten Mikroskopaufnahmen in Gratklassen eingeteilt. In **Bild 6** sind beispielhaft die Mikroskopaufnahmen für die Variation des Voreilwinkels λ dargestellt.

Zunächst wurden Häufigkeit und Größe des Grats den in Kapitel 2.3 beschriebenen vier Gratklassen zugeordnet. Aus der Abbildung geht hervor, dass Grat vor allem an den Rändern einer Fräsrille entsteht. Der Vergleich der beiden Prozesskombinationen zeigt, dass eine Erhöhung des Voreilwinkels zu einer Reduktion der Gratbildung führt.

In **Bild 7** ist die Einteilung der jeweils resultierenden Oberflächen in Gratklassen in Abhängigkeit des Zahnvorschubs, des Voreilwinkels und der Schneidkantenmikrogeometrie abgebildet.

Links in Bild 7 ist die Variation des Zahnvorschubs dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei geringen Zahnvorschüben von $f_z = 0,05 \text{ mm}$ alle drei Oberflächengeometrien ähnliche Gratklassen aufweisen. Eine Erhöhung des Zahnvorschubs führt bei der konkaven und konvexen Oberflächengeometrie zu einer Erhöhung der Gratklasse. Beide Oberflächen wurden in einem Bereich zwischen „kein Grat“ und „schwacher Grat“ eingeordnet, wobei die konkav Oberfläche mit „2,10“ den höchsten Wert aufweist. Der höhere Wert bei der konkaven Oberflächengeometrie ist auf die erhöhte Reibung zwischen der Schneide und der Werkstückoberfläche zurückzuführen. Bei der ebenen Oberflächengeometrie wurde hingegen kein Unterschied beobachtet.

Die Erhöhung des Voreilwinkels führt bei allen drei Oberflächengeometrien zu einer Reduzierung der Gratklasse. Bei den ebenen und konvexen Oberflächen wurde bei Voreilwinkeln von $\lambda = 45^\circ$ kein Grat festgestellt. Dies ist auf die Erhöhung des im Eingriff befindlichen effektiven Durchmessers und der daraus resultierenden höheren relativen Schnittgeschwindigkeit im Eingriffspunkt zurückzuführen. Zudem wird bei größeren Voreilwinkeln die Mindestspanungsdicke h_{min} im Verlauf des Zahneingriffs früher überschritten, wodurch die Spanbildung schneller erfolgt

[7, 9, 16]. Eine Erhöhung der Schneidkantenmikrogeometrie von $\bar{S} = 15 \mu\text{m}$ auf $30 \mu\text{m}$ führt bei allen drei Oberflächengeometrien zu einem Anstieg der Gratklasse. Dies passt in den Kontext einer geringeren Gratbildung bei zunehmenden Voreilwinkeln, da die Mindestspanungsdicke h_{min} mit steigender Schneidkantenmikrogeometrie zunimmt. Ähnliche Beobachtungen wurden auch von Mücke bei der Zerspanung von Ti-6Al-4V gemacht [6]. Insgesamt zeigen die Untersuchungen einen signifikanten Einfluss der Mindestspanungsdicke h_{min} .

4 Alternative Werkzeuggeometrie: Kreissegmentfräser

Im Weiteren wurde ein Kreissegmentfräser eingesetzt, um das Analogiebauteil zu fertigen. Kreissegmentfräser bieten im Vergleich zu Kugelkopffräsern eine höhere Produktivität und in Teilen eine höhere generierbare Oberflächengüte. Die höhere Produktivität wird dabei durch die geringere Anzahl an Zeilen beschrieben, die benötigt werden, um eine Fläche in Abhängigkeit der zu erzielenden Rauheit zu bearbeiten. Bei einer angenommenen theoretischen Rauheit von $R_{th} = 2,5 \mu\text{m}$ ergibt sich der einzustellende Zeilenabstand nach der folgenden Formel:

