Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

DOI 10.37544/1436–4980–2021–10–86

Einfluss der Prozessstellgrößen auf die Spannutenbearbeitung von PcBN-Schaftwerkzeugen

Produktive Schleifbearbeitung von PcBN

B. Denkena, A. Krödel, D. Müller-Cramm

Durch eine angepasste Bearbeitungsstrategie lassen sich Vollkopf-PcBN-Schaftwerkzeuge mittels Schleifen herstellen. Dieser Beitrag stellt Handlungsempfehlungen bereit, um eine produktive Spannutenfertigung durch keramisch gebundene Diamantschleifwerkzeuge zu erlauben. Hierdurch wird der Schleifwerkzeugverschleiß in erheblichem Maße gemindert und gleichzeitig eine hohe Fertigungsqualität gewährleistet.

STICHWÖRTER

Schleifen, Schneidstoffe, Forschung

Productive grinding of PcBN

An adapted grinding strategy enables the production of shank tools from very hard PcBN solid material by grinding. This article provides recommendations for productive flute grinding using vitrified diamond grinding tools. In this way, the wear of grinding tools is significantly reduced and, in addition, a high manufacturing quality is ensured.

1 Überblick

Die Hartfeinbearbeitung von gehärteten Stahlwerkstoffen bedingt als Endbearbeitung geringe Rauheitswerte $Rz < 2\ \mu m$ der bearbeiteten Oberflächen. Ein Beispiel für eine derartige Bearbeitungsaufgabe ist die Komplettbearbeitung von gehärteten Formen und Gesenken. Vorteilhaft am Hartfräsen ist das Vermeiden weiterer Aufspannungen und verkürzte Prozesszeiten von bis zu 60 % im Vergleich zu den alternativen Prozessen Schleifen oder Senkerodieren [1]. Der Schneidstoff polykristallines kubisches Bornitrid (PcBN) eröffnet in der Hartfeinbearbeitung Potenziale in der Produktivität und Fertigungsqualität, da seine hohe Härte bis zu 25-mal höhere Standzeiten als beschichtete Hartmetalle ermöglicht [3–5]. Gegenüber anderen Schneidstoffen ist die Standzeit des PcBN zwar hoch, jedoch ist diese mit deutlich höheren Anschaffungskosten verbunden. Der hohe Preis von PcBN-Schaftwerkzeugen ist auf den kostenintensiven Herstellprozess zurückzuführen. Hierbei entfällt auf das Fertigen der Spannuten ein Zeitanteil von 55 – 70 % [6].

Beim Schleifen der Spannuten mit Diamantschleifscheiben ist der Profilverschleiß des Schleifbelags hoch. Als Maß für den Profilverschleiß am Schleifwerkzeug wird das G-Verhältnis verwendet. Es gibt das Verhältnis des Zerspanvolumens V_w zum Verschleißvolumen am Schleifwerkzeug V_s an. Während beim Schleifen von Hartmetall üblicherweise Werte von $G = 220 – 280$ erreicht werden, liegen beim Schleifen von PcBN typische G-Verhältnisse im Bereich $G = 0{,}5 – 4$ [6, 7]. Somit wird bei ungünstig gewählten Stellgrößen zweimal so viel Schleifbelagsvolumen verbraucht, wie PcBN geschliffen wird.

Bisherige Untersuchungen zur Schleifbearbeitung von PcBN haben sich auf die Freiflächenbearbeitung von Wendeschneidplatten konzentriert. Als Schleifmittel eignen sich ausschließlich Diamantkörner, wobei die geforderte Oberflächengüte mit einer Diamantkorngröße von $d_g <$ D25 erreichbar ist [7]. Bei hohen Schnittgeschwindigkeiten $v_c > 20$ m/s ist eine Verringerung der Rauheitswerte mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit zu beobachten, während geringe Schnittgeschwindigkeiten $v_c < 20$ m/s die Rauheit nicht beeinflussen [7, 8]. Durch das Verringern der Schnittgeschwindigkeit und Steigern der Vorschubgeschwindigkeit steigt jedoch das G-Verhältnis signifikant, da sich das Diamantkorn selbst schärft [9].

