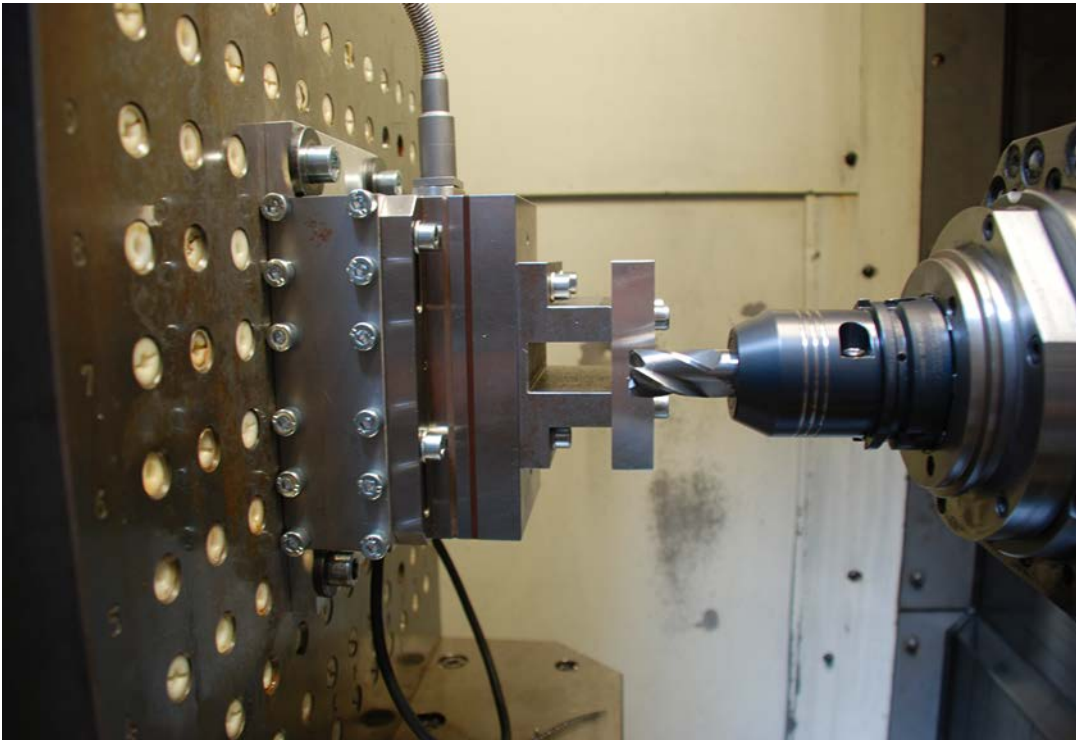


HPC-Fräswerkzeuge ■ Alu-Luftfahrtbauteile ■ Schrupp-Schlicht-Kombination

Grob und fein im Einklang

Eine neuartige Fräswerkzeug-Geometrie vereint die Vorteile von Schrupp- und Schlichtwerkzeugen für die Hochleistungsbearbeitung von Aluminium-Luftfahrtbauteilen. Tests ergaben eine verdreifachte Produktivität. Reserven gibt es in puncto Stabilität und Oberflächengüte.

von Berend Denkena, Thilo Grove und Lars Ellersiek



1 Schrupp-Schlicht-Fräser im Test. Aufgrund seiner angepassten Geometrie lässt sich mit ihm die Produktivität gegenüber konventionellen Schlichtwerkzeugen um über 300 Prozent steigern (© IFW)

Zerspanprozesse lassen sich unterteilen in Schrupp- und Schlichtbearbeitungen. Wegen der unterschiedlichen Zielgrößen – beim Schruppen soll eine hohe Produktivität erzielt werden, beim Schlichten stehen Oberflächengüte und Maßhaltigkeit im Vordergrund – werden je nach Prozess verschiedene Anforderungen an das Werkzeug gestellt. Vollhartmetall-(VHM-)Schaftfräser zum Schruppen von Aluminium haben oft geometrische Merkmale wie Freiflächenfasen oder kordelierte Schneiden; das erhöht die Prozessstabilität und steigert die Produktivität [1 bis 3]. Um

eine hohe Oberflächengüte und geringe Prozesskräfte sicherzustellen, sind die Schneiden von Schlichtwerkzeugen dagegen meist scharf ausgeführt [4].

