

## Titel

# Ressourceneffizientes Schleifen von PcBN-Schaftwerkzeugen

IGF-Nr.: 20863 N

## Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung: Leibniz Universität Hannover, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Garbsen (IFW)



Institut für Fertigungstechnik  
und Werkzeugmaschinen

Ansprechpartner beim Institut:

M. Eng. Dominik Müller-Cramm  
0511 / 762.19420  
mueller-cramm@ifw.uni-hannover.de

## Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 20863 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

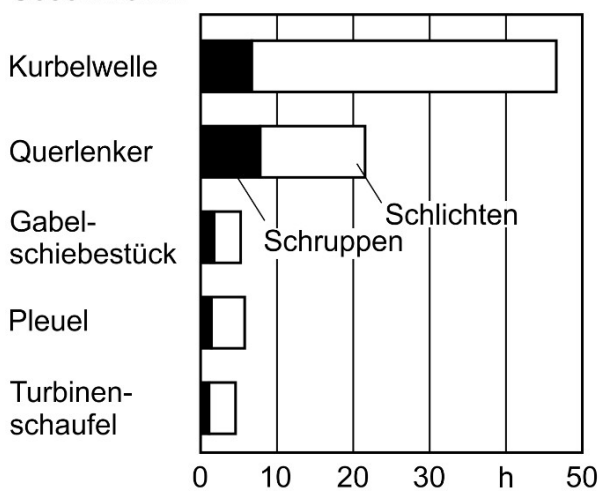
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Ausgangssituation

Die Verfügbarkeit hochharter Schneidstoffe für Zerspansaufgaben mit geometrisch bestimmter Schneide ermöglicht die produktive Dreh-, Reib- und Fräsbearbeitung vergüteter oder gehärteter Werkstücke. Im Werkzeug- und Formenbau hat das HSC-Fräsen (high speed cutting) unter Einsatz des hochharten polykristallinen Bornitrids (PcBN) als Schneidstoff wesentliche Vorteile gegenüber den bisher genutzten Prozessschritten des Schleifens und Senkerodierens [ENS99]. Diese Komplettbearbeitung der gehärteten Werkstücke bietet aufgrund kürzerer Prozesszeiten und der Vermeidung weiterer Aufspannungen großes wirtschaftliches Potenzial [STE93, WAC16]. Weiterentwicklungen bei Werkzeugmaschinen und die Einführung hochharter Schneidstoffe haben im Werkzeug- und Formenbau dazu geführt, dass die Werkstücke häufig in vergütetem oder gehärtetem Zustand mit geometrisch bestimmter Schneide zerspant werden. Diese Hartbearbeitung kann die Prozesse Schleifen, Erodieren und manuelle Nacharbeit ersetzen, wodurch die Fertigungskosten verringert werden und die Fertigungskette verkürzt wird. An die Hartbearbeitung bis einschließlich des Fertigschlichtens werden hohe Anforderungen bezüglich geringer Fertigungstoleranzen und hoher Oberflächengüten der Funktionsflächen gestellt, da diese Fertigungsprozesse die letzten spanenden Bearbeitungsschritte sind [BIE91]. Schaftwerkzeuge werden für die Hartbearbeitung in verschiedenen Ausführungen eingesetzt. Reibahlen dienen der Herstellung engtolerierter Bohrungen der Toleranzfelder IT5 bis IT8 [AGA02]. Für die Herstellung von Spritzgießwerkzeugen konnte durch die Substitution des Erodierens durch Hartbohren und -reiben die Bearbeitungszeit je Bohrung von 35 Minuten auf eine Sekunde verringert werden [GÜH11]. Die HSC-Fräsbearbeitung von Gesenken mit Schaftfräsworkzeugen ermöglicht schon derzeit eine Verringerung der Bearbeitungszeit von bis zu 60 % im Vergleich zum Schleifen oder Erodieren. Auf den Schlichtprozess eines Gesenks entfallen bis zu 85 % der Bearbeitungszeit mittels Kugelkopffräsworkzeugen (Abbildung 1).

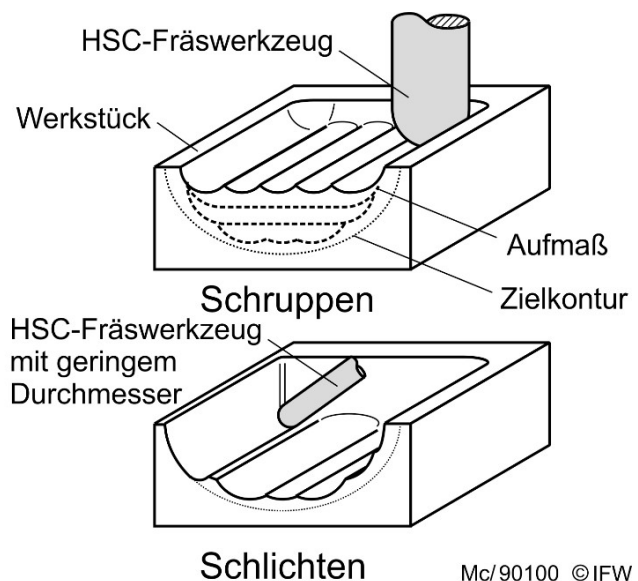
### Gesenkform:



Quelle: [BIE91]

**Bearbeitungszeit Fräsen**

**Abbildung 1: Bearbeitungszeit beim Fräsen typischer Schmiedegesenke**



Mc/90100 © IFW

Als Schneidstoffe werden bei der Hartbearbeitung vorrangig Feinstkornhartmetalle mit PVD-Beschichtung, Cermets und PCBN eingesetzt. Sowohl Werkzeuge aus Cermet als auch aus Hartmetall verschleifen schon nach kurzer Einsatzzeit durch Ausbrüche an der Schneidkante. PCBN-Schneidstoffe hingegen verschleifen bei der Hartfeinbearbeitung nur gering [WEI97]. Die Standzeit der PCBN-Schaftwerkzeuge ist bis zu 25 mal höher als die vergleichbarer Hartmetall-Schaftwerkzeuge. Darüber hinaus ist der Verschleißfortschritt nahezu linear [MAP08, BEH16]. Das Potenzial des PcBN in der Hartfeinbearbeitung der Formen und Gesenke liegt in der hohen spezifischen Härte und Temperaturbeständigkeit begründet [KRE07]. Die Grundvoraussetzung für den Einsatz von PcBN ist die Wirtschaftlichkeit in der Anwendung [BUR81, ZEL98]. PcBN weist bei der Hartbearbeitung unter geeigneten Randbedingungen gegenüber anderen Schneidstoffen wie Hartmetall (HM), Schneidkeramik oder Cermet zwar eine deutlich höhere Standzeit auf, ist jedoch mit höheren Anschaffungskosten für entsprechende Werkzeuge verbunden. Für Fräswerkzeuge wurde im Durchmesserbereich 0,3 – 20 mm die Herstellbarkeit von Voll-PcBN-Werkzeugen und für Reibahlen mit Durchmessern von 3 mm bis 10 mm nachgewiesen [MAP08, SCH13]. Der hohe Preis von PcBN-Werkzeugen ist auf den Herstellungsprozess zurückzuführen. Der formgebende Prozessschritt bei der Herstellung von Schaftwerkzeugen aus PcBN ist das Schleifen mittels Diamantschleifscheiben. Die Bearbeitung von PcBN-Schaftwerkzeugen durch das Schleifen ist sehr zeitintensiv und durch einen hohen Werkzeugverschleiß gekennzeichnet. Damit ist der Prozess im Vergleich zum Schleifen von Hartmetall unproduktiv [BUT03, WEN03]. Trotz der Vorteile von PCBN-Schaftwerkzeugen konnten sich diese bislang hauptsächlich wegen dieser höheren Werkzeugkosten nicht gegenüber Werkzeugen aus Hartmetall durchsetzen.

Der Rohling eines PcBN-Schneidwerkzeugs wird mittels Sintern hergestellt. Die Makrogeometrie und die Oberflächenqualität des Zerspanungswerkzeugs werden durch die nachfolgende Schleifbearbeitung, die den höchsten Anteil der Fertigungskosten hat, wesentlich beeinflusst [FRI02]. Die Rauheit der bearbeiteten Oberflächen ist anteilig an der Schartigkeit der Schneidkante beteiligt. Eine nachfolgende Schneidkantenpräparation kann mittels Polierschleifen oder Laserschneiden erfolgen. Diese kann jedoch eine hohe vorausgegangene Schartigkeit nicht ausgleichen [DEN17, VEN14]. Die Bearbeitungsschritte der spanenden Bearbeitung von Schneidplatten mittels des Seiten-Planschleifens und der spanenden Bearbeitung rotationssymmetrischer Werkzeuge mittels Umfangsschleifen sind analog zu einander zu betrachten. Abbildung 2 auf der nachfolgenden Seite zeigt die Bearbeitungsschritte für das Schleifen der beiden Werkzeugtypen. Im zweiten Prozessschritt wird ein im Vergleich zu den weiteren Prozessschritten großes Zerspanvolumen abgetragen. Dessen Zeitanteil an der Gesamtbearbeitungszeit ist mit 65 % bis 80 % (Quer-Seiten-Planschleifen) und 55 % bis 70 % (Längs-Umfangs-Planschleifen) hoch. Bei Wendeschneidplatten wird hiermit der Plattengröße, die Freiflächengeometrie und der Eckenradius festgelegt, während bei Schaftwerkzeugen die Geometrie der Spannut und somit die Spanfläche und Teile der Freifläche der vorausgehenden Schneide festgelegt werden. In beiden Schleifprozessen sind die geometrische Kontaktlänge und -fläche sowie das Zerspanvolumen groß [FRI02].