Mit der Kinematik des Querseiten-Planschleifens können grundsätzlich nur Planflächen erzeugt werden. Das Verfahren ist daher für die Fertigung komplexer Werkzeuggeometrien, wie Spannuten, ungeeignet. Für die Fertigung von Vollhartmetall-Schaftwerkzeugen haben sich Umfangsschleifprozesse bewährt. Die Kornkinematik und der Spanungsdickenverlauf beider Prozesse unterscheiden sich jedoch wesentlich. Beim Querseiten-Planschleifen finden gleichzeitig viele Korneingriffe konstanter Spanungsdicke statt, während beim Längsplan-Umfangsschleifen der Schaftwerkzeug-Spannuten die Korneingriffe nacheinander mit einem kommaförmigen Spanungsdickenverlauf erfolgen. Die Zustellung ist beim Querseiten-Planschleifen das Produkt aus Schnittzeit und Vorschubgeschwindigkeit, während sie bei Längsplan-Umfangsschleifen eine Prozessstellgröße ist. Die Wirkung der Prozessstellgrößen auf das thermomechanische Lastkollektiv in der Kontaktzone unterscheidet sich daher signifikant [6]. Daher werden die notwendigen Kenntnisse zur zum Nutenschleifen von PcBN in dieser Untersuchung hergeleitet.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-10-86 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