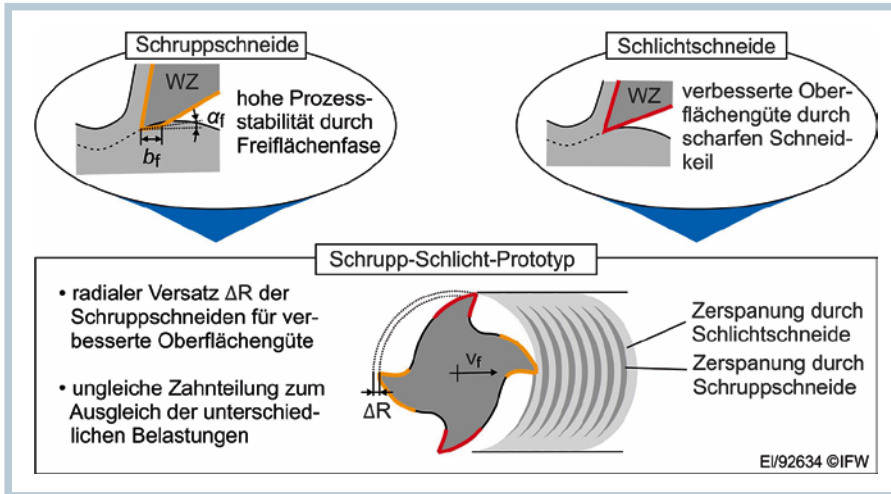
Ein neuartiges, patentiertes Werkzeugkonzept [5] ermöglicht es nun, mit ein und demselben Werkzeug sowohl zu schruppen als auch zu schlichten (Bilder 1 und 2). Damit reduziert sich die Anzahl der Werkzeugwechsel, und Vorschlicht- oder Schruppprozesse entfallen. Das Werkzeug hat zwei scharfe Schlicht- und zwei gefaste Schruppschneiden.

Um die Oberflächengüte nicht zu beeinträchtigen, sind die beiden Schrupp-

schneiden radial nach hinten versetzt, so dass sie nicht in Kontakt mit der späteren Oberfläche kommen. Zugleich reduziert sich wegen des radialen Versatzes die Spannungsdicke der Schruppschneiden; die Spannungsdicke der Schlichtschneiden wird entsprechend größer. Um die resultierenden Belastungsunterschiede der Schneiden auszugleichen, hat der Fräser eine ungleiche Zahnteilung.

Prozessstabilität und resultierende Oberflächenqualität im Fokus

Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen war die Analyse der Schrupp- und



2 Konzept des innovativen Schrupp-Schlicht-Fräasers (© IFW)

$D = 20 \text{ mm}$	$N_t = 4$	Werkzeuge $p = [80^\circ \ 100^\circ \ 80^\circ \ 100^\circ]$		$\alpha = 14^\circ$	$\gamma = 14^\circ$
Schlichtwerkzeug	Schruppwerkzeug	Schrupp-Schlicht Prototyp			
$\Delta R = 0 \text{ }\mu\text{m}$	$\Delta R = 0 \text{ }\mu\text{m}$	$\Delta R = 35 \text{ }\mu\text{m}$			
$b_f = 0 \text{ }\mu\text{m}$	$b_f = 200 \text{ }\mu\text{m}$	$b_f = 200 \text{ }\mu\text{m}$			
$\alpha_f = -$	$\alpha_f = 1^\circ$	$\alpha_f = 1^\circ$			

Untersuchung Oberflächengüte

Dynamometer Kistler 9257B

Werkstück

Vorfräsen für Vollnuthschnitt
 $f_z = 0,06 - 0,14 \text{ mm}$
 $n = 4.000 \text{ min}^{-1}$

