

## Untersuchungen zum Abrichtverhalten metallisch gebundener Diamantwerkzeuge

# Mechanisches Abrichten von Diamantschleifscheiben

B. Denkena, B. Bergmann, M. Wilckens

Die Bearbeitung von PCBN-Wendeschneidplatten mit keramisch gebundenen Schleifscheiben führt zu erhöhtem Schleifscheibenverschleiß. Am IFW Hannover wurden daher metallisch gebundene Werkzeuge entwickelt, um durch ihre mechanischen Eigenschaften eine höhere Schleifgüte zu ermöglichen. Die höhere Festigkeit dieser Bindung erhöht jedoch den Abrichtaufwand. In diesem Beitrag werden Ansätze zum mechanischen Profilieren dieser Schleifscheiben vorgestellt.

### STICHWÖRTER

Werkzeugschleifen, Fertigungstechnik, Forschung

## Mechanical dressing of diamond grinding wheels – Investigations into the dressability of metallically bonded diamond grinding wheels

The production of PCBN indexable inserts with commonly used vitrified grinding wheels is very wear-intensive. The IFW Hannover therefore developed metal-bonded grinding wheels to enable higher grinding ratios due to the high grain retention forces of metal bonds. However, the higher strength of this type of bond negatively affects the dressing process. This publication presents approaches for mechanical profiling of such grinding wheels.

## 1 Einleitung

Werkzeuge aus hochharten Schneidstoffen ermöglichen eine produktive Bearbeitung von vergüteten und gehärteten Stählen mit geometrisch bestimmter Schneide. Das hochharte polykristalline kubische Bornitrit (PCBN) hat sich daher im Formen- und Werkzeugbau durchgesetzt. Seine Vorteile liegen vor allem in der hohen spezifischen Härte, Temperaturbeständigkeit und Verschleißbeständigkeit [1].

Diese Eigenschaften führen einerseits zu erhöhten Standzeiten, sind andererseits jedoch mit höheren Anschaffungskosten verbunden. Diese sind neben den Materialkosten vornehmlich auf die Herstellungskosten der Werkzeuge zurückzuführen. Für die Herstellung der Werkzeuge hat sich das Schleifen mit keramisch gebundenen Diamantwerkzeugen durchgesetzt. Diese Bearbeitung ist zeitintensiv und bewirkt einen hohen Schleifscheibenverschleiß [2, 3]. Die Verschleißrate des Schleifwerkzeugs  $Q'_s$  lässt sich in diesen Prozessen über die Schleifgüte  $G$  ins Verhältnis zum umgesetzten, bezogenen Zeitspanvolumen  $Q'_w$  setzen. Nach derzeitigem Stand der Technik sind beim Umfangsschleifen von Wendeschneidplatten aus PCBN Schleifgüten von  $0,5 < G \leq 4,0$  erreichbar. Somit wird aktuell bis zu doppelt so viel Schleifscheibenvolumen für die Bearbeitung von PCBN benötigt als an der Wendeschneidplatte abgetragen wird [4]. Die Produktivität liegt damit weit hinter der Schleifbearbeitung von Wendeschneidplatten aus Hartmetall ( $G = 220-280$ ) oder Cermet ( $G = 25-45$ ) [5].

Für die Bearbeitung von PCBN-Wendeschneidplatten werden heute vorwiegend keramisch gebundene Diamantschleifscheiben eingesetzt. Untersuchungen am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover

(LUH) haben jedoch gezeigt, dass die geringen Kornhaltekräfte und Wärmeleitfähigkeit dieser Werkzeuge deren Produktivität limitieren, da einsatzfähige Schleifkörner durch die hohen Kornbelastungen frühzeitig aus der Bindung herausbrechen [4]. Metallische Bindungen weisen sich durch maximale Kornhaltekräfte und Wärmeleitfähigkeiten aus und bieten daher großes Potenzial für die Bearbeitung von PCBN-Werkzeugen. In detaillierten Voruntersuchungen zum Einfluss des Zinngehalts auf das Einsatzverhalten bronzegebundener Diamantschleifscheiben wurde am IFW die hohe Profilhaltigkeit und Verschleißfestigkeit von Bronzen mit einem Zinngehalt von 20 % nachgewiesen [6].