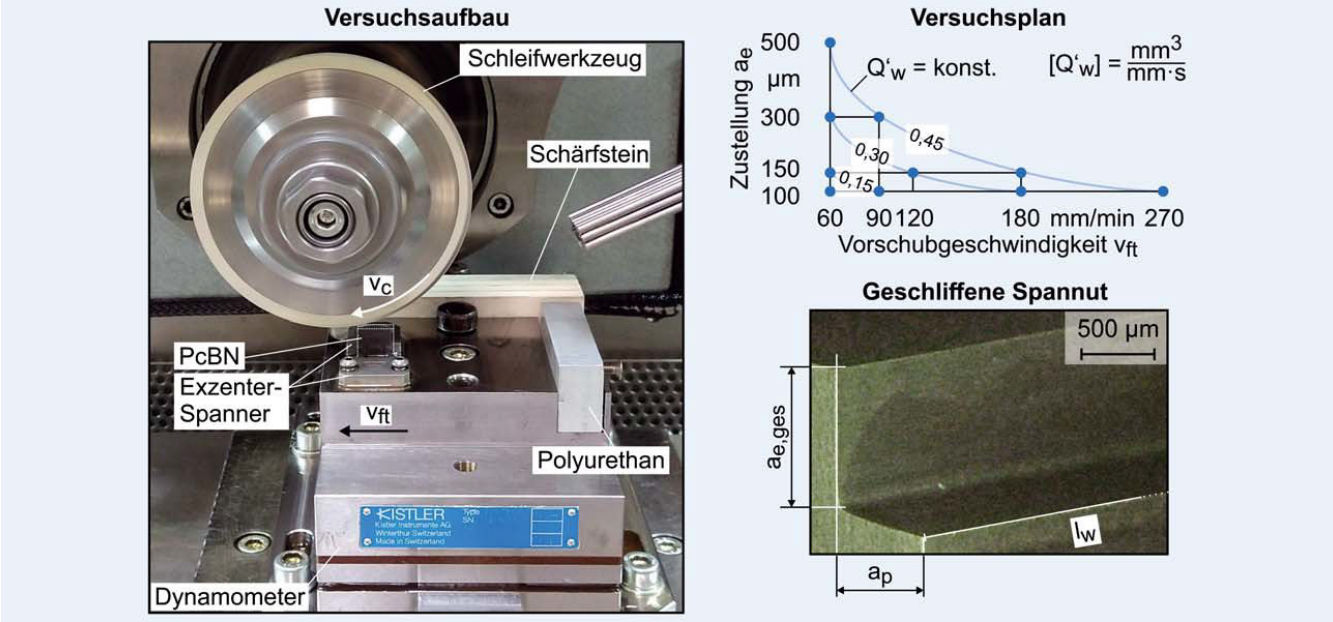

Bild 1. Versuchsaufbau zum Nutenschleifen von PcBN. *Grafik IFW Hannover*

Tabelle. Versuchspunkte

Bez. Zeitspanvolumen Q'_w in mm³/mm·s	Zustellung a_e in µm	Vorschubgeschwindigkeit v_{ft} in mm/min
0,1	100	60
0,15	100	90
0,15	150	60
0,3	100	180
0,3	150	120
0,3	300	60
0,45	100	270
0,45	150	180
0,45	300	90
0,45	500	60

□ Pendelschliff → ■ Nutentiefschliff

2 Schleifen von Spannuten mit keramisch gebundenen Diamantschleifwerkzeugen

In den Untersuchungen werden Nuten mit rechteckigem Querschnitt an quaderförmigen PcBN-Probekörpern durchgeführt. Der gewählte Analogieschleifprozess ermöglicht verallgemeinernde Rückschlüsse auf den Schleifprozess der komplexen Geometrie der Spannuten von Schaftwerkzeugen. **Bild 1** zeigt den Versuchsaufbau und beispielhaft ein bearbeitetes Werkstück.

Die Versuche werden auf einer CNC-Flachschleifmaschine „FS 840 KT CNC“ der Firma Geibel & Hotz GmbH durchgeführt. Die Maschine zeichnet sich durch ihren steifen Aufbau und hohe Wiederholgenauigkeit aus. Als Kühlschmierstoff wird ein niedrigviskoses Schleiföl eingesetzt, das mittels Nadeldüsen mit einem Volumenstrom vom Q_{KSS} = 5 l/min in den Schleifspalt eingebracht wird.

Die Werkstücke bestehen aus PcBN-Vollmaterial hoher Härte von *HV*0.2 = 3736±204 mit keramischem Ti(C,N)-Binder. Die cBN-Partikelgröße beträgt d_{cBN} = 2 µm bei einer Konzentration C_{cBN} = 70 %. Es werden keramisch gebundene Schleifwerkzeuge mit einem Durchmesser von d_s = 100 mm eingesetzt. Als Abrasiv wird Diamantkorn der Korngröße D20 bei einer Kornkonzentration C120 eingesetzt. Vor jedem Versuch wird das Schleifwerkzeug abgerichtet, um konstante Eingriffsbedingungen gewährleisten zu können.

In den Untersuchungen wird das spezifische Zeitspanvolumen Q'_w variiert (Bild 1, rechts). Eine Steigerung von Q'_w wird im gleichen Maße durch Steigern der Zustellung a_e oder Steigern der Vorschubgeschwindigkeit v_{ft} erreicht. Das Steigern von a_e nähert den Prozess einem Nutentiefschliff an, während das Steigern von v_{ft} einem Pendelschliff entspricht. Die Versuchspunkte sind in der **Tabelle** dargestellt. Hierbei wird eine niedrige Schnittgeschwindigkeit v_c = 10 m/s gewählt, wie sie beim Querseiten-Planschleifen von PcBN erfolgreich zur Verschleißminderung eingesetzt wird. Je Schleifversuch wird ein bezogenes Zerspanvolumen von V'_w = 19,5 mm³/mm abgetragen. Dies entspricht einer Nuttiefe von $a_{e,ges}$ = 1,5 mm bei einer Eingriffslänge l_w = 13 mm (Bild 1). Alle Versuche werden zur statistischen Absicherung dreifach durchgeführt.

Während der Schleifuntersuchungen werden die Prozesskräfte mit einem Dreikomponenten-Dynamometer aufgenommen. Der Profilverschleiß am Schleifwerkzeug wird ermittelt, indem ein Polyurethanblock geschliffen und am geschliffenen Negativ im Block die Höhe des Absatzes der Eingriffszone ermittelt wird. Weiterhin wird an 3D-Topografieaufnahmen der Mikroverschleiß der Schleifbelagstopografie ermittelt.