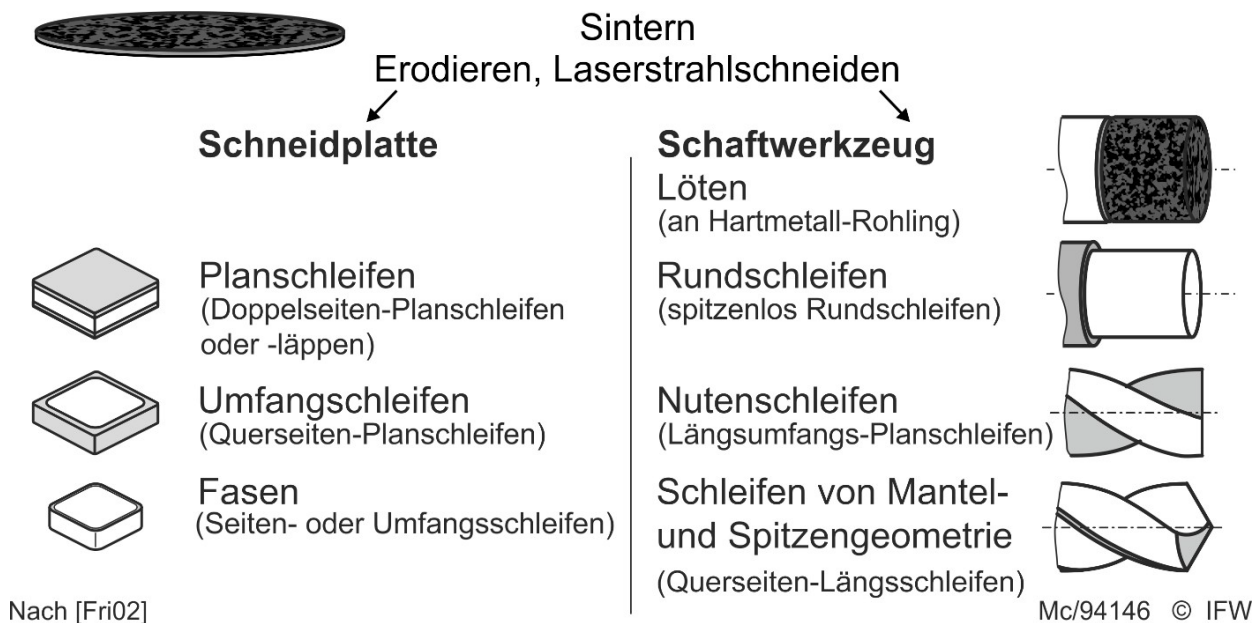


Abbildung 2: Prozessschritte der Schleifbearbeitung von PCBN-Zerspanungswerkzeugen

Der Hauptgrund für die hohen Fertigungskosten zur Herstellung der PcBN-Schaftwerkzeuge ist der hohe Verschleiß des verwendeten Schleifwerkzeugs. Die Schleifgüte  $G$  ist das Verhältnis des Zeitspanvolumens  $Q'_w$  zur Verschleißrate des Werkzeugs  $Q'_s$ . Nach derzeitigem Stand der Technik sind Schleifgüten von  $G = 0,5 - 4,0$  beim Umfangsschleifen von Wendeschneidplatten aus PcBN erreichbar. Somit wird derzeit bis zu zweimal so viel Schleifscheibenbelagsvolumen benötigt, wie PcBN geschliffen wird [BEH16]. Damit liegt die Produktivität weit hinter der Schleifbearbeitung von Wendeschneidplatten aus Hartmetall ( $G = 220 - 280$ ) oder Cermet ( $G = 25 - 45$ ) [FRI02]. Die Verschleißraten beim Schleifen von PcBN-Schaftwerkzeugen sind infolge der hohen mechanischen und thermischen Werkzeugbelastung im Umfangsschleifprozess gleich hoch oder höher als bei der Bearbeitung von Wendeschneidplatten. Der hohe Verschleiß am Schleifwerkzeug führt nicht nur dazu, dass eine erhöhte Anzahl an Schleifwerkzeugen für die Bearbeitung von PcBN im Vergleich zur Bearbeitung von Hartmetall benötigt wird. Er bewirkt auch unmittelbar erhöhte Abweichungen in der Makro- und Mikrogeometrie der Schaftwerkzeuge. Die Schartigkeit der Schneiden und die Rauheit der Spanflächen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Standzeit des Werkzeugs und Qualität der bearbeiteten Oberflächen. Mit steigender Schartigkeit der Schneiden steigt die minimal erzielbare Rauheit am Werkstück [NGU07]. Weiterhin können die mikrogeometrischen Abweichungen zu einer verminderten Standzeit der Schaftzeuge infolge des adhäsiven und abrasiven Verschleißes führen [NEI95], sodass ein wirtschaftlicher Einsatz von PCBN-Schaftwerkzeugen heute nur in Einzelfällen möglich ist. Die makrogeometrischen Abweichungen führen beim Einsatz von PcBN-Fräswerkzeugen in der HSC-Bearbeitung zu erhöhter Rauheit der Funktionsflächen und somit zu einer verminderten Fertigungsqualität [NGU07].

Für das Längsumfangs-Planschleifen der Spannut von Schaftwerkzeugen aus Hartmetall werden heute vorwiegend Diamantschleifwerkzeuge mit hybrider oder Kunstharzbindung eingesetzt. Diese Bindungen wirken aufgrund ihrer geringen Härte

schwingungsdämpfend und sind einfach zu konditionieren. Die elastische Nachgiebigkeit der Kunstharzbindung ermöglicht im Polierschleifprozess hohe Oberflächengüten ( $R_z < 2 \mu\text{m}$ ). Nachteilig ist ihre Zersetzungstemperatur von  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , die im Nutenschleifprozess infolge der Prozesswärme auftreten kann [HEY15]. Bei der Bearbeitung der HM-Schaftwerkzeuge ist die Verschleißrate des Schleifwerkzeugs gering ( $G = 220 - 280$ ) im Vergleich zum Schleifen von PcBN ( $G = 0,5 - 4$ ) [FRI02, BEH16].

Bei der Nutenbearbeitung tritt am Schleifwerkzeug ein axial unterschiedlich hoher Profilverschleiß am Schleifwerkzeug auf. Die örtlich unterschiedlich hohe Verschleißrate kann im Schleifprozess zu Geometrieabweichungen außerhalb der Fertigungstoleranz, Bruch des Schaftwerkzeug-Rohlings infolge hoher Prozesskräfte und einer geringen Produktivität des Schleifwerkzeugs führen. Die Schaftwerkzeuge werden derzeit mit einem Werkzeugdurchmesser von bis zu  $20 \text{ mm}$  gefertigt [MAP08]. Das Zerspanvolumen beim Schleifen der Spannut ist daher hoch im Vergleich zum Schleifen der Freiflächen von PcBN-Wendeschneidplatten und stellt eine wesentliche technologische Grenze dieses Schleifprozesses dar. Die Fertigungseinzelkosten für PcBN-Schaftwerkzeuge sind daher hoch und die Prozesssicherheit ist gering im Vergleich zur Schleifbearbeitung von HM-Werkzeugen [SCH13].

Insbesondere in der Bearbeitung von PcBN-Dickschicht- und Voll-PCBN-Wendeschneidplatten wurden am Institut wesentliche Erklärungsmodelle und deren beinhaltende Wirkmechanismen für die geometrisch unbestimmte Zerspanung, Laserbearbeitung, Tribologie und über das Einsatzverhalten der PcBN-Wendeschneidplatten hergeleitet werden. Friemuth ermöglichte beim Querseiten-Planschleifen von hartstoffverstärkten, keramischen Wendeschneidplatten eine Erhöhung des Zeitspanvolumens um  $400 \%$  bei einem konstanten Kraftniveau mittels In-Prozess-Schärfen. Er ermittelte eine übergeordnete Bedeutung der Diamantkorngröße für die Ausbildung der Schneidkante und der Oberflächen im Vergleich zu allen anderen Stellgrößen [FRI99]. Ventura ermöglichte erstmalig eine Schleifbearbeitung der Mikrogeometrie von PcBN-Schneidkanten, indem er die verrundete Schneidkantengeometrie mittels facettierter Mikrofasen im Eckenradius  $r_\varepsilon$  approximierte. Mit dieser Bearbeitungsstrategie konnte die Standzeit der Schneide beim Hartdrehen um  $37 \%$  gegenüber der unverrundeten Schneide erhöht werden. Ferner ermittelt Ventura, dass die Oberflächenqualität des geschliffenen PcBN von Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit unabhängig ist [VEN14].