Gleichlauf:
 $a_p = 10 \text{ mm}$
 $a_e = 3 \text{ mm}$

Vollnuthschnitt:
 $a_p = 2 \text{ mm}$
 $a_e = 20 \text{ mm}$

Untersuchung Prozessstabilität

Werkstück

$f_z = 0,12 \text{ mm}$
 $a_e = D$

EI/92635 © IFW

3 Geometrische Eigenschaften der in den Vergleichsversuchen verwendeten Werkzeuge (oben) sowie der Versuchsaufbau (unten) (© IFW)

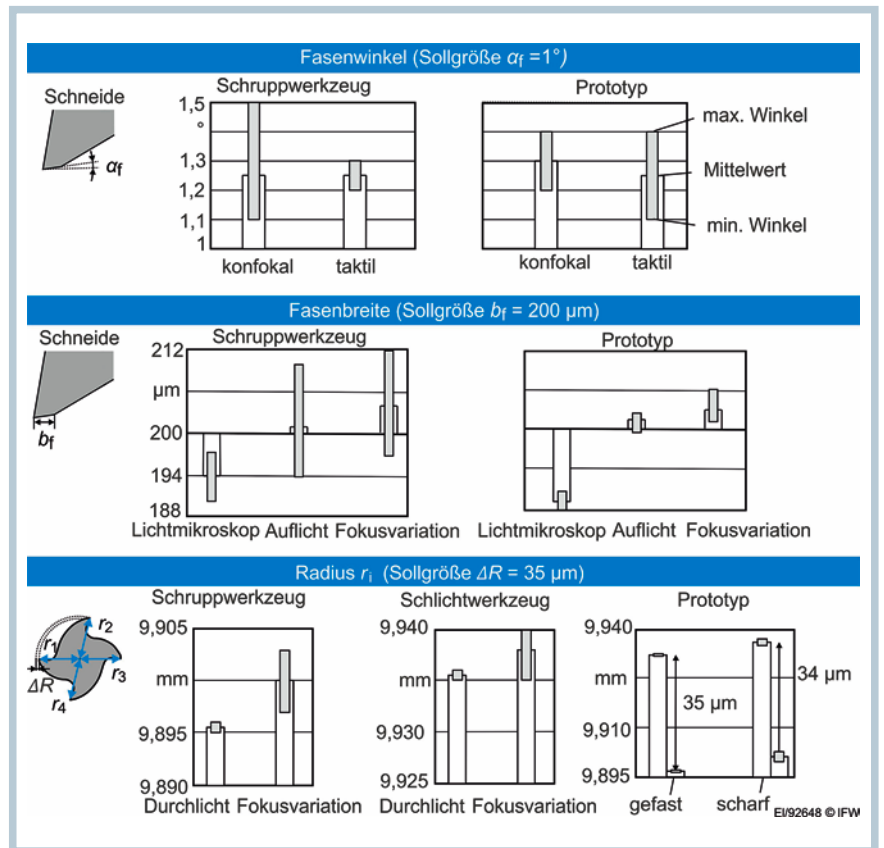
Schlichtfähigkeit von parallel arbeitenden scharfen und gefasteten Schneiden. Dazu schiff man zunächst sowohl konventionelle Schrupp- und Schlichtfräser als auch den Schrupp-Schlicht-Prototypen und charakterisierte die Werkzeuge geometrisch. In Versuchen wurden dann die Prozessstabilität und die resultierende Oberflächenqualität verglichen.

Die Fräser wurden zunächst auf einer Werkzeugschleifmaschine Walter Helitronic 420L mit kunstharzgebundenen Diamantscheiben gefertigt (Rohling: Feinstkorn-Hartmetall mit 10 Prozent Cobalt- und 90 Prozent Wolframkarbidanteil). Nach dem Schleifen untersuchte man die Fräser auf Ungenauigkeiten mithilfe diverser Messsysteme. Außer dem Schrupp-Schlicht-Prototypen wurden Schlichtwerkzeuge mit ausschließlich scharfen Schneiden und Schruppwerkzeuge, die nur gefaste Schneiden haben, gefertigt.

Für alle Fräser galt: Durchmesser $D = 20 \text{ mm}$, Zähnezahl $N_t = 4$ und ungleiche Zahnteilung $p = [80^\circ \ 100^\circ \ 80^\circ \ 100^\circ]$. Wegen der geringen Belastung und des entsprechend geringen Verschleißes bei der Alu-Bearbeitung hatten die Schneiden eine Schneidkantenverrundung von $S_\alpha = S_\gamma = 5 \text{ }\mu\text{m}$ [6].