3 Hohe Fertigungsqualität bei hohem Zeitspanvolumen

Hohe Oberflächengüten der Spannuten ermöglichen einen ungehinderten Spänetransport und mindern den Verschleiß des Schaftwerkzeugs. Die gemittelte Rautiefe *Rz* der geschliffenen

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-10-86 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

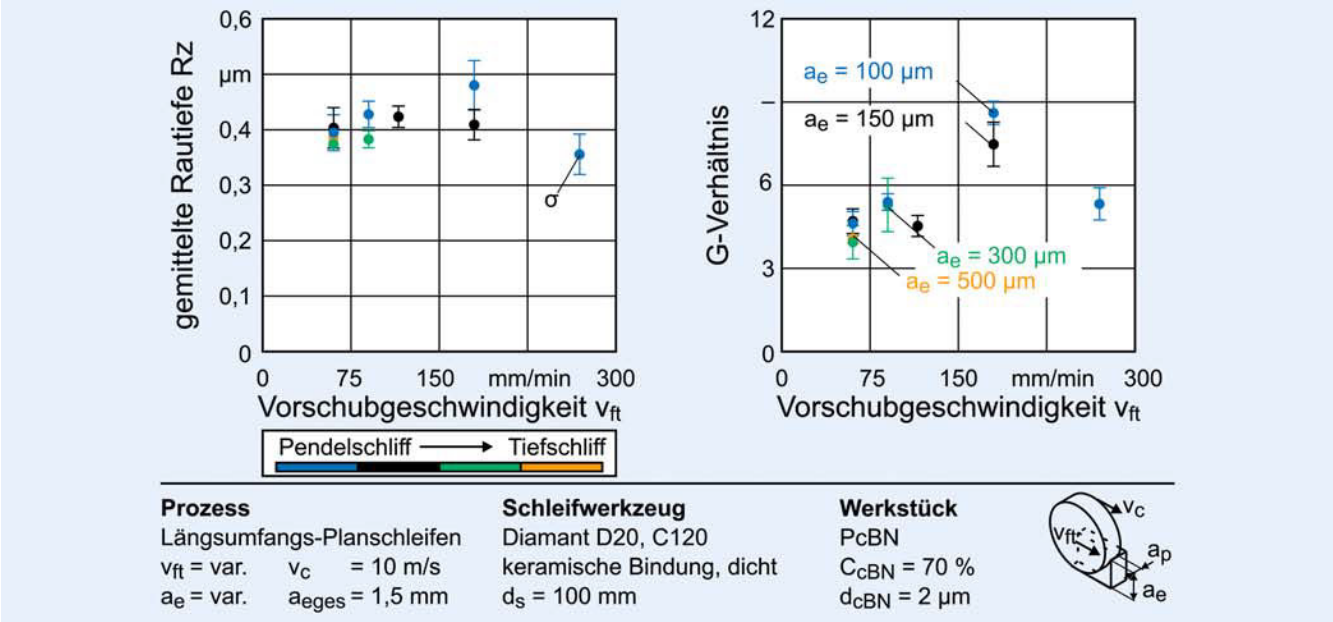

Bild 2. Einfluss der Prozessstellgrößen auf die Werkstückqualität. *Grafik IFW Hannover*