Am IFW wurde im Rahmen des DFG-Forschungsprojekts DE 447/98-1 „Verschleißmechanismen beim Schleifen von PcBN-Wendeschneidplatten“ ermittelt, dass der Werkzeugverschleiß des Schleifwerkzeugs wesentlich von den Prozessstellgrößen des Schleifprozesses und im untersuchten Variationsraum nicht signifikant von der Spezifikation des Schleifwerkzeugs beeinflusst wird. In Abbildung 3 ist der Einfluss von Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit auf die Schleifgüte  $G$  dargestellt. Das Verhältnis von Vorschub- zur Schnittgeschwindigkeit ist äquivalent zur kontakt-längenbezogenen äquivalenten Spannungsdicke  $h'_{\text{eq}} (= v_{\text{fa}}/v_{\text{c}})$ . Hohe  $G$ -Verhältnisse werden bei einer hohen äquivalenten Spannungsdicke erreicht.

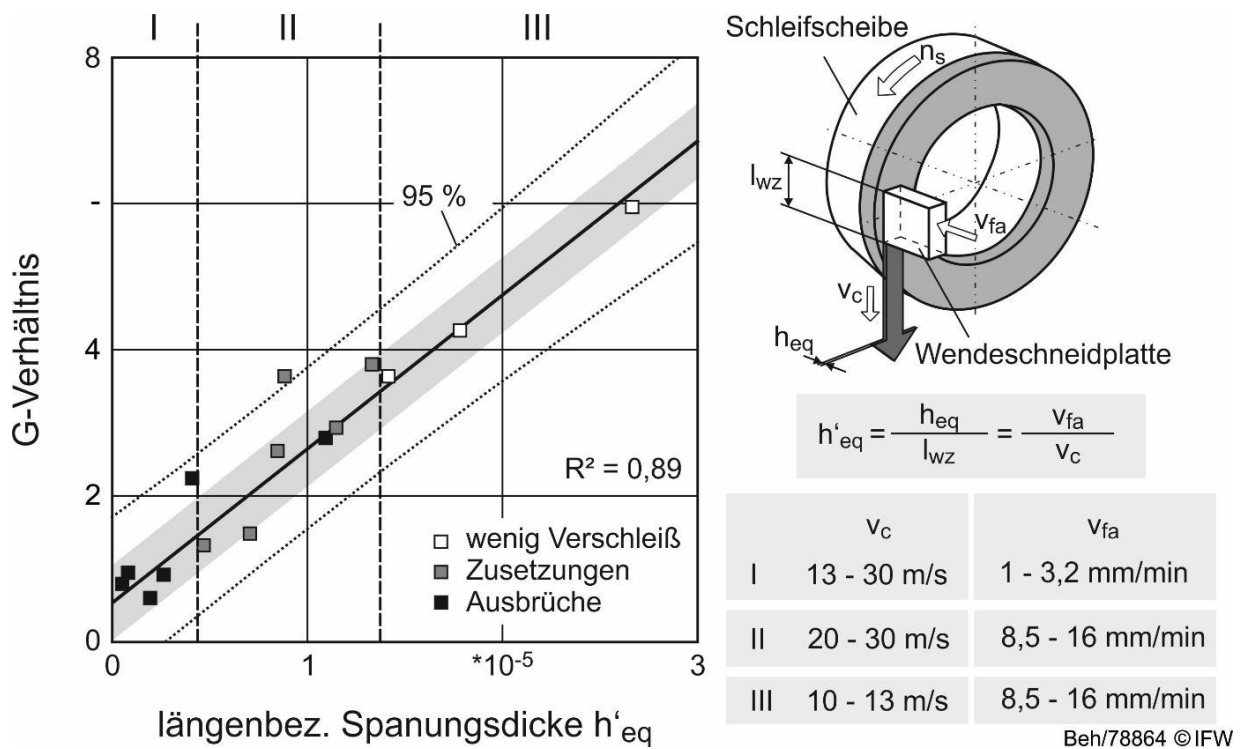


Abbildung 3: Einfluss der Prozessstellgrößen des Quer-Seiten-Planschleifens auf den Verschleiß des Schleifwerkzeugs [Beh16]

Bei hoher Vorschub- und geringer Schnittgeschwindigkeit (Bereich III) splittet das Diamantkorn im Schleifprozess, sodass eine Selbstschärfung des Schleifwerkzeugs stattfindet. Hingegen führt eine geringe Spannungsdicke zu vermehrtem anteiligen Reibkontakt der Wirkpartner und somit zu einem raschen Abstumpfen des Schleifkorns. Für PcBN-Werkstoffe wurde ermittelt, dass mit steigendem Schleifkorndurchmesser sowohl die Rauheit der Freifläche als auch die Schartigkeit der Schneidkante steigt. Somit werden durch geeignete Parametrierung des Schleifprozesses und geeignete Schleifwerkzeugspezifikation sowohl ein geringer Werkzeugverschleiß als auch eine hohe Oberflächenqualität erreicht [BEH16]. Die unterschiedliche Prozesskinematik des Quer-Seiten-Planschleifens und des Längs-Umfangs-Planschleifens unterscheidet sich erheblich. Entsprechend sind unterschiedliche Prozessstellgrößen im jeweiligen Schleifprozess vorhanden. Die bekannten Prozessstellgrößenkombinationen des Quer-Seiten-Planschleifens müssen für das Längs-Umfangs-Planschleifen adaptiert.

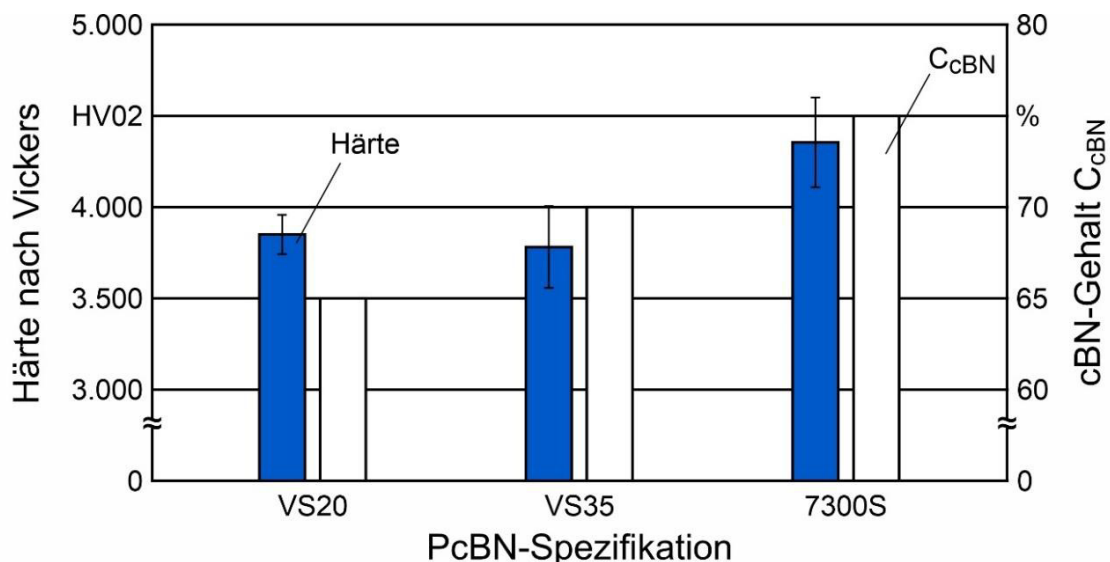
In diesem Forschungsvorhaben wurde mittels geeigneter Prozessstellgrößen und angepasster Schleifwerkzeugspezifikationen der Verschleiß der Schleifwerkzeuge bei der Schleifbearbeitung von PcBN-Schaftwerkzeugen um den Faktor 15 verringert. Weiterhin wurden Vorrichtungen und Strategien entwickelt, die Ausbrüche am PcBN-Schaftwerkzeug bei der Schleifbearbeitung verhindern können und somit die Prozesssicherheit wesentlich steigern.