Schrupp-Schlicht-Fräser in Tests mit anderen Werkzeugen verglichen

Bei den folgenden Tests auf einer Fräsmaschine Heller MC16 wurden experimentelle Stabilitätskarten auf der Grundlage von Geräuschemissionen und des Auftretens von Rattermarken erstellt. In einer weiteren Versuchsreihe untersuchte man die resultierende Oberflächenqualität der Werkzeugkonzepte. Dazu wurden Versuche im Gleichlauf (Schnitttiefe $a_p = 10 \text{ mm}$, Eingriffsbreite $a_e = 3 \text{ mm}$) und im Vollnuthschnitt (Schnitttiefe »



4 Messergebnisse der wichtigsten geometrischen Größen (© IFW)

$a_p = 2 \text{ mm}$) bei einer Drehzahl $n = 4000 \text{ min}^{-1}$ (Schnittgeschwindigkeit $v_c = 251 \text{ m/min}$) und variierendem Zahnvorschub $f_z = 0,06$ bis $0,14 \text{ mm}$

durchgeführt. Um einen Einfluss der Nebenschneiden auf die Prozessstabilität ausschließen zu können, war stets nur die Hauptschneide im Eingriff. Alle Tests fanden unter Trockenbearbeitung statt. Der Versuchsaufbau und die Geometrien sind in Bild 3 dargestellt.

Schon kleine Unterschiede von Fasenbreite und -winkel haben einen signifikanten Einfluss auf die Prozessstabilität [1]. Eine maßgenaues Fertigen und eine zuverlässige Messung der Fasengeometrie waren deshalb für die Untersuchung der Fräser von großer Bedeutung. Die Herausforderung beim Messen bestand vor allem in der geringen Größenordnung der Messgrößen, was eine hohe Messgenauigkeit erforderlich machte. Die wichtigsten geometrischen Größen bezüglich Prozessstabilität und Oberflächengüte sind dabei Fasenbreite b_f , -winkel α_f und radialer Versatz ΔR [1 und 2].

Um die Maßgenauigkeit der geschliffenen Fräser bewerten zu können, wurden diese drei Größen messtechnisch mit verschiedenen Messmitteln analysiert. Die Messergebnisse für die drei in den späteren Zerspanuntersuchungen verwendeten Fräser (Schruppfräser, Schlichtfräser, Schrupp-Schlicht-Prototyp) zeigt Bild 4. Der weiße Balken gibt dabei das

INFORMATION & SERVICE



INSTITUT

IFW – Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover

30823 Garbsen

Tel. +49 511 762-2533

www.ifw.uni-hannover.de

DIE AUTOREN

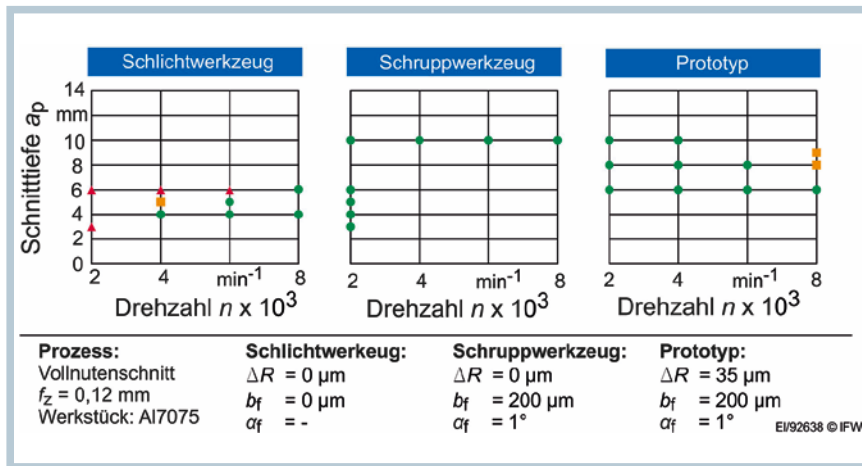
Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena ist Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover
denkena@ifw.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Thilo Grove ist Bereichsleiter Fertigungsverfahren am IFW
grove@ifw.uni-hannover.de