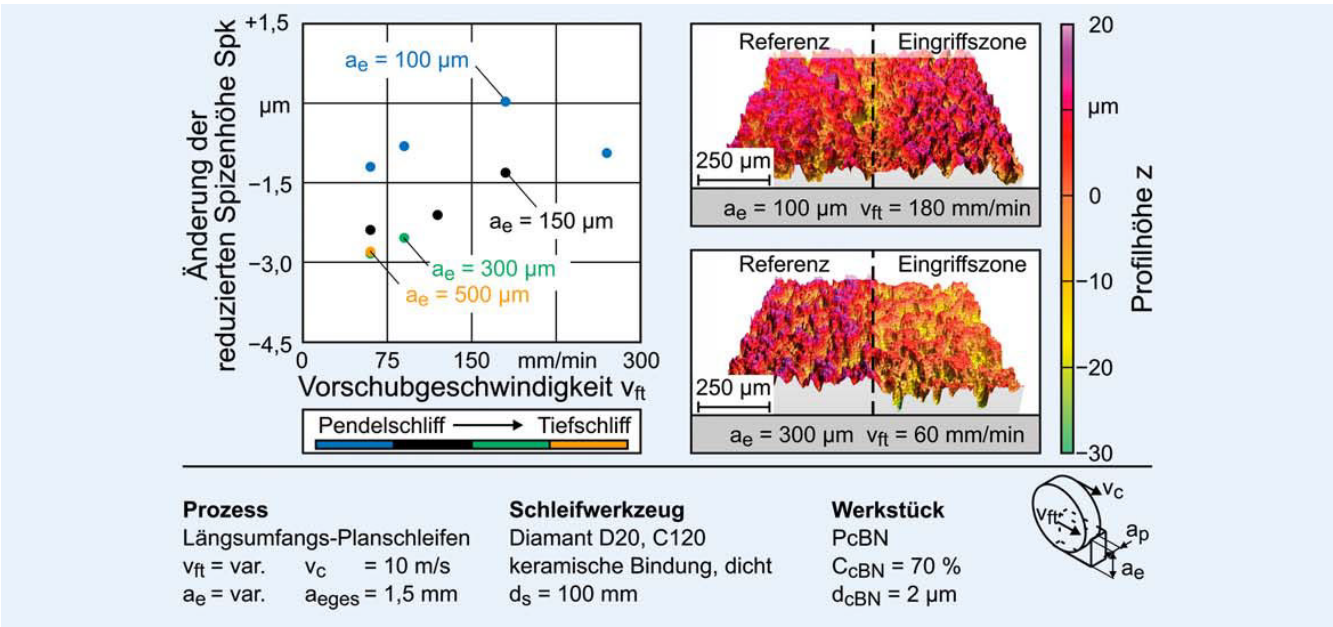

Bild 3. Vergleich der Schleifbelagstopografie in Abhängigkeit von Zustellung und Vorschubgeschwindigkeit. *Grafik IFW Hannover*

Spannuten ist gering und liegt im Bereich des Polierschleifens. Die Unterschiede zwischen variierten Prozessstellgrößen sind vernachlässigbar klein, jedoch tritt eine erhöhte Rauheit von Rz = 0,48 µm bei der Vorschubgeschwindigkeit v_{ft} = 180 mm/min und einer Zustellung von a_e = 100 µm auf.

Ein hoher Profilverschleiß am Schleifwerkzeug führt zu geometrischen Abweichungen am geschliffenen Werkstück. Es müsste unverhältnismäßig häufig abgerichtet werden, um dem Profilverschleiß entgegen zu wirken. Hohe G-Verhältnisse sind gleichbedeutend mit geringem Profilverschleiß. Bis zu einer Vorschubgeschwindigkeit v_{ft} = 180 mm/min steigt das G-Verhältnis auf G > 8,1 (**Bild 2**, rechts). Dies entspricht einem geringen Profilverschleiß Δr_s = 7,7 µm. Mit dem Erhöhen der Zustellung sinkt das G-Verhältnis. Der zugrundeliegende Mechanismus sowohl für die Oberflächengüte als auch für den Makroverschleiß kann auf verschleißbedingte Veränderungen am Schleifkorn zurückgeführt werden.