## Forschungsziel

Das Ziel dieses Vorhabens war die Verfügbarkeit eines Umfangsschleifprozesses zur Bearbeitung von PcBN-Schaftwerkzeugen, der unter dem spezifischen, lokal unterschiedlichen Verschleißverhalten des Schleifwerkzeugs produktivitäts- und qualitätsangepasst eingesetzt werden kann. Hierbei waren im Wesentlichen vier Teilziele zu erreichen. Das erste Teilziel bestand im Bereitstellen von Prozessstellgrößenkombinationen für das Längs-Umfangs-Planschleifen bei der Spannutenbearbeitung von PcBN-Schaftwerkzeugen, die eine produktive Bearbeitung des Werkstoffs ermöglichen. Das zweite Teilziel umfasste die Bereitstellung eines simulations-gestützten Entwicklungsprozesses. Hierdurch sollen Schleifwerkzeuge mit gleichmäßigem, geringem Verschleiß bei unterschiedlicher örtlicher Kornbelastung ausgelegt werden können. Im dritten Teilziel sollten die geometrische Abweichungen des hohen Werkzeugverschleißes mittels eines angepassten Abrichtprozesses reduziert werden. Mit dem vierten Teilziel erfolgte das Bereitstellen eines kombinierenden Schleifprozesses, der eine wesentliche Erhöhung der Produktivität und Qualität der Schleifbearbeitung von PcBN-Schaftwerkzeugen im Vergleich zur Fertigungsstrategie nach dem Stand der Technik darstellte.

## Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurde die Härte der unterschiedlichen PcBN-Spezifikationen mittels des Vickers Härteprüfgeräts Q10 A+ der Firma Qness nach ISO 6507 HV02. Die ermittelten Vickershärten sind in Abbildung 4 dargestellt.



**Messgerät**

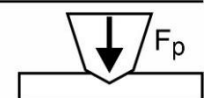
Qness Q10A+

**Prozess**

Härteprüfung nach Vickers

**Stellgrößen**

Prüfkraft  $F_p = 1,96 \text{ N}$



Mc/115106 © IFW

Abbildung 4: Einfluss des cBN-Gehalts auf die Härte der PcBN-Spezifikation

Die Spezifikationen VS20 und VS35 haben jeweils eine durchschnittliche PcBN-Partikelgröße  $d_{cBN} = 2 \mu\text{m}$ . Der cBN-Gehalt betrug bei der PcBN-Spezifikation VS20 65 m%, während die Spezifikation VS35 einen cBN-Gehalt von 70 m% aufweist. Die Härte dieser beiden PcBN-Spezifikationen war im gleichen Härtebereich (VS20:  $3.805 \pm 108 \text{ HV02}$ , VS35  $3.736 \pm 204 \text{ HV02}$ ). Die Spezifikation 7300S hatte einen cBN-Anteil von 75 m%. Bei dieser Spezifikation betrug die durchschnittliche PcBN-Partikelgröße  $6 \mu\text{m}$ . Für die Spezifikation 7300S wurde eine signifikant höhere Härte  $4.416 \pm 248 \text{ HV02}$  ermittelt.

Je PcBN-Spezifikation wurden Schleifwerkzeuge eines Schleifwerkzeugherstellers eingesetzt. Hierbei wurde der jeweilige Schleifwerkzeughersteller durch den projektbegleitenden Ausschuss (PA) der jeweiligen PcBN-Spezifikation zugewiesen. Eine geeignete Prozessstellgrößenkombination war zu Beginn des Projekts nicht bekannt. Somit wurde zunächst eine Prozessstellgrößenkombination ermittelt, die auf ähnlichen Fertigungsprozessen basierte. Hierfür wurden die bekannten Wirkzusammenhänge beim Quer-Seiten-Planschleifen von PcBN-Wendeschneidplatten auf das Umfangs-Schleifen von PcBN-Schaftwerkzeugen übertragen. Die beiden Schleifprozesse haben eine unterschiedliche Prozesskinematik, die voneinander verschiedene Einflüsse der Prozessstellgrößen auf den Verschleißmechanismus der Schleifwerkzeuge bedingen. Die äquivalente Spannungsdicke  $h_{eq}$  und kinematische Kontaktlänge  $l_k$  ermöglichen einen Transfer der mechanischen Belastung des Schleifwerkzeugs, während die Schnittenergie  $e_c$  einen Vergleich der thermischen Belastung ermöglicht. Der Transfer der Erkenntnisse erfolgte zunächst mathematisch über Berechnung der äquivalenten Spannungsdicke von  $h_{eq} = 2 \cdot 10^{-5}$ , die kinematische Kontaktlänge von  $l_k = 14 \text{ mm}$  und einer Schnittenergie von  $e_c = 80 \text{ J/mm}^3$ . Diese Größen wurden aus der produktiven Schleifbearbeitung beim Querseiten-Planschleifen ermittelt. Entsprechend der unterschiedlichen Kinematik beider Prozesse wurde nachfolgend die Prozessstellgrößenkombination aus Vorschubgeschwindigkeit von  $v_{ft} = 10,8 \text{ mm/min}$ , Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 11 \text{ m/s}$  und Eingriffstiefe  $a_e = 1,6 \text{ mm}$  berechnet, die beim Längs-Umfangs-Planschleifen die gleiche kinematische Kontaktlänge  $l_k$  und die gleiche äquivalente Spannungsdicke  $h_{eq}$  hat. Auf diesem Erkenntnistransfer aufbauend, wurde mittels Schleifversuchen im Längs-Umfangs-Planschleifen der Einfluss der Prozessstellgrößen des Schleifprozesses auf das Verschleißverhalten des Schleifwerkzeugs an drei PcBN-Spezifikationen unterschiedlicher Härte untersucht.

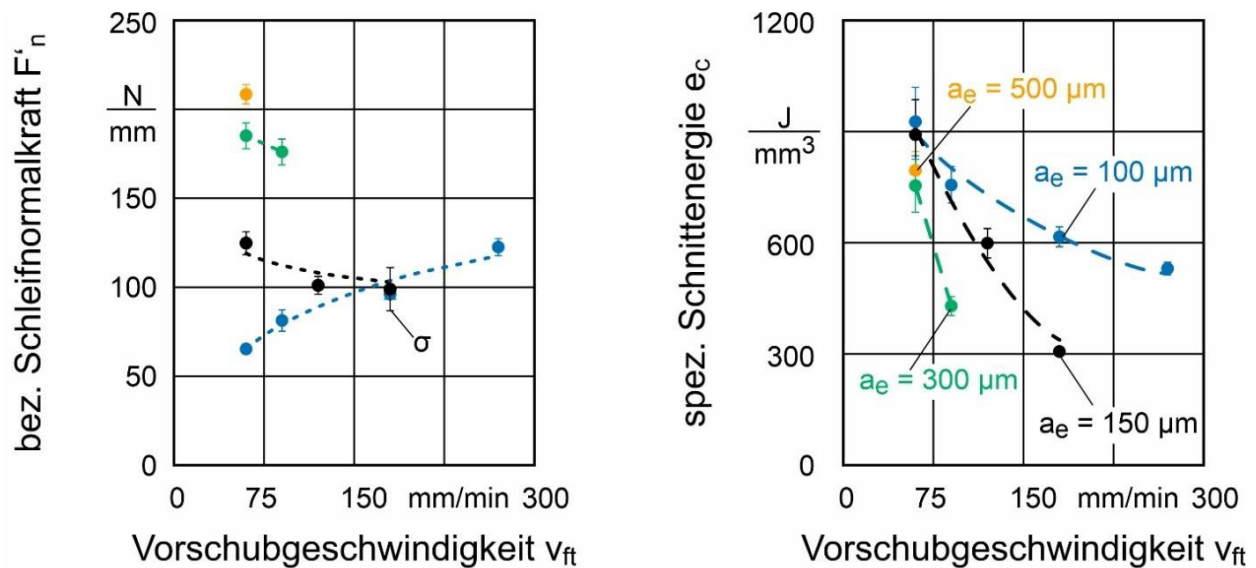
In den Untersuchungen zeigte sich, dass der Transfer der Ergebnisse vom Quer-Seiten-Planschleifen auf das Längs-Umfangsschleifen über gleiche Kontaktbedingungen nicht zielführend war. Beim Quer-Seiten-Planschleifen war die Kontaktlänge  $l_k$  groß und betrug regulär die Kantenlänge des Werkstücks von ca.  $14 \text{ mm}$ . Die resultierende große Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug konnte beim Quer-Seiten-Planschleifen bearbeitet werden, da Vorschub- und Schnittrichtung orthogonal zueinander angeordnet sind und das Aufmaß gering ( $< 100 \mu\text{m}$ ) war. Die etwaige Abdrängung konnte somit maximal die Dicke des geringen Aufmaßes betragen. Dies führte zu erhöhten Prozesskräften, die das Eindringen der Diamanten in die



Werkstückoberfläche begünstigten. Beim Längs-Umfangsschleifen sind hingegen die Vorschub- und Schnittrichtung parallel zueinander angeordnet. Um eine vergleichbar hohe Kontaktlänge zum Querseiten-Planschleifen zu erreichen, musste eine Zustellung  $a_e = 1,6 \text{ mm}$  gewählt werden. Der Längsschnitt der Eingriffszone ist bei diesem Schleifprozess rampenförmig. Durch die Relativbewegung von Schleifwerkzeug- und Werkstückoberfläche erfolgte ein Abgleiten des Schleifwerkzeugs vom Werkstück, sodass es zu einer sehr hohen Abdrängung des Schleifwerkzeugs kam. Aus dieser sehr hohen, makroskopischen Abdrängung resultierten unzulässig hohe Reaktionskräfte, die zu einer Überlastung des Schleifbelags und somit zum Schleifwerkzeugbruch führten.