Aus diesem Grund werden in einem aktuellen AiF-geförderten Forschungsprojekt hochfeste, bronzegebundene Diamantschleifscheiben für eine Effizienzsteigerung der Bearbeitung von PCBN-Wendeschneidplatten entwickelt und ihr Einfluss auf die Produktivität des Prozesses untersucht. Zuerst wurde der Einfluss der Herstellparameter im Drucksinterprozess und die Zusammensetzung der Bindungsbestandteile auf die mechanische Festigkeit analysiert. Dann wurden fünf Topfschleifscheiben für den Einsatz in einer Wendeschneidplattenschleifmaschine am IFW hergestellt, um im Folgenden das Leistungspotenzial dieser Werkzeuge zu untersuchen. Die hohe Festigkeit dieser sintermetallischen Bindungen stellt neue Herausforderungen an den Abrichtprozess. Durch die hohe Verschleißfestigkeit ist das Profilieren dieser Werkzeuge durch einen erhöhten Abrichtverschleiß gekennzeichnet. Gleichzeitig ist für die Einsatzfähigkeit der Werkzeuge ein Kornüberstand notwendig, der durch das Zurücksetzen der Bindung bei gleichzeitigem Erhalt der Diamantkörner hergestellt wird.

In diesem Beitrag werden die ersten Untersuchungsergebnisse zum Abrichten dieser Werkzeuge dargestellt. Der Fokus liegt auf

**Tabelle 1.** Kritische Biegebruchspannung in Abhängigkeit der Füllkornkonzentration.

Füllkornkonzentration $C_{FK}$ in Vol.-%	Kritische Biegebruchspannung $\sigma_b$ in MPa
0	442
4	402
12,5	333
21	223
25	160

dem mechanischen Abrichten mit unterschiedlichen Abrichtwerkzeugen und Abrichtprozessstellgrößen. Diese werden anhand des Abrichtverhältnisses und des Kornüberstands bewertet.

## 2 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Beitrag zeigt erste Ergebnisse zum Abrichten selbst hergestellter, bronzegebundener Diamantschleifscheiben. Dazu wurden Abrichtuntersuchungen mit keramisch gebundenen SiC (Siliciumcarbid)- und Korundabrichtern mit unterschiedlichen Korngrößen und Prozessstellgrößen an fünf Topfschleifscheiben mit veränderter Belagsspezifikation durchgeführt. Das Abrichtergebnis wurde anhand des Abrichtverhältnisses und des Kornüberstands bewertet. Der Schleifbelag der Schleifwerkzeuge variiert in seiner Zusammensetzung und weist einen steigenden Anteil an F800-SiC-Füllkörnern zwischen 0 und 25 Vol.-% auf. In vorangegangenen Untersuchungen wurde gezeigt, dass diese Füllkornkonzentration  $C_{FK}$  einen maßgeblichen Einfluss auf die Bindungsfestigkeit hat [7].

Die Sinterparameter sowie die Diamantkornkonzentration  $C_D = 25$  Vol.-% wurden für alle Beläge konstant gehalten. Der

Sinterdruck betrug  $p_s = 60$  bar und die Sintertemperatur  $T_s = 680^\circ\text{C}$ . Die kritische Biegebruchspannung  $\sigma_b$  wurde anhand von Dreipunktbiegeversuchen bestimmt. Sie beschreibt die mechanische Belastbarkeit der Beläge und dient als Anhaltswert für die Kornhaltekraft [6]. Die kritische Biegebruchspannung der eingesetzten Schleifbeläge ist in **Tabelle 1** in Abhängigkeit der Füllkornkonzentration zusammengefasst.