4 Selbstschärfung des Schleifbelags bei hoher Vorschubgeschwindigkeit

Der Mikroverschleiß am Schleifkorn hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Kontaktbedingungen zwischen Schleifwerkzeug und Werkstück. Beim Schleifen des PcBN ist ein signifikanter Einfluss der Prozessstellgrößen auf die Spitzen der Diamantkörner zu beobachten, während die poröse Struktur der Oberfläche keine Veränderungen zeigt (**Bild 3**, rechts). Die dargestellten Topografien sind bei gleichem Zeitspanvolumen Q'_w, aber

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-10-86 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

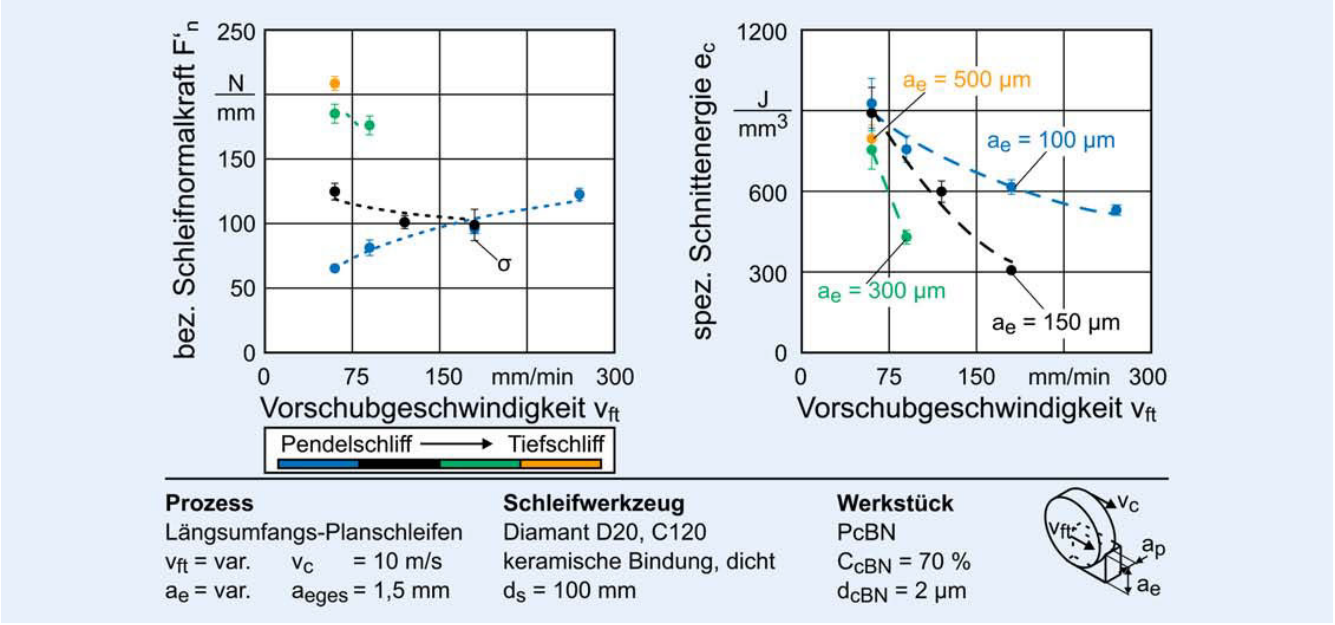

Bild 4. Einfluss der Prozessstellgrößen auf die Schleifnormalkraft und die spezifische Schnittenergie. *Grafik: IFW Hannover*

unterschiedlichen Schleifstrategien aufgenommen. Beim Pendelschliff mit der Zustellung a_e = 100 µm sind nach dem Schleifen weiterhin spitze Diamantkörner vorhanden. Hingegen bilden sich bei einer Zustellung a_e = 300 µm Kornabflachungen und ein abgesenktes Oberflächenprofil heraus. Die Veränderung der Diamantspitzen wird mit der reduzierten Spitzenhöhe *Spk* beschrieben. Im linken Diagramm von Bild 3 ist die Veränderung von *Spk* zwischen dem abgerichteten und eingesetzten Schleifbelag dargestellt.