Die Bearbeitung von PcBN mittels Längs-Umfangsschleifen als Tiefschleifoperation wurde daher verworfen und stattdessen erfolgte für alle weiteren Schleifuntersuchungen des Forschungsprojekts die Schleifstrategie mittels Pendelschliff. Mit dieser Bearbeitungsstrategie wurde daher die Zustellung in den beiden Stufen  $a_e = 100 \mu\text{m}$  bis  $a_e = 500 \mu\text{m}$  mit Variation der Vorschubgeschwindigkeit  $v_{ft} = 60 - 270 \text{ mm/min}$  und der Schnittgeschwindigkeit  $v_c = 9 - 10 \text{ m/s}$  gegenübergestellt.

Mit Erhöhen der Zustellung weist der Prozess die Charakteristik eines Nutentiefschliffs auf. Hingegen führt ein Erhöhen der Vorschubgeschwindigkeit zur Charakteristik eines Pendelschliffs. Es wurde ermittelt, dass bei gleichen Zeitspanvolumina  $Q'_w$ , also insgesamt gleicher Bearbeitungszeit, eine Bearbeitungsstrategie mit geringer Zustellung zu einem signifikant geringeren Normkraftanteil der bezogenen Schleifkräfte, höheren G-Verhältnissen und geringerem Kantenverschleiß führt. In Abbildung 5 sind die Ergebnisse zusammengefasst.



Prozess	Schleifwerkzeug	Werkstück
Längs-Umfangs-Planschleifen	Diamant D20, C120	PcBN VS35
$v_{ft} = \text{var.}$	$v_c = 10 \text{ m/s}$	$C_{cBN} = 70 \%$
$a_e = \text{var.}$	keramische Bindung, dicht	$d_{cBN} = 2 \mu\text{m}$
	$d_s = 100 \text{ mm}$	

Abbildung 5: Einfluss der Prozessstellgröße  $a_e$  und  $v_{ft}$  auf die Prozessgrößen  $F'_n$  und  $e_c$

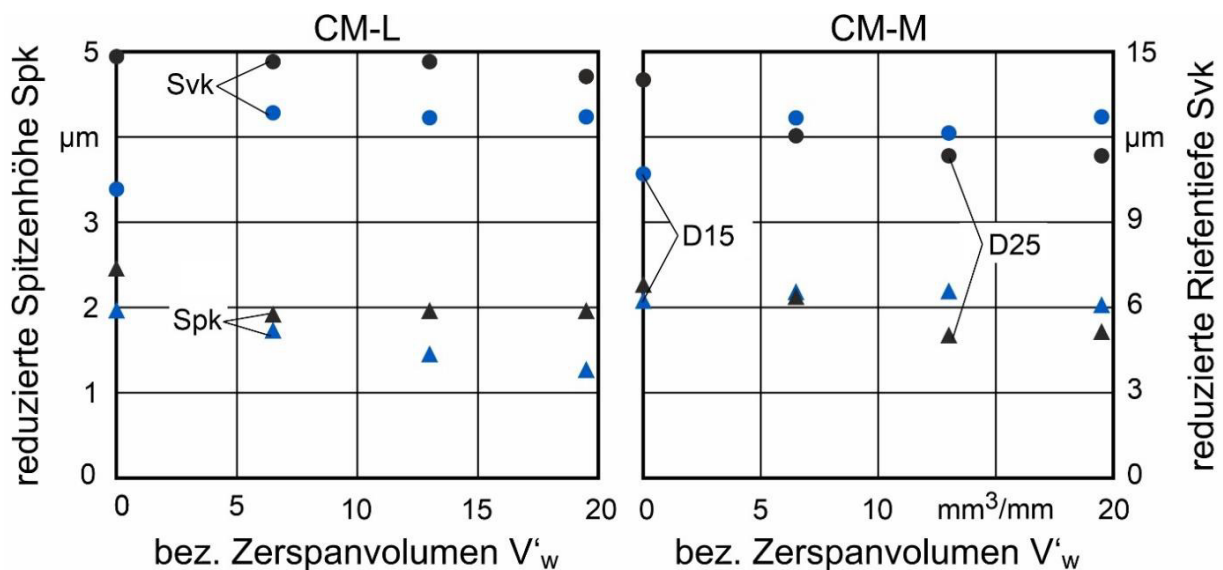
Eine Erhöhung der Zustellung  $a_e$  führte zu einem starken Anstieg der Schleifnormalkraft  $F'_n$ . Hingegen stieg die Schleifnormalkraft mit Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit im Vergleich zur Steigerung der Zustellung deutlich geringer. Bei gleichem

Zeitspanvolumen  $Q'_w$  waren die Prozesskräfte bei der Zustellung  $a_e = 100 \mu\text{m}$  mehr als 300 % geringer als bei der Zustellung  $a_e = 500 \mu\text{m}$ . Der unterschiedlich starke Effekt dieser beiden Prozessstellgrößen auf die Prozesskräfte konnte auf unterschiedliche Verschleißmechanismen zurückgeführt werden.

Die spezifische Schnittenergie  $e_c$  war bei niedriger Vorschubgeschwindigkeit  $v_{ft} = 60 \text{ mm/min}$  für die unterschiedlichen Zustellungen  $a_e$  ähnlich hoch. Durch Steigern der Vorschubgeschwindigkeit sank die Schnittenergie. Bei geringer Zustellung war diese Verringerung schwächer ausgeprägt als bei hoher Zustellung. Es wird vermutet, dass das scharfe Korn bei geringer Zustellung in die PcBN-Oberfläche eingriff, während das abgeflachte Korn bei hoher Zustellung über die Oberfläche glitt. Es ist daher von einer effizienteren Zerspanung bei geringer Zustellung auszugehen. Aus diesem Grund erfolgte die Auswertung der Schleifbelagstopografie.

Die nachfolgenden Untersuchungen betrachteten die Schleifbelagsspezifikation. Insbesondere wurde untersucht, inwieweit der positive Effekt des Kornsplitters verstärkt werden konnte. Es wurden hierfür zwei Diamantkornarten in jeweils zwei Korngrößen untersucht. Die Kornarten unterscheiden sich signifikant in Form, Größe und Streuung der Korngröße. Das Diamantkorn CM-L ist sehr unregelmäßig geformt. In der Korngröße D15 ist es scheibenförmig und hat eine Normalverteilung der Korngröße mit einem Mittelwert des Korndurchmessers  $d_g = 15,9 \mu\text{m}$ . In Korngröße D25 ist die Korngrößenverteilung weiter gespreizt und damit gleichmäßiger verteilt, wie die Standardabweichung der Korngröße  $\sigma_{dg} = 3,04 \mu\text{m}$  zeigt. Infolge seiner stark unregelmäßigen Form ist davon auszugehen, dass CM-L eine geringere mechanische Stabilität hat. Das Diamantkorn CM-M weist eine kompaktere, regelmäßiger Form auf als CM-L. Der Mittelwert der Korngrößenverteilungen ist sowohl bei D15 als auch bei D25 größer als beim Diamantkorn CM-L. In der Korngröße D15 weist die Korngrößenverteilung eine geringere Standardabweichung auf.

Das Verschleißverhalten von Schleifwerkzeugen ist nach dem Stand des Wissens nicht linear und untergliedert sich in die Einschleifphase, eine Phase mit linear zunehmendem Verschleiß und einer Phase mit überproportionalem Verschleiß zum Standzeitende. In einem vollfaktoriellen Versuchsplan wurden die vier möglichen Kombinationen von Kornform und Korngröße in Schleifuntersuchungen mit 15 Zustellungen von jeweils  $a_e = 100 \mu\text{m}$  eingesetzt. Initial und nach 5, 10 und 15 Zustellungen wurde das 3D-Profil der Schleifbelagsoberfläche gemessen und hieraus die flächenbezogenen Oberflächenparameter der Abbott-Kurve reduzierte Spitzenhöhe (Spk) und reduzierte Riefentiefe (Svk) ermittelt. Diese Oberflächenparameter dienen wie im Arbeitspaket 1 als Indikatoren für Kornabflachung (sinkende Spk) und Zusetzungen (sinkende Svk). Zum Ende des Versuchs wurde darüber hinaus die Rauheit der Spannut Rz und die Schartigkeit der Schneiden RzK ermittelt, die von der Schleifwerkzeugkante und die vom Schleifwerkzeugmantel generiert wurden. Die splittrige und sehr splittrige Kornart (CM-M, CM-L) zeigen einen deutlich unterschiedlichen Verlauf des Kornmikroverschleißes. Der Verlauf der Oberflächenparameter mit zunehmendem Zerspanvolumen  $V'_w$  ist in Abbildung 7 dargestellt.