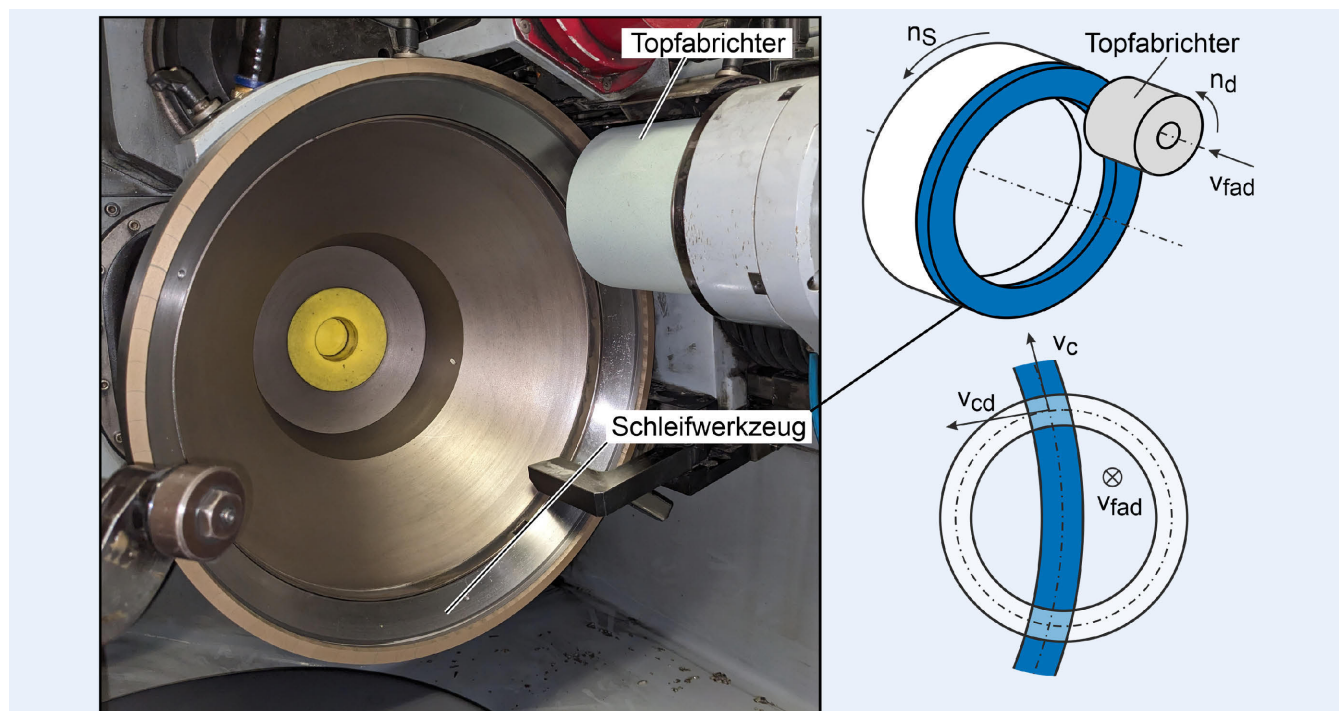
Die Abrichtuntersuchungen wurden auf einer Wendt „WAC 715 Centro“-Wendeschnideplattenschleifmaschine durchgeführt. Der Abrichtprozess wurde in den Untersuchungen als kontinuierlicher Abrichtprozess mittels Topfabrichtern umgesetzt. Der Versuchsaufbau innerhalb der Maschine ist in **Bild 1** zu sehen.

Es wurden keramisch gebundene Korund- und SiC-Abrichtwerkzeuge mit Korngrößen von F320, F400 und F500 mit variablen Prozessstellgrößen eingesetzt. Dabei wurde die Abrichtervorschubgeschwindigkeit über die Zustellfrequenz  $f_d$  und die jeweilige Einzelzustellung  $a_{ed}$  variiert, während die Abrichter- sowie Schleifscheibenschnittgeschwindigkeit von  $v_{cd} = 2,2$  m/s und  $v_c = 12$  m/s konstant gehalten wurde.