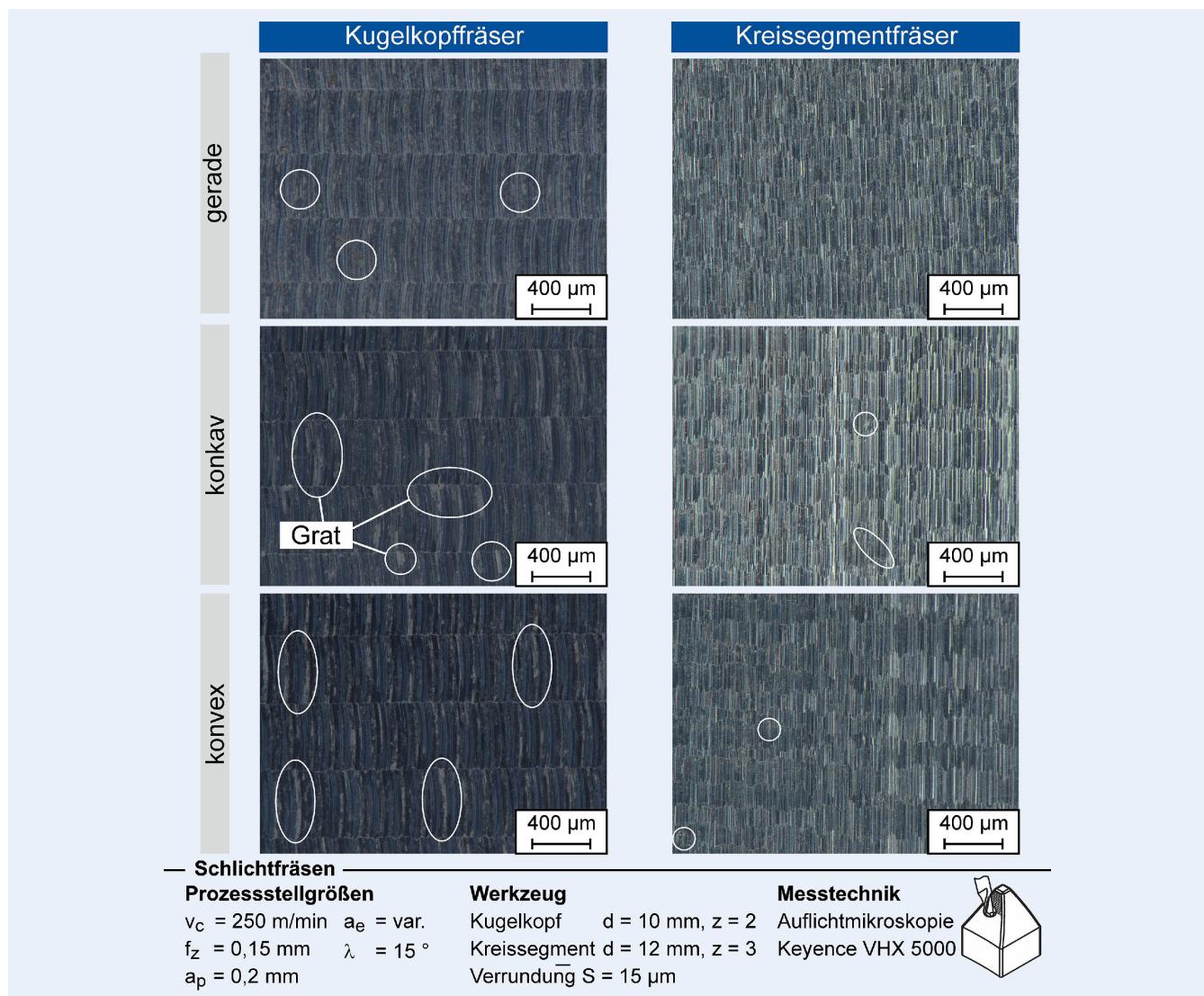
$$b_r = 2 * \sqrt{R_{th}(2 * r - R_{th})}$$

Danach resultiert beispielsweise für einen Kugelkopffräser mit 10 mm Durchmesser ein Zeilenabstand von $b_{r,KK} = 0,32 \text{ mm}$. Für den hier genutzten Kreissegmentfräser ergibt sich ein Zeilenabstand von $b_{r,KS} = 1,99 \text{ mm}$. Dies entspricht einem circa sechs Mal größeren Zeilenabstand, wodurch die Bearbeitungszeit signifikant verringert wird (**Tabelle 4**).