Prozess	Schleifwerkzeug	Werkstück
Längs-Umfangs-Planschleifen	Kornform CM-M, CM-L	PcBN VS35
$v_{ft} = 180 \text{ mm/min}$ $v_c = 10 \text{ m/s}$	$d_g = \text{var.}$	$C_{cBN} = 70 \%$
$a_e = 100 \text{ µm} \times 15$	keramische Bindung	$d_{cBN} = 2 \text{ µm}$ Mc/115113 © IFW

Abbildung 6: Verschleißverhalten der vier untersuchten Diamantkornspezifikationen

Der Parameter Spk sinkt beim sehr splittrigen Korn (CM-L) in beiden Korngrößen deutlich gegenüber dem Anfangswert. Hierbei wird eine Kornabflachung des nadelförmigen Diamantkorns der Größe D25 unmittelbar beim ersten Schleifkontakt festgestellt, die durch ein initiales Absinken der reduzierten Spitzenhöhe auf  $Spk = 2 \text{ µm}$  bestimmt wird. Nach dieser initialen Einebnung der Schleifbelagsoberfläche wird ein statisches Verschleißniveau erreicht. In der Korngröße D15 sinkt der Parameter Spk hingegen kontinuierlich weiter und erreicht zum Versuchsende den Wert  $Spk = 1,2 \text{ µm}$ . Die Schleifbelagsoberfläche ebnet sich somit immer weiter ein, sodass die keramische Schleifbelagsbindung in Kontakt mit der PcBN-Oberfläche kommt. Dies führt zu Bindungsbrüchen und somit zu einem hohen Profilverschleiß. Die Bindungsbrüche können indirekt an einer Erhöhung der reduzierten Riefentiefe  $\Delta SvK = +4,2 \text{ µm}$  nachgewiesen werden. Da SvK nach dem ersten Schleifkontakt einmalig ansteigt, ist davon auszugehen, dass zunächst geschlossene, oberflächennahe Poren durch Bindungsbrüche geöffnet werden.

Das weniger splittrige Diamantkorn (CM-M) zeigt ein anderes Verschleißverhalten. In der Korngröße D15 hat die reduzierte Spitzenhöhe ein statisches Niveau  $Spk = 2,1 \text{ µm}$ . Das Diamantkorn verschleißt gleichmäßig und wird freigegeben, wenn es abgestumpft ist. Die reduzierte Riefentiefe steigt initial um  $\Delta SvK = +2,3 \text{ µm}$ , um nachfolgend auf statischem Niveau zu verharren. Auch diese Erhöhung wird auf das Öffnen der Porenstruktur des Schleifbelags zurückgeführt. In der Korngröße D25 ist bis zur Hälfte des abzutragenden Zerspanvolumens  $V'_w$  eine reduzierte Spitzenhöhe  $Spk = 2,2 \text{ µm}$  zu beobachten, die nachfolgend auf das statische Niveau  $Spk = 1,7 \text{ µm}$  fällt. Die reduzierte Riefentiefe fällt bis zum Erreichen der Hälfte des Zerspanvolumens kontinuierlich um  $\Delta SvK = -5,0 \text{ µm}$ . Der festgestellte Verlauf der Topografieparameter ist auf das Einschleifverhalten des Schleifbelags zurückzuführen. Der unterschiedliche Kornmikroverschleiß ist unmittelbar in den Topografieaufnahmen der Schleifbeläge zu

identifizieren. Wie zuvor beschrieben, wurde ermittelt, dass ein splittriges Korn grundsätzlich einen stärkeren Selbstschärfungseffekt zeigt als die eher blockigen Kornformen des Arbeitspaketes 1. Mit dem sehr splittrigen Korn wird das erwünschte Splintern des Diamantkorns im Schleifprozess jedoch zu häufig hervorgerufen. Das einzelne sehr splittrige Korn wird unter der mechanischen Belastung bei der Bearbeitung von PcBN verfrüht zersplittert, sodass das Einzelkornspanvolumen  $V'_{wg}$  sinkt und der Profil- und Kantenverschleiß auf den bis zu dreifachen Wert gegenüber dem Referenzwerkzeug ansteigen. Die Versuchsdaten zeigen außerdem, dass eine geringe Korngröße zu einem geringeren Profilverschleiß führt.

Aus den beschriebenen Mechanismen konnten Handlungsempfehlungen für die Auslegung eines Werkzeugschleifprozesses zur 5-Achs-Bearbeitung von PcBN abgeleitet werden. Das gemeinsame Potenzial der Strategien für eine Produktivitäts- und Qualitätssteigerung der Schleifbearbeitung von PcBN-Schaftwerkzeugen wurde daraufhin in diesem vierten Arbeitspaket dargelegt. Je PcBN-Spezifikation wurden fünf Schaftwerkzeugrohlinge mit den ermittelten verschleißoptimalen Prozessstellgrößen für die Spannutenbearbeitung und den als bezüglich der Fertigungsqualität ab besten geeigneten Schleifwerkzeugspezifikationen geschliffen. Bild 8 zeigt den Profilverschleiß am Schleifwerkzeug nach dieser Schleifbearbeitung.

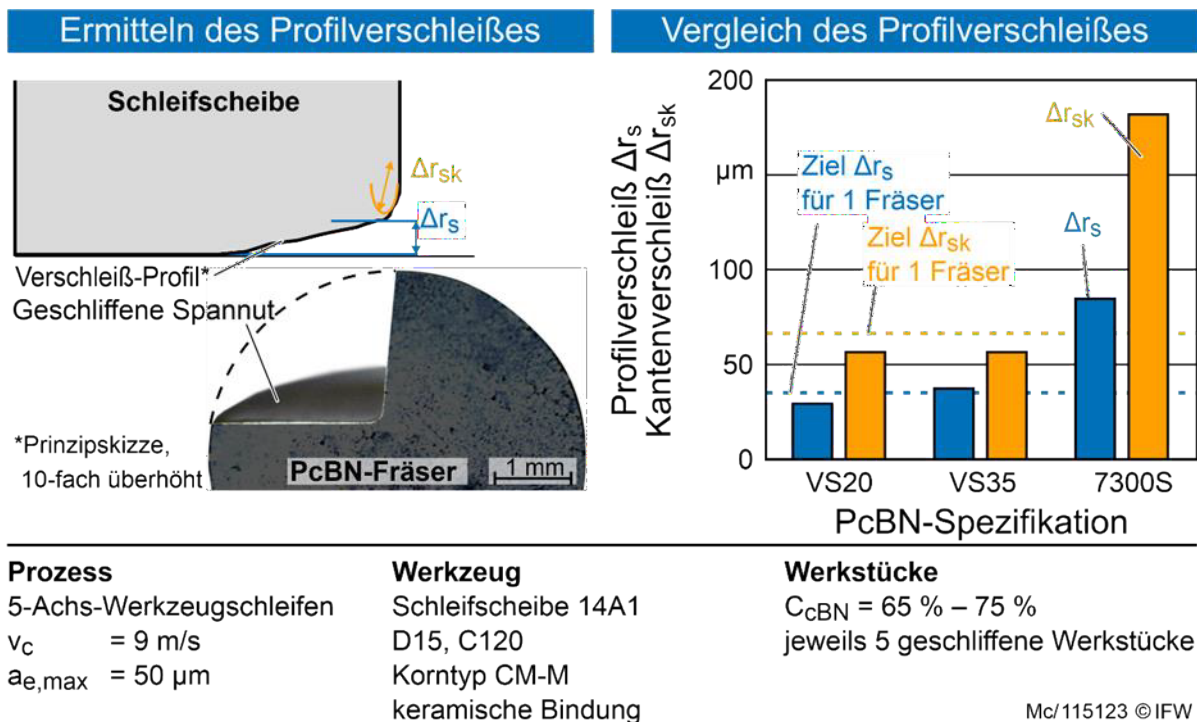
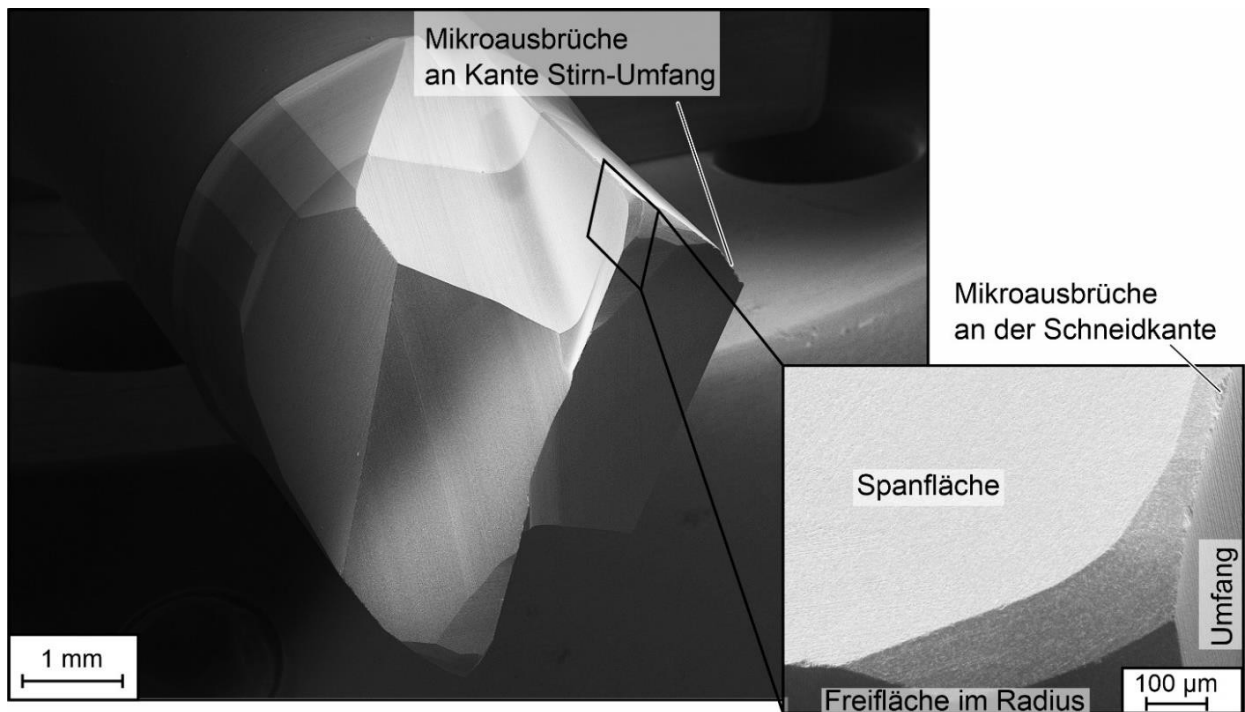