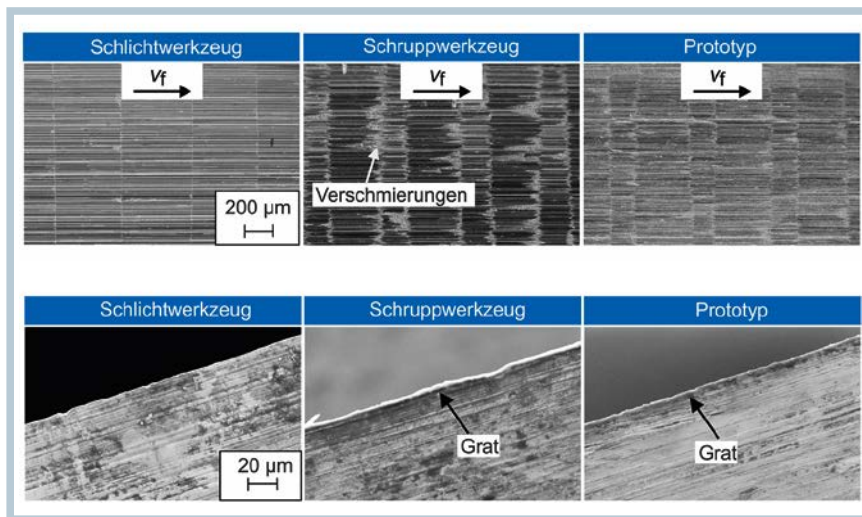
M. Sc. Lars Ellersiek ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFW
ellersiek@ifw.uni-hannover.de

PDF-DOWNLOAD

www.werkstatt-betrieb.de/6959188



5 Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen im Vollnutenschnitt bei einem Zahnvorschub f_z von 0,12 mm (© IFW)



6 Lichtmikroskopaufnahmen der mit $f_z = 0,12 \text{ mm}$, $n = 4000 \text{ min}^{-1}$, $a_p = 10 \text{ mm}$ und $a_e = 3 \text{ mm}$ im Gleichlauf bearbeiteten Oberflächen (oben) sowie REM-Aufnahmen der Gratbildung nach Vollnutenschnitt mit $f_z = 0,12 \text{ mm}$, $n = 4000 \text{ min}^{-1}$ und $a_p = 2 \text{ mm}$ (unten) (© IFW)

über alle Schneiden gemittelte Messergebnisse an, der graue Balken den größten und den kleinsten gemessenen Fasenwinkel sowie den Radius/die Fasenbreite einer einzelnen Schneide.

Die Fasenbreite wurde ermittelt mit drei verschiedenen Messverfahren

Der Fasenwinkel α_f wurde in zwei Schritten bestimmt. Zunächst ermittelte man den Freiwinkel α mittels Auflichtmessung. Weil aufgrund der geringen Fasenbreite von rund $200 \mu\text{m}$ eine Bestimmung des Fasenwinkels nicht mit der Auflichtmessung möglich ist, wurde mit einem konfokalen Laserprofilometer und einem taktilen Konturmessgerät der Winkel zwischen Fasenwinkel und Freiwinkel bestimmt.

Weil der Freiwinkel bekannt ist, lässt sich daraus der Fasenwinkel berechnen. Für beide Messmethoden ergaben sich übereinstimmend Fasenwinkel zwischen

1,1 und 1,5°. Die gemessenen Winkel waren somit etwas größer als die vorgegebene Sollgröße von $\alpha_f = 1^\circ$. Mögliche Erklärungsansätze sind Ungenauigkeiten der Schleifmaschinenachsen und geringfügige Abweichungen beim Einmessen der Schleifscheiben. Da die Unterschiede beider Methoden sehr klein sind, werden beide Messmethoden zur Bestimmung des Fasenwinkels als geeignet angesehen.