Aufgrund der Geometrie beziehungsweise der großen Radien im Schneidenbereich weisen Kreissegmentfräser Einschränkungen in Bezug auf die Variabilität der Voreil- und Kippwinkel auf. Diese Einschränkungen führen dazu, dass Kreissegmentfräser nicht für beliebige Freiformflächen eingesetzt werden können. Für die Gegenüberstellung der zwei Werkzeugtypen wurden Pro-

Tabelle 4. Vergleich der Bearbeitungszeiten von Kugelkopf- und Kreissegmentfräsern.

Werkzeug	Bearbeitungszeit bei $f_z = 0,05 \text{ mm}$	Bearbeitungszeit bei $f_z = 0,15 \text{ mm}$
Kugelkopffräser	24 min	8 min
Kreissegmentfräser	2,1 min	0,7 min

**Bild 8** Grat in Abhängigkeit von der Werkzeuggeometrie. Grafik: IFW

zesseinstellgrößen gewählt, die bei der Verwendung eines Kugelkopffräisers unter anderem zu einer Gratbildung führen (vergleiche Kapitel 3). Die resultierenden Oberflächen für einen Zahnvorschub von $f_z = 0,15 \text{ mm}$ und einem Voreilwinkel von $\lambda = 15^\circ$ sind in **Bild 8** dargestellt.

Die Aufnahmen verdeutlichen, dass bei der Verwendung des Kreissegmentfräisers die Gratbildung nochmals reduziert werden kann. Die resultierenden Gratklassen aus dem Vergleich der beiden Werkzeugtypen sind in **Bild 9** dargestellt.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass der Kreissegmentfräser ausschließlich Oberflächen mit schwachem Grat oder keinem Grat erzeugt. Für Zahnvorschübe von $f_z = 0,05 \text{ mm}$ ist für die ebene Oberflächengeometrie keine Veränderung festzustellen. Bei den gekrümmten Oberflächengeometrien, konkav und konvex,

ergeben sich nach der Bearbeitung mit dem Kreissegmentfräser Oberflächen, die mit der Gratklasse von 1,17 bewertet wurden, was einer nahezu grätfreien Oberfläche entspricht. Eine Erhöhung des Zahnvorschubs auf $f_z = 0,15 \text{ mm}$ führt bei der ebenen und der konkaven Oberflächengeometrie zu einer Halbierung der Gratklasse. Bei der ebenen Oberfläche wurde nach der Bearbeitung mit dem Kreissegmentfräser eine vollständig grätfreie Oberfläche festgestellt. Dies ist, wie bereits beschrieben, auf die größeren Zeilenabstände und so auf die geringere Anzahl an Fräsrillen zurückzuführen, an denen Gratbildung auftritt. Darüber hinaus wird durch die Geometrie des Kreissegmentfräisers die Mindestspanungsdicke h_{min} schneller überschritten als bei einem Kugelkopffräser.