Abbildung 7: Profilverschleiß bei der 5-Achs-Bearbeitung der PcBN-Spezifikationen beim frei auskragenden Rohling

Bei den PcBN-Spezifikationen mit niedrigem und mittlerem cBN-Gehalt (VS20 und VS35) wird Profil- und Kantenverschleiß erreicht, der als Zielwert für die Herstellung eines einzelnen Fräsers avisiert wird. Bei der härteren PcBN-Spezifikation mit hohem cBN-Gehalt (7300S) ist der Profilverschleiß 40 Prozent höher. Insbesondere ist bei der Bearbeitung dieser Spezifikation der hohe Kantenverschleiß  $\Delta r_{sk} = 178 \text{ µm}$  zu betonen, der zu einer ausgeprägten Verrundung des geschliffenen Stirnprofils führt. Für alle drei PcBN-Spezifikationen kann gezeigt werden, dass die vollständige Bearbeitung

eines Fräsers mit einem akzeptablen Profil- und Kantenverschleiß am Schleifwerkzeug durchgeführt werden kann. Beide Verschleißformen sind ohne Abstützung des Schaftwerkzeugrohlings signifikant stärker ausgeprägt. Bei der Bearbeitung der PcBN-Spezifikationen mit niedrigem und mittlerem cBN-Gehalt ist die Fertigung von fünf Fräswerkzeuge ohne Zwischenabrichten in der Nebenzeit möglich. Bei der PcBN-Spezifikation mit hohem cBN-Gehalt sollte ein Zwischenabrichten in der Nebenzeit der Schleifmaschine nach der Fertigung von maximal zwei Fräswerkzeugen erfolgen.

Bild 34 zeigt REM-Aufnahmen eines geschliffenen Voll-PcBN-Torusfräsers der PcBN-Spezifikation mit mittlerem cBN-Gehalt.



Mc/115124 © IFW

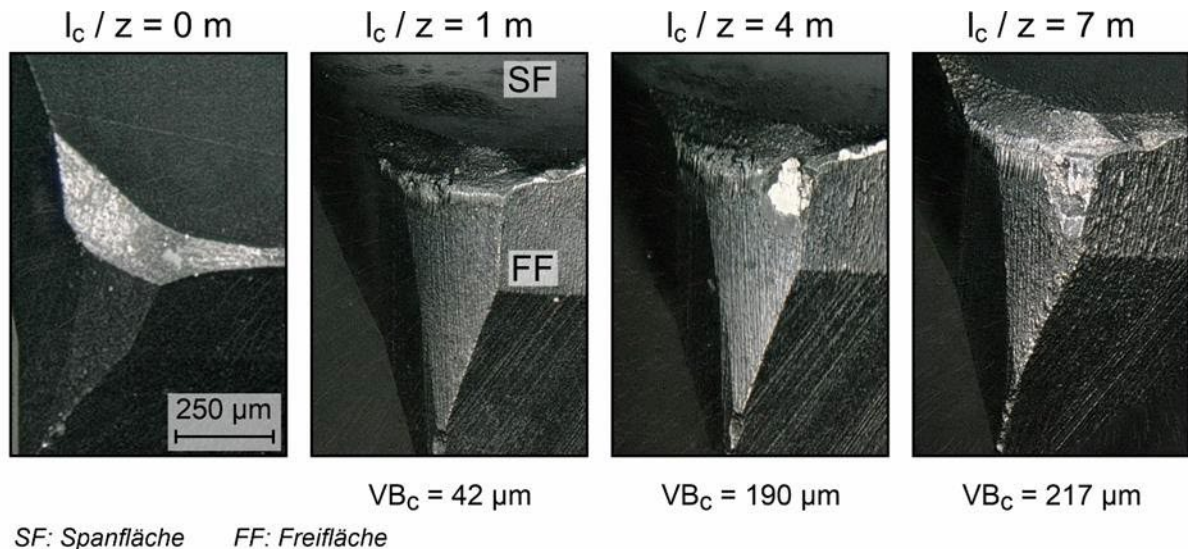
Abbildung 8: REM-Aufnahmen eines geschliffenen Voll-PcBN –Torusfräsers

Links in der Totale ist die komplexe Formgebung des Fräsers zu erkennen. Die Helligkeitswechsel im hinteren Bereich der Spannuten kennzeichnen den Übergang von PcBN (dunkel) zum Hartmetall (hell) an. An der Kante zwischen 2. Stirnfreifläche und 2. Umfangsfreifläche sind Mikroausbrüche sichtbar, die infolge der Zugbeanspruchung des Werkstoffs beim Schleifen des 2. Freiwinkels der Umfangsfreiflächen entstanden sind. Die Detailaufnahme der Schneidkante im Bereich der Schneidenecke zeigt eine hohe Fertigungsqualität mit geringen Mikroausbrüchen. Auch diese Mikroausbrüche können auf die Zugbeanspruchung infolge der Schleifkinematik zurückgeführt werden.

Das Forschungsprojekt basiert auf der Hypothese, dass die Produktivität und die Fertigungsqualität von PcBN-Schaftwerkzeugen mittels eines angepassten Schleifprozesses signifikant gesteigert werden können. Zur Evaluierung dieser Hypothese wurden die geschliffenen Vollkopf-PcBN-Torusfräser für die Vollnutenbearbeitung von Kaltarbeitsstahl X210CrW12 mit einer Härte bis zu 60 HRC bei der standzeitoptimalen Schnittgeschwindigkeit  $v_c = 160$  m/min eines beschichteten VHM-Fräsers

eingesetzt. Als Standzeitkriterium wurde eine maximale Verschleißmarkenbreite  $VB_{max} < 300 \mu\text{m}$  definiert.

Abbildung 10 zeigt exemplarisch den Verlauf des Verschleißes mit zunehmendem Schnittweg bei einem Vollkopf-PcBN-Torusfräser der PcBN-Spezifikation mit niedrigem cBN-Gehalt (VS20).



Prozess	Werkzeug	Werkstück
Nutenhartfräsen	Torusfräser	Stahl X210CrW12
$v_c = 160 \text{ m/min}$	$d_1 = 5 \text{ mm}, r = 500 \mu\text{m}$	Plan-Schlichtgefräst
$f_z = 16 \mu\text{m}$	$S_y = 100 \mu\text{m}, \gamma = -28^\circ$	Härte $H = 58 \text{ HRC}$
$a_p = 100 \mu\text{m} \times 10$	PcBN VS20: $d_{cBN} = 2 \mu\text{m}, C_{cBN} = 65 \%$	<small>Mc/115132 © IFW</small>

Abbildung 9: Verschleißfortschritt beim Vollnutenfräsen mit einem Voll-PcBN-Torusfräser der Spezifikation VS20

Als initialer Verschleiß findet eine Schneidkantenverrundung zwischen der Freifläche und der Schutzfase statt. Abweichungen von der idealen Radiengeometrie der Schneidecke verursachen Mikroausbrüche in der Größe einzelner cBN-Partikel. Nach diesem initialen Verschleiß findet eine kontinuierliche Zunahme der Verschleißmarkenbreite statt. Bei der PcBN-Spezifikation mit geringem cBN-Gehalt wurde die Untersuchung nach der vollständigen Bearbeitung einer Ebene des Stahlblocks abgebrochen, da in der nachfolgenden Arbeitsebene infolge eines Härtetiefenverlaufs andere Schnittbedingungen gewesen wären. Das Standzeitkriterium wurde innerhalb dieser Versuchsreihe nicht erreicht. Es zeigt sich somit, dass ein Vollkopf-PcBN-Schaftwerkzeug die erwartete hohe Standzeit erreicht und eine Alternative zu beschichteten HM-Fräswerkzeugen darstellt.