Die verwendeten Parameter für die Abrichtuntersuchungen wurden gemäß eines zentral zusammengesetzten, statistischen Versuchsplan eingestellt, der in **Tabelle 2** dargestellt ist.

Mit jeder Parameterkombination wird eine Gesamtabrichtzustellung von  $a_{e,ges} = 500 \mu\text{m}$  umgesetzt. Die eingesetzten Schleifwerkzeuge verfügen jeweils über ein Belagssegment, das aus der Schleifscheibe entnommen werden kann. Somit ist die dreidimensionale Analyse des Abrichtergebnisses mit Konfokalmessungen und REM-Aufnahmen möglich. Vor und nach jedem Abrichtprozess wurde das Segment aus der Schleifscheibe entnommen und die Oberflächentopografie sowie die Belagshöhe mit einer Fokusvariationsmessung durch ein „InfiniteFocus G5“ der Firma Alicona ermittelt.

Um das abgerichtete Belagsvolumen  $Q_d$  zu bestimmen, wurde mittels Laserablation eine Referenzstufe in den Schleifbelag ein-



**Bild 1.** Versuchsaufbau innerhalb der Wendt „WAC 715 Centro“-Wendeschnideplattenschleifmaschine. Foto: IFW Hannover

**Tabelle 2.** Abrichtparameter für den zentral zusammengesetzten Versuchsplan.

Parameter	Faktorstufenwert				
Parameter	-2	-1	0	1	2
Einzelzustellung $a_{ed}$ in $\mu\text{m}$	0,5	1,0	1,2	1,5	-
Zustellfrequenz $f_d$ in Hz	0,2	0,5	0,67	1,0	1,5

gebracht. Anhand der Messung der Stufentiefe ist eine Bewertung der Belagshöhenänderung möglich. Anschließend wurde das Verhältnis aus dem abgerichteten Belagsvolumen  $Q_s$  und dem abgetragenen Volumen des Abrichters  $Q_d$  als Abrichtverhältnis  $G_d$  für die Bewertung des Abrichtprozesses herangezogen. Die reduzierte Spitzenhöhe Spk ist allgemein als die durchschnittliche Höhe der Spitzen eine Oberfläche über der Kernoberfläche definiert. Für Schleifwerkzeuge gibt sie damit Aufschluss über den Kornüberstand nach dem Abrichten und somit über die Einsatzfähigkeit des Schleifwerkzeugs.

### 3 Ergebnisse

In **Bild 2** sind die Abrichterergebnisse bei Verwendung der SiC-Abrichter dargestellt.

Auf der linken Seite ist das einheitenlose Abrichtverhältnis  $G_d$  und auf der rechten Seite der Kornüberstand Spk in  $\mu\text{m}$  abgebildet. Die Werte wurden in Abhängigkeit der Füllkornkonzentration  $C_{FK}$  aufgetragen, da diese die Bindungsfestigkeit maßgeblich beeinflusst. Der Einfluss der Abrichtparameter ist in dieser Darstellung nicht berücksichtigt, um zunächst den Einfluss der Füllkornkonzentration auf das Abrichterergebnis unabhängig von den Abrichtparametern darzustellen. Der Parametereinfluss ist daher durch die dargestellte Standardabweichung repräsentiert.