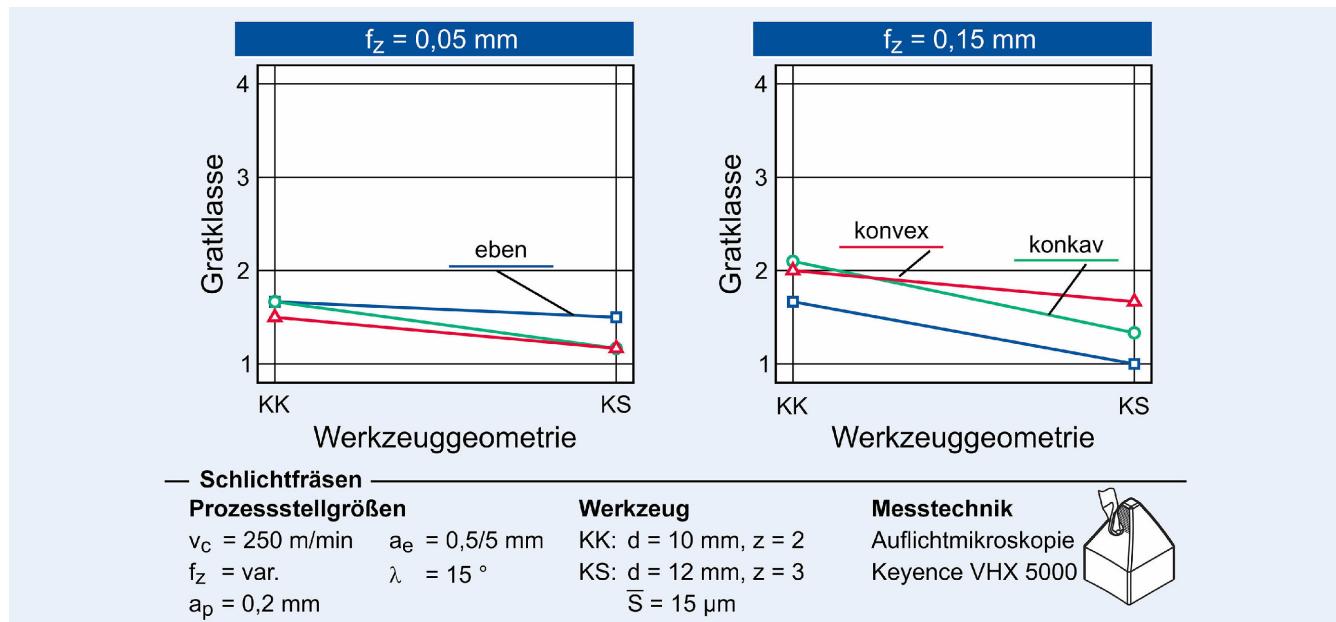


Bild 9 Gratklassifizierung – Einfluss der Werkzeugmakrogeometrie. Grafik: IFW

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Schlichtbearbeitung mittels Kugelkopffräsern ist ein etabliertes Fertigungsverfahren für die Herstellung von Freiformflächen. Insbesondere bei der Herstellung komplexer Investitionsgüter mit variierenden Freiformflächen bieten sie eine hohe Flexibilität, Profiltreue und generieren hohe Oberflächengüten. Jedoch besteht die Möglichkeit, dass die Wechselwirkungen von Prozesseinstellgrößen und gekrümmten Oberflächen die Oberflächenqualität durch Gratbildung negativ beeinflussen. Damit die Gratbildung minimiert oder vermieden werden kann, ist es notwendig, diese Zusammenhänge zu kennen, um dieses Wissen in die Prozessplanung einfließen zu lassen. Ziel der hier dargestellten Untersuchungen war es daher, die Zusammenhänge zwischen den Prozesseinstellgrößen und den resultierenden Oberflächen bei der Bearbeitung eines hochlegierten Stahls (1.2379) mittels Kugelkopffräsern aufzuzeigen. Zudem wurde ein Vergleich zwischen Kugelkopf- und Kreissegmentfräsern durchgeführt, um eine alternative Werkzeuggeometrie zu veranschaulichen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Mindestspanungsdicke h_{min} unabhängig von der Oberflächengeometrie, einen entscheidenden Einfluss auf die Gratbildung hat. Geringe Mindestspanungsdicken resultieren in einer geringeren Gratbildung. Somit zeigen die Ergebnisse, dass durch die Verwendung geeigneter Prozesseinstellgrößen, einer spezifischen Werkzeugauswahl und einer angepassten Prozessplanung die Gratbildung signifikant reduziert werden kann. Dabei hat der Voreilwinkel in dem hier untersuchten Parameterraum den größten Einfluss.