## Zusammenfassung

Im beschriebenen Forschungsvorhaben eine neuartiger Umfangsschleifprozess zur Bearbeitung von PcBN-Schaftwerkzeugen entwickelt, der unter dem spezifischen, lokal unterschiedlichen Verschleißverhalten des Schleifwerkzeugs produktivitäts- und qualitätsangepasst eingesetzt werden kann. Die technische Umsetzung der

Schleifbearbeitung von PcBN zeigt, dass mit geringen Investitionen in Vorrichtungen (Lünette, Reinigungsdüse, Schleifwerkzeuge) an bestehenden 5-Achs-Werkzeugschleifmaschinen die wirtschaftliche Komplettbearbeitung von PcBN-Schaftwerkzeugen möglich ist. Die Ergebnisse des Arbeitspaketes 1 ermöglichen grundsätzlich eine Schleifbearbeitung von PcBN-Schaftwerkzeugen. Empfohlen wird, basierend auf den Kenntnissen des Vorhabens, eine geringe Schnittgeschwindigkeit  $v_c < 10$  m/s und einen Pendelschliff mit geringer Zustellung  $a_e < 100$   $\mu$ m bei hoher Vorschubgeschwindigkeit  $v_{ft} > 150$  mm/min. Mit einer derartigen Kombination der Prozessstellgrößen kann PcBN mit keramisch gebundenen Diamantschleifwerkzeugen der Korngröße  $d_g < 25$   $\mu$ m mit einem geringen Verschleiß ( $G > 5$ ) bearbeitet werden. In den Untersuchungen des Arbeitspaketes 2 wurde ermittelt, dass Diamantschleifwerkzeuge mit einer harten keramischen Bindung und splittrigem Diamantkorn geringer Korngröße  $d_g < 20$   $\mu$ m bei einer hohen Kornkonzentration C120 das G-Verhältnis auf  $G > 10$  steigern können. Hingegen ist der Einfluss der Schleifbelagsspezifikation auf die Rauheit der geschliffenen PcBN-Oberfläche gering. Es wurden stets geringe gemittelte Rautiefen  $R_z < 0,5$   $\mu$ m durch die Schleifbearbeitung generiert. Das Arbeitspaket 3 hat gezeigt, dass derartige Schleifwerkzeuge sowohl in der Nebenzeit der Werkzeugschleifmaschine im Bearbeitungsraum als auch außerhalb der Werkzeugschleifmaschine profiliert werden können. Der Profilverschleiß ist nach der Bearbeitung eines PcBN-Schaftwerkzeugs gering ( $\Delta r_s > 10$   $\mu$ m), sodass das Profilieren innerhalb der Nebenzeit des Bearbeitungsprozesses der Schaftwerkzeuge möglich ist.

Die Standzeituntersuchungen des Arbeitspaketes 4 zeigen, dass selbst bei einem PcBN-Fräswerkzeug ohne Optimierungsstufen der Makro- und Schneidengeometrie eine höhere Standzeit erreicht wird als bei vergleichbaren, optimierten Fräswerkzeugen aus beschichtetem HM. Derartige Fräswerkzeuge können mit den Ergebnissen dieses Forschungsprojekts wirtschaftlich produziert werden und somit ihre Vorteile gegenüber am Markt verfügbaren Schaftwerkzeugen für die Hartzerspannung voll ausschöpfen.

---

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, [www.fgw.de](http://www.fgw.de), angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn M. Eng. Dominik Müller-Cramm unter 0511 762 19420.

---

## Literatur:

- [AGA02] Agarico, J.: Reibwerkzeuge für die Hartbearbeitung. *WB Werkstatt und Betrieb* 135(4):51–53, 2002.
- [BEH16] Behrens, L.: Schleifen von PCBN. Dr.-Ing. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, PZH Verlag, Garbsen, 2016.
- [BIE91] Bieker, R.: CAM-gerechte Technologie für die NC-Fräsbearbeitung von Stahlhohlformen, Dr.-Ing. Dissertation, Techn. Hochschule, Aachen, 1991.
- [BUR81] Burmester, H.J., Burmester, H.G.: Drehen gehärteter Eisenwerkstoffe. Tz für Metallbearbeitung. Industrie-Verl. Leinfelden-Echterdingen, S. 39–40, 1981.
- [BUT03] Butler-Smith, P.: The economics of rapid grinding of PCD and PCBN cutting tools. *Industrial Diamond Review*, S. 20–23, 2003.
- [DEN17] Denkena, B., Grove, T., Krödel, A.: Schneidkantenmikropräparation an pCBN-Werkzeugen mittels Kurzpulslaser. *Laserbearbeitung*:54–64, 2017.
- [ENS99] Enselmann, A.: HSC-Hartfräsen von Formen und Gesenken – *Technologie, Wirtschaftlichkeit, Optimierung*. Patent: Zugl.: Dr.-Ing. Dissertation, Dortmund, Univ., 1998. Vulkan-Verl., Essen, 1999.
- [FRI02] Friemuth, T.: Herstellung spanender Werkzeuge, Habilitation, Hannover, Universität Hannover, 2002.
- [FRI99] Friemuth, T.: Schleifen hartstoffverstärkter keramischer Werkzeuge. Dr.-Ing. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [GÜH11] Gühring AG: Hartreiben statt Erodieren in gehärteten Stahl. *SMM Schweizer Maschinenmarkt, Technische Fachzeitschrift, Industrie-Kurier, Industrie-Generalanzeiger, Der Industrie-Bau* 111, 2011.
- [HEY15] Heymann, T.: Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannuten an Vollhartmetallbohrwerkzeugen. Dr.-Ing. Dissertation, Dortmund, Univ., Vulkan-Verl., Essen, 2015.
- [KRE07] Kress, J.: Auswahl und Einsatz von polykristallinem kubischem Bornitrid beim Drehen, Fräsen und Reiben. Dr.-Ing. Dissertation, Dortmund, Univ., Vulkan-Verl., Essen, 2007.
- [MAP08] MAPAL ITS GmbH: MAPAL und PCBN – es geht um mehr als nur den richtigen Schneidstoff. *Werkzeug Technik*(106):74, 2008.
- [NEI95] Neises, A.: Einfluß von Aufbau und Eigenschaften hochharter nichtmetallischer Schneidstoffe auf Leistung und Verschleiß im Zerspanprozeß mit geometrisch definierter Schneide, Düsseldorf, 1995.
- [NGU07] Nguyen Trong, H.: Modellierung des HochgeschwindigkeitsfräSENS mit Kugelkopffräsern unter besonderer Berücksichtigung der Oberflächengüte. Dr.-Ing. Dissertation, Magdeburg, Univ., Shaker, Aachen, 2007.
- [SCH13] Schulze, S.: CBN-Vollkopffräser - Eine neue Werkzeuggeneration für harte Fälle, in Institut für Produktionstechnik, (Hrsg.). 4. Symposium Produktionstechnik innovativ und interdisziplinär, S. 33–36, 2013.
- [STE93] Steinmetz, K., König N., Hoffmann J.: Bearbeitung harter Eisenwerkstoffe mit polykristallinen CBN-Schneidstoffen. VDI-Berichte, S. 225–240, 1993.
- [VEN14] Ventura, C. E.: Herstellung von Schneidkanten geometrien an PKB-Wende-schneidplatten durch Querseiten-Planschleifen. Dr.-Ing. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, PZH-Verl., Garbsen, 2014.
- [WAC16] Wacinski, M.: Keramische Schafffräswerkzeuge für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Nickelbasis-Legierungen. Dr.-Ing. Dissertation, Berlin, Univ., Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2016.
- [WEI97] Weinert, K. (Hrsg.): Begleitband zum Fachgespräch Bohren und Fräsen im modernen Produktionsprozess – *Dortmund, 21./22. Mai 1997*. ISF, Dortmund, 1997.
- [WEN03] Wendt GmbH: Know-how gesucht – und gefunden – – Systemanbieter präsentiert optimale Lösungen beim Schleifen von CBN-/PKD-Werkzeugen. NC-Fertigung, S. 84–87, 2003.
- [ZEL98] Zeller, R.: Hartdrehen von Stahl (60 HRC) als Alternative der Prozeßkettengestaltung, in Neugebauer R, (Hrsg.). *Offensivkonzepte wirtschaftlicher Produktionstechnik: 11.12. November 1998 ; Tagungsband*, 1st ed. Verl. Wissenschaftliche Scripten. Zwickau, S. 241–251, 1998.