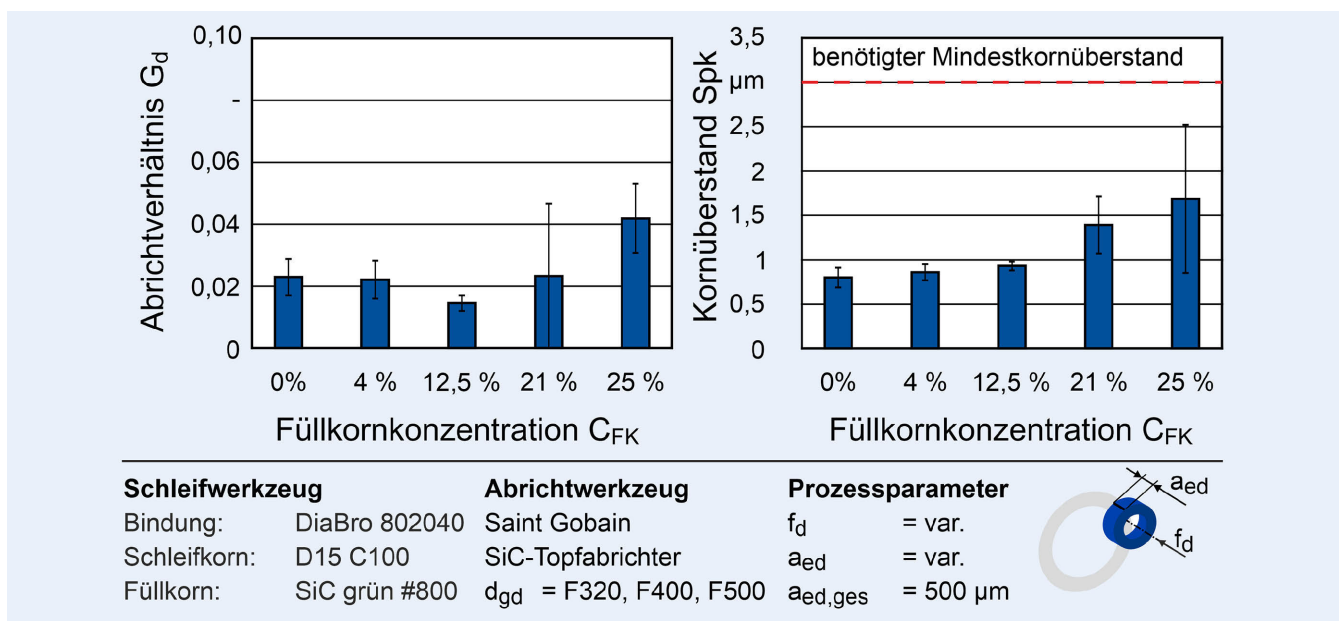
Bei den hier verwendeten bronzegebundenen Diamantschleifscheiben wirkt der Abrichtprozess, indem die SiC-Körner die

Bindung zwischen den Diamantkörnern abtragen bis diese aus der Bindung herausbrechen. Der steigende Anteil der Füllkornkonzentration  $C_{FK}$  reduziert die kritische Biegebruchspannung  $\sigma_b$ , da die Füllkörner wie auch die Primärkörner den Anteil der metallischen Bindermatrix des Schleifbelags reduzieren und somit die Körner weniger stark in dieser eingebunden sind. Dies sorgt im Abrichtprozess für höhere Abrichtverhältnisse, da die Diamantkörner früher aus der Bindung herausbrechen und auch die Bindung aufgrund der reduzierten Festigkeit leichter rücksetzbar wird. Gleichzeitig brechen somit auch Siliziumkarbidkörner aus, was zu Leerstellen in der Werkstückoberfläche führt und den Kornüberstand erhöht. Aufgrund der höheren Härte der Diamanten werden diese durch den Abrichtprozess weniger stark abgetragen und stehen daher nach dem Abrichten aus der Bindung heraus.