Ein Steigern der Vorschubgeschwindigkeit v_{ft} erhöht die mechanische Belastung am Schleifkorn. Es splittert im Schleifkontakt mit dem hochharten PcBN und zeigt somit eine Selbstschärfung. Dieser Effekt ist vom produktiven Schleifen von PcBN-Wendeschneidplatten bekannt und führt zu einem geringen Profilverschleiß [9]. Entsprechend führt das Erhöhen von v_{ft} zu vermehrter Erzeugung neuer scharfer Schneiden – der Parameter *Spk* verändert sich bei hoher Vorschubgeschwindigkeit kaum. Erst bei v_{ft} = 270 mm/min kehrt sich dieser Effekt wieder um, da das Korn überlastet wird. Mit steigender Zustellung nimmt hingegen die Kontaktlänge des einzelnen Diamantkorns zu, sodass die thermische Belastung am Schleifkorn ansteigt. Dies führt zu vermehrten Kornabflachungen durch thermischen Verschleiß, die sich im Sinken von *Spk* äußern.

Die Rautiefe *Rz* aus Bild 2 sinkt analog zum Verringern der reduzierten Spitzenhöhe. Abgeflachte Diamantkörner erzeugen eine eingeebnete Werkstückoberfläche, während sich Kornspitzen im Werkstück abzeichnen. Die vermehrten Kornabflachungen bei erhöhten Zustellungen führen jedoch auch zu einer höheren mechanischen Belastung der spröden, keramischen Bindung. Die Bindung bricht und gibt verfrüht Körner frei, sodass das Schleifbelagsprofil rasch abgetragen wird. Daher sinkt mit steigender Zustellung das *G*-Verhältnis.

5 Vergleich zwischen Tief- und Pendelschliff

Die Schleifkraftkomponente normal zur Schleifrichtung F'_n ist eine Reaktionskraft, die nur indirekt auf den Werkstoffabtrag einwirkt. Wie zuvor beschrieben, können hohe Normalkräfte die spröde Keramikbindung überlasten und den Profilverschleiß fördern. Darüber hinaus können die Normalkräfte zu Ausbrüchen am sprödharten PcBN-Werkstück und Abdrängung des Schleifwerkzeugs führen. Mit der tangentialen Schleifkraftkomponente ist hingegen die spezifische Schnittenergie e_c verbunden. Sowohl das Trennen, als auch Reibung und Verformung beeinflussen die Schnittenergie. Beim Schleifen wird diese Schnittenergie vornehmlich in Wärme umgewandelt, die abgeführt werden muss. **Bild 4** zeigt die Einflüsse auf die Schleifnormalkraft und die spezifische Schnittenergie.

Das Erhöhen der Zustellung a_e bewirkt einen starken Anstieg der Schleifnormalkraft. Hingegen fällt der Anstieg der Schleifnormalkraft durch Erhöhen der Vorschubgeschwindigkeit deutlich geringer aus. Bei gleichem Zeitspanvolumen Q'_w sind die Prozesskräfte bei der Zustellung a_e = 100 µm mehr als 50 % geringer als bei der Zustellung a_e = 500 µm. Das abgeflachte Korn bei hoher Zustellung führt zu einer erhöhten Kontaktfläche mit dem PcBN, sodass sich hohe Normalkräfte einstellen. Bei gleichem Zeitspanvolumen Q'_w führt somit eine Nutenfertigung mit einem Pendelschliff mit einer geringen Zustellung von a_e = 100 µm zu signifikant geringeren Schleifnormalkräften als ein Nutentiefschliff mit a_e = 500 µm.

Die spezifische Schnittenergie e_c ist bei niedriger Vorschubgeschwindigkeit v_{ft} = 60 mm/min für die unterschiedlichen Zustellungen a_e ähnlich hoch. Wird die Vorschubgeschwindigkeit gesteigert, so sinkt die Schnittenergie. Bei geringer Zustellung fällt diese Verringerung schwächer aus als bei hoher Zustellung. Das scharfe Korn bei geringer Zustellung greift in die PcBN-Oberfläche ein, während das abgeflachte Korn bei hoher Zustellung über die Oberfläche gleitet. Es ist daher von einer effizienteren Zerspanung bei geringer Zustellung auszugehen.