Die Fasenbreite wurde mit einem Lichtmikroskop, mit der Auflichtmessung des Werkzeugmesssystems und mittels Fokusvariationsmikroskop bestimmt. Die beiden letzteren Messungen zeigten gute Übereinstimmungen. In beiden Fällen liegen die gemessenen Fasenbreiten bei allen Schneiden im Bereich der Sollgröße $b_f = 200 \mu\text{m}$. Die Ergebnisse zeigten auch, dass die Fasenbreiten der einzelnen Schneiden des Schrappwerkzeugs sich um bis zu $17 \mu\text{m}$ unterscheiden. Eine »

Ursache kann der Verschleiß der Schleifscheiben sein.

Mit dem Lichtmikroskop wurden geringere Fasenbreiten gemessen. Das kann auf den manuellen Messablauf und somit eventuelle Bedienfehler zurückzuführen sein. Die automatisierten Verfahren Auflichtmessung und Fokusvariation, die zudem auf Höheninformationen der Schneide basieren, reduzieren Bedieneinflüsse. Beide Verfahren sind zum Bestimmen der Fasenbreite besser geeignet als das Lichtmikroskop.

Die Radien der einzelnen Schneiden r_i beziehungsweise der radiale Versatz ΔR sind beim Prototyp von großer Bedeutung. Ist der radiale Versatz zu klein, können die Schruppschneiden durch Rundlauffehler in Kontakt mit der späteren Oberfläche kommen, was die Oberflächenqualität negativ beeinflusst. Gleichzeitig reduziert ein zu großer radialer Versatz die Schruppfähigkeit des Fräasers.

Stabilitätsuntersuchungen als Richtschnur für die Neugestaltung

Die Radien wurden mit der Durchlichtmessung eines Werkzeugmesssystems und mittels Fokusvariationsmikroskop gemessen. Beim Messen mit Letzterem wurde der Höhenunterschied zwischen Schaft und Schneide ermittelt, wobei man einen Schaftdurchmesser von 20 mm annahm. Die Messungen mit diesem Mikroskop zeigten größere Abweichungen bei den Schneidenradien, zurückzuführen auf Rundlauffehler in der Aufspannung, die sich jedoch beim Bestimmen der Radien mittels Durchlichtmessung ermitteln und herausrechnen lassen. So ist mittels Durchlichtmessung eine höhere Genauigkeit erzielbar.

Zur Analyse der Prozessstabilität wurden experimentelle Stabilitätskarten aufgenommen (Bild 5). Dabei teilte man die einzelnen Arbeitspunkte anhand von Geräuschemissionen und der generierten Oberfläche in stabile, grenzstabile und instabile Prozesse ein.

Für die Schnitttiefe $a_p = 6$ mm war die Bearbeitung mit dem Schlichtwerkzeug bei drei von vier untersuchten Drehzahlen instabil. Bei den beiden anderen Werkzeugen lag die Stabilitätsgrenze deutlich höher. So erwiesen sich beim Schruppwerkzeug für die Schnitttiefe $a_p = 10$ mm alle Prozesse als stabil. Bei den Versuchen mit dem Prototyp war nur bei einer Drehzahl n von 8000 min^{-1} ein grenzstabiles Verhalten feststellbar.

Der Grund für die erhöhte Prozessstabilität des Werkzeugs mit Freiflächenfasen ist die sogenannte Prozessdämpfung. Infolge leichter Schwingungen drückt die Freiflächenfase Material des Werkstücks ein. Dadurch wird eine Kraft induziert, die der Schwingungsbewegung entgegenwirkt und den Regenerativeneffekt mindert [1]. Beim Prototyp ist dieser Effekt etwas geringer, da nur zwei Schneiden gefast sind. Somit nimmt auch die induzierte Prozessdämpfungskraft ab, und die Prozessstabilität ist gegenüber dem Schruppwerkzeug reduziert.