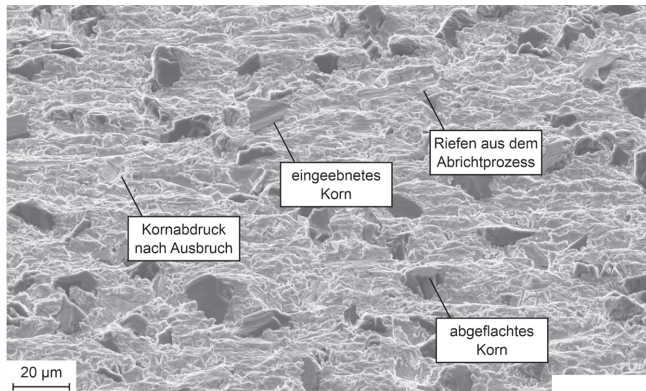
Die Ergebnisse zeigen, dass der Abrichtprozess mit SiC-Abrichtwerkzeugen für diese Schleifwerkzeuge nicht geeignet ist. Um einen ausreichenden Spanraum für die Schleifbearbeitung zur Verfügung zu stellen, ist ein Kornüberstand von mindestens 20 % der verwendeten Korngröße nötig. Für die verwendete Schleifkorngröße von  $d_g = 15 \mu\text{m}$  wird also ein Mindestkornüberstand von  $\text{Spk} = 3 \mu\text{m}$  benötigt. Der erreichbare Kornüberstand der Werkzeuge ist über alle untersuchten Abrichtparameter geringer als dieser Grenzwert. Das Ergebnis des Abrichtprozesses auf mikroskopischer Ebene zeigt **Bild 3** mit einer REM-Aufnahme des Schleifbelags mit einer Füllkornkonzentration von  $C_{FK} = 0 \text{ Vol.-%}$ .

Die dunklen Diamantkörner heben sich deutlich von der hellen Bronzebindung ab. Auch sind die Riefen der Korneingriffe des Abrichtprozesses in der Bindungsmatrix sichtbar. Vereinzelt Abdrücke deuten auf Diamantkörner hin, die durch den Abrichtprozess aus der Bindung herausgebrochen sind. Allerdings ist auch deutlich, dass die Bindung nicht ausreichend zurückgesetzt wurde und die Schleifkörner in der Bindung eingeebnet sind. Somit ist auch der geringe gemessene Kornüberstand von  $\text{Spk} = 0,83 \mu\text{m}$  deutlich sichtbar.

Da der benötigte Mindestkornüberstand durch die bisher verwendeten Prozessparameter nicht erreicht wurde, wurde der

**Bild 2.** Abrichtverhältnis  $G_d$  und Kornüberstand  $\text{Spk}$  nach dem Abrichten mit SiC-Abrichter. Foto: IFW Hannover





**Bild 3.** REM-Aufnahme des Schleifbelags mit einer Füllkornkonzentration von 0 Vol.-% nach dem Abrichten mit dem SiC-Abrichter.

Grafik: IFW Hannover

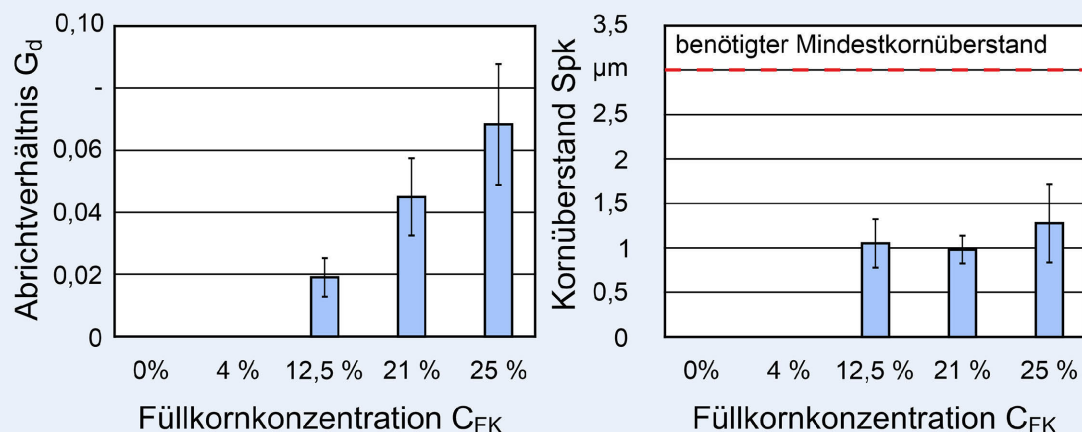
ursprüngliche Versuchsplan erweitert. Maschinenseitig ist eine weitere Steigerung der Abrichtvorschubgeschwindigkeit durch die Steigerung von Abrichtfrequenz und Abrichteinzeltstellung nicht möglich. Daher wurde das Abrichtmedium verändert und die Untersuchungen bei denselben Prozessparametern (siehe Tabelle 2) mit Korund-Abrichtwerkzeugen in den Korngrößen F320, F400, und F500 wiederholt. Durch die geringere Abrasionswirkung der Korundkörner im Vergleich zu SiC-Körnern wird einerseits ein höherer Verschleiß dieser Abrichtwerkzeuge erwartet. Andererseits greifen diese Körner die Bindung in den Kornzwischenräumen des Schleifwerkzeugs stärker an, da sich das Abrichtwerkzeug stärker an das Schleifwerkzeug anpasst und somit zielgerichtet den Bindungswerkstoff abträgt. Da die höchsten Abrichtverhältnisse und Kornüberstände bei hohen Füllkornkonzentrationen erreicht wurden, wurden zuerst die drei Werkzeuge mit Füllkornkonzentrationen von  $C_{FK} = 12,5$  Vol.-% verwendet. **Bild 4** stellt die Ergebnisse dieser Untersuchungen dar.