6 Zusammenfassung

Beim Nutenschleifen des hochharten PcBN hat sich gezeigt, dass der Verschleiß des Schleifwerkzeuges mit der Zustellung zu-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-10-86 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

nimmt. Ab einer Zustellung a_e = 300 µm ist die Nutenfertigung ineffizient. Die starken Kornabflachungen führen zu hohen Prozesskräften und Kornausbruch. Hingegen stellt sich bei einer geringen Zustellung a_e = 100 µm ein Kornsplittern ein, sodass ein Selbstschärf-Effekt am Korn zu beobachten ist. Das Schleifwerkzeug bleibt schnittfähig und zeigt einen geringen Profilverschleiß.

Die Untersuchungen zeigen somit, dass ein Pendelschliff dem Nutentiefschliff bei der Bearbeitung von PcBN vorzuziehen ist. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit erhöhen sich die Schnittkräfte nur gering. Mit den Schnittparametern a_e = 100 µm und v_{ft} = 180 mm/min werden G-Verhältnisse $G > 8$ erreicht. Entsprechend des für das Schleifen von PcBN hohen G-Verhältnisses ist ein Zwischenabrichten beim Schleifen der Spannuten eines typischen Vollkopf-PcBN-Schaftwerkzeugs mit einem Durchmesser $d < 5$ mm nicht notwendig.

Aktuelle Forschungsschwerpunkte werden zeigen, wie Kornart, Korngröße und deren Konzentration den Schleifprozess beeinflussen. In zukünftigen Untersuchungen wird das Fertigen von Vollkopf-PcBN-Fräsern ausschließlich mittels Schleifen ermöglicht.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem „Bundesministerium für Wirtschaft und Energie“ und der FGW Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. für die organisatorische und finanzielle Unterstützung des Projektes „Ressourceneffizientes Schleifen von PcBN-Schaftwerkzeugen“ (IGF 20863 N).

Literatur

[1] Wacinski, M.: Keramische Schaftfräswerkzeuge für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Nickelbasis-Legierungen. Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2015
[2] Zhang, S.; Li, W.; Guo, Y. B.: Process design space for optimal surface integrity in finish hard milling of tool steel. Production Engineering 6 (2012) 4–5, S. 355–365
[3] Mapal ITS GmbH: Mapal und PCBN – es geht um mehr als nur den richtigen Schneidstoff. Werkzeug Technik 2016 (2008), S. 74
[4] Böhm, M.: Gühring (Schweiz) AG: Hartreiben statt Erodieren in gehärteten Stahl. SMM Schweizer Maschinenmarkt 111 (2011)
[5] Schulze, S.: CBN-Vollkopffräser – Eine neue Werkzeuggeneration für harte Fälle. 4. Symposium Produktionstechnik innovativ, Zwickau, 2013, S. 33–36
[6] Friemuth, T.: Herstellung spanender Werkzeuge. Habilitation, Leibniz Universität Hannover, 2002
[7] Behrens, L.: Schleifen von PCBN. Dr.-Ing. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2016
[8] Azarhoushang, B.; Stehle, T.; Frank, H. K. et al.: Effects of grinding process parameters on the surface topography of PCBN cutting inserts. International Journal of Abrasive Technology 8 (2017) 2, S. 121
[9] Denkena, B.; Grove, T.; Behrens, L. et al.: Wear mechanism model for grinding of PcBN cutting inserts. Journal of Materials Processing Technology 277 (2020), Artikel 116474

Prof. Dr.-Ing. **Berend Denkena**
Foto: IFW

Dr.-Ing. **Alexander Krödel**

Dominik Müller-Cramm, M. Eng.

Leibniz Universität Hannover
Institut für Fertigungstechnik
und Werkzeugmaschinen (IFW)
An der Universität 2, 30823 Garbsen
Tel. 0511 / 762-2553
mueller-cramm@ifw.uni-hannover.de
www.ifw.uni-hannover.de

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-10-86 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY-NC-ND