Zur Analyse der Oberflächenqualität wurde zunächst die Rauheit der gefrästen Oberflächen mit einem mobilen Rauheitsmessgerät Hommel W5 an drei Stellen gemessen; der Mittelwert wurde gebildet. In Auswertung der Ergebnisse ließ sich konstatieren, dass eine Steigerung des Vorschubs erwartungsgemäß zu einem höheren arithmetischen Mittenrauwert R_a führt. Zugleich ist ein Einfluss des Werkzeugs nur bei hohen Vorschüben erkennbar. Die mit dem Schruppwerkzeug bearbeitete Oberfläche hat hierbei einen um etwa 30 Prozent höheren arithmetischen Mittenrauwert als die mit dem Schlichtwerkzeug bearbeitete. Eine mögliche Erklärung dafür sind Verschmierungen auf der Oberfläche. Diese sind auf den Lichtmikroskopaufnahmen in Bild 6 zu erkennen.

Im Gegensatz zu der mit dem Schlichtwerkzeug bearbeiteten Oberfläche, die frei von Verschmierungen bleibt, sind auf der mit dem Schruppwerkzeug bearbeiteten Oberfläche starke Verschmierungen erkennbar. Ursache dafür ist der Freiflächenkontakt zwischen Fase und Werkstück. Die mit dem Schrupp-Schlicht-Prototyp bearbeitete Oberfläche zeigt ebenfalls leichte Verschmierungen. Zwar kommen hier die gefasten Schneiden aufgrund des radialen Versatzes nicht direkt in Kontakt mit der Oberfläche, jedoch wird durch die gefasten Schneiden Wärme induziert [8]. Das könnte zu einem Aufweichen des Werkstoffes und infolgedessen ebenfalls zu leichten Verschmierungen führen.

Die Gratbildung wurde mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) an jeweils einer Probe je Werkzeugkonzept untersucht. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Bild 6 dargestellt. Der größte Grat bildete sich an der mit dem Schruppwerkzeug bearbeiteten Oberfläche. Dieser Sachverhalt lässt sich auf eine erhöhte plastische

Verformbarkeit des Werkstoffes infolge höherer Werkstücktemperaturen aufgrund des Freiflächenkontaktes zurückführen [4 und 7].

Die mit dem Prototyp bearbeitete Oberfläche zeigte ebenfalls eine geringe Gratbildung. Die gefasten Schneiden kommen in diesem Fall aufgrund des radialen Versatzes nicht mit der Oberfläche in Kontakt und treten erst später in den Werkstoff ein. Allerdings resultieren aus dem zeitversetzten Eintreten der gefasten Schneiden ein Freiflächenkontakt und eine Erwärmung des Teils, sodass die scharfen Schlichtschneiden des Prototypwerkzeugs ebenfalls eine leichte Gratbildung hervorrufen. Auf der mit dem Schlichtwerkzeug bearbeiteten Oberfläche bildete sich dagegen kein Grat. ■

INFORMATION & SERVICE



LITERATUR

- [1] V. Sellmeier: Über den Einfluss der Werkzeuggestalt auf die dynamische Stabilität des Fräsprozesses. Dr.-Ing.-Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2012
- [2] Z. Dombovari, Y. Altintas und G. Stepan: The effect on serration on mechanics and stability of milling cutters. International Journal of Machine Tool & Manufacture, Volume 50, S. 511–520, 2010
- [3] J. Munoa, X. Beudaert, Z. Dombovari, Y. Altintas, E. Budak, C. Brecher und G. Stepan: Chatter Suppression techniques in metal cutting. CIRP Annals, Volume 65, Issue 2, S. 785–808, 2016
- [4] M. Groppe: Prozessauslegung für die Hochleistungsfräsbearbeitung von Aluminium-Strukturbauteilen. Dr.-Ing.-Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2006
- [5] B. Denkena, J. Köhler und R. Grabowski: Konzept eines Fräswerkzeugs für die Schrupp- und Schlichtbearbeitung, DE102013225017.7, 2013
- [6] B. Denkena und D. Biermann: Cutting edge geometries. CIRP Annals, Volume 63, Issue 2, S. 631–653, 2014
- [7] Y. Altintas und E. Budak: Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling. CIRP Annals, Volume 44, Issue 1, S. 357–362, 1995
- [8] B. Denkena, J. Brüning, D. Niederwestberg und R. Grabowski: Influence of Machining Parameters on Heat Generation During Milling of Aluminum Alloys. Procedia CIRP, Volume 46, S. 39–42, 2016