Es ist ein qualitativ vergleichbarer Zusammenhang der Füllkornkonzentration mit dem Abrichtverhältnis erkennbar. Dieser steigt bei steigender Füllkornkonzentration. Dabei werden durch

die Verwendung von Korundabrichtwerkzeugen höhere Abrichtverhältnisse von bis zu  $G_d = 0,068$  erreicht. So ist die maximale Abtragsleistung dieser Werkzeuge um 65 % höher als die der vergleichbaren SiC-Abrichtwerkzeuge. Dies rührt daher, dass die weichen Korundkörner durch die Füllkörner aus SiC im Kontakt splintern und so Mikroschneiden zur Verfügung stellen, die die Bindungsmatrix zwischen Primär- und Füllkörnern effektiv abtragen. Allerdings führt dieses Mikrosplintern der Abrichtkörnung zu geringen Kornüberständen, die keine Abhängigkeit von der Füllkornkonzentration zeigen. So wurde nach dem Abrichten mit Korundwerkzeugen bei einer Füllkornkonzentration von  $C_{FK} = 12,5$  % noch ein 8 % höherer Kornüberstand gegenüber dem Abrichten mit SiC-Werkzeugen gemessen. Bei höheren Füllkornkonzentrationen steigt dieser Kornüberstand jedoch nicht und liegt damit um 32 % ( $C_{FK} = 21$  Vol.-%) und 28 % ( $C_{FK} = 25$  Vol.-%) niedriger als durch die Bearbeitung mit SiC-Werkzeugen. Damit sind durch die Verwendung von Abrichtwerkzeugen mit Korundkorn zwar höhere Abrichterhältnisse erreichbar, allerdings wird auch mit diesen Werkzeugen der benötigte Mindestkornüberstand nicht erreicht.

In **Bild 5** ist eine REM-Aufnahme des Schleifbelags mit einer Füllkornkonzentration von 25 Vol.-% nach dem Abrichtprozess mit einem Korundwerkzeug dargestellt.

Deutlich sind dort Kornagglomerate zu sehen, welche sich in der Bindung wie Poren auswirken. Die Agglomerate sind auf den hohen Gesamtkornanteil zurückzuführen, der sich aus 25 Vol.-% Diamantkörnern und 25 Vol.-% SiC-Körnern zusammensetzt. Da die Schleifkörner in der metallischen Bindung nur mechanisch gehalten werden, senkt eine Steigerung der Füllkornkonzentration die Umklammerung einzelner Körner bis zur Bildung von Kornagglomeraten, die nicht vollständig von der Bindungsmatrix umschlossen werden. Aus diesem Grund nimmt die Biegebruchspannung des Schleifbelags mit steigendem SiC-Anteil ab (siehe Tabelle 1). Dieser Effekt und die damit einhergehende Abnahme der Kornhaltekraft bei steigender Füllkornkonzentration ermöglicht die steigenden Abrichterhältnisse bei der Verwendung von Korundabrichtern. Jedoch sind in Bild 5 Schleifkörner in der