Im Weiteren erfolgt eine simulative Betrachtung der oben dargestellten Untersuchungen. Zu diesem Zweck erfolgt eine Digitalisierung der Werkzeuge, um diese in eine Materialabtragssimulation zu überführen. Mit deren Hilfe können zukünftig die an den jeweiligen Kontaktstellen auftretenden Spanungsdicken und -querschnitte ermittelt und die Oberflächenausbildung dargestellt werden. Ebenso werden Methoden untersucht, um die subjektive Einordnung des Grats zu standardisieren. Dabei wird auf eine

Kombination aus Object Detection und Image Segmentation zurückgegriffen.

FÖRDERHINWEIS UND DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Teilprojekts T20 „Werkstoffbezogene Prozessauslegung für das 5-Achs-Fräsen komplexer Investitionsgüter“ aus dem Sonderforschungsbereich 871 „Regeneration komplexer Investitionsgüter“ und den Industriepartnern Franken GmbH & Co. KG und Open Mind Technologies AG.

LITERATUR

- [1] Dangel, R.: Spritzgießwerkzeuge für Einsteiger. München: Carl Hanser-Verlag 2017
- [2] Layegh, S.; Lazoglu, I.: 3D surface topography analysis in 5-axis ball-end milling. CIRP Annals Manufacturing Technology 66 (2017), pp. 133–136
- [3] Bons, J. P.: A Review of surface roughness effects in gas turbines. Journal of Turbomachinery 132 (2010) 2, #021004, doi.org/10.1115/1.3066315
- [4] Denkena, B.; Nespor, D.; Böß, V. et al.: Residual stresses formation after re-contouring of welded Ti-6Al-4V parts by means of 5-axis ball nose end milling. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 7 (2014) 4, pp. 347–360
- [5] Denkena, B.; Biermann, D.: Cutting edge geometries. CIRP Annals Manufacturing Technology 63 (2014) 2, pp. 631–653
- [6] Mücke, A.: Gestaltabweichungen nach der Rekonturierung reparaturgeschweißter Bauteile. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2020
- [7] Wyen, C.-F.: Rounded cutting edges and their influence in machining titanium. Dissertation, ETH Zürich, 2012
- [8] Bergmann, B.: Grundlagen zur Auslegung von Schneidkantenverrundungen. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2017
- [9] Warnecke, G.: Untersuchungen zur Mikrogeometrie der Spanbildung bei metallischen Werkstoffen. Dissertation, TU Hannover, 1974

- [10] Aurich, J.; Dornfeld, D.; Arrazola, P. et al.: Burrs – Analysis, control and removal. CIRP Annals 58 (2009) 2, pp. 519–542.
- [11] Link, R.: Gratbildung und Strategien zur Gratreduzierung bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide. Dissertation, RWTH Aachen, 1992
- [12] Ganser, P: Adaptives Fräsen von Freiformflächen mit Kreissegmentfräsern. Dissertation, RWTH Aachen, 2025
- [13] Gdula, M.: Empirical Models for Surface Roughness and Topography in 5-Axis Milling Based on Analysis of Lead Angle and Curvature Radius of Sculptured Surfaces. Metals 10 (2020) 7, #932, doi.org/10.3390/met10070932
- [14] Marin, F.: Five-axis milling of rough and PBF-LB parts with free-form surfaces using ball-end and circle-segment end mills. Ph.D thesis, Universidad del País Vasco, 2024
- [15] Camacho, H.J.: Frästechnologie für Funktionsflächen im Formenbau. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 1991
- [16] Nespor, D.: Randzonenbeeinflussung durch die Rekonturierung komplexer Investitionsgüter aus Ti-6Al-4V. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2015

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena 
denkena@ifw.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Benjamin Bergmann 
bergmann@ifw.uni-hannover.de

Michael Keitel, M.Sc. 
keitel@ifw.uni-hannover.de

Leibniz Universität Hannover
Institut für Fertigungstechnik
und Werkzeugmaschinen IFW
An der Universität 2, 30823 Garbsen
www.ifw.uni-hannover.de

LIZENZ



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