#### Schleifwerkzeug

Bindung: DiaBro 802040

Schleifkorn: D15 C100

Füllkorn: SiC grün #800

#### Abrichtwerkzeug

Saint Gobain

Korund-Topfabrichter

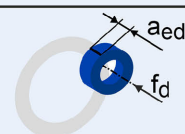
$d_{gd} = F320, F400, F500$

#### Prozessparameter

$f_d = \text{var.}$

$a_{ed} = \text{var.}$

$a_{ed,ges} = 500 \mu m$



**Bild 4.** Abrichtverhältnis  $G_d$  und Kornüberstand  $Sp_k$  nach dem Abrichten mit Korund-Abrichter. Grafik: IFW Hannover

Bindung sichtbar, die geringe Kornüberstände aufweisen, sodass sich auch in diesen Untersuchungen ein geringer Kornüberstand von maximal  $Sp_k = 1,28 \mu\text{m}$  einstellt.

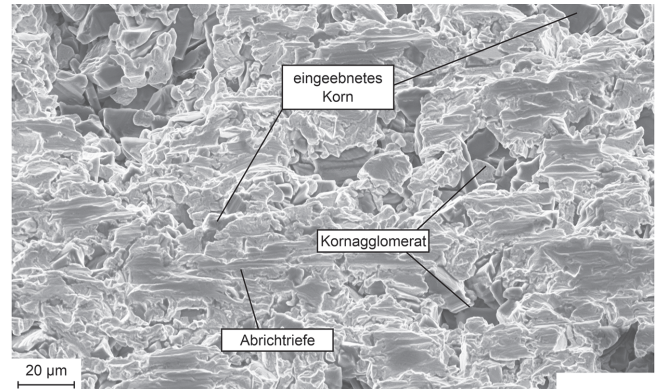
## 4 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Beitrag wurde die Abrichtbarkeit bronzegebundener Diamantschleifscheiben mit einer Korngröße von D15 und einer Diamantkornkonzentration von C100 bei variabler Füllkornkonzentration untersucht. Dazu wurde ein kontinuierlicher Schärfprozess mit keramisch gebundenen SiC- und Korundwerkzeugen mit Korngrößen von F320, F400 und F500 verwendet. Dieser Prozess setzt die Bindung zwischen den Abrasivkörnern zurück bis diese ausbrechen und neue, scharfe Körner freilegen. Mit steigender Füllkornkonzentration nimmt die Bindungshärte der Schleifwerkzeuge ab, sodass Diamantkörner während des Abrichtprozesses schneller aus der Bindung herausbrechen.

So wurde nachgewiesen, dass mit steigender Füllkornkonzentration das Abrichtverhältnis, also das Verhältnis aus zerspantem Schleifwerkzeugvolumen zu abgetragenem Abrichtervolumen, steigt. Allerdings ist für einen effizienten Schleifprozess der Kornüberstand entscheidend, da dieser den Spanraum für den Schleifprozess zur Verfügung stellt und somit eine Spanbildung ermöglicht. Der Mindestkornüberstand von circa 20 % des Schleifkorndurchmessers oder  $3 \mu\text{m}$  wurde jedoch mit keinem der untersuchten Abrichtwerkzeuge und mit keiner der untersuchten Parameterkombinationen erreicht. Somit wurde gezeigt, dass der mechanische Abrichtprozess für die untersuchten Werkzeuge nicht geeignet ist.

Es wurde auch gezeigt, dass das Abrichtverhalten durch die Variation der Bindungsfestigkeit durch die Verwendung von Füllkörnern verbessert wird. Durch die Verwendung einer spröderen Bronze wird in zukünftigen Untersuchungen die Eignung des mechanischen Abrichtprozesses weiter analysiert.

Zusätzliche Untersuchungen fokussieren sich am IFW auf die Verwendung von elektroerosiven Abrichtprozessen für den kontinuierlichen Abrichtprozess für die Bearbeitung von PCBN-Wendeschneidplatten.



**Bild 5.** REM-Aufnahme des Schleifbelags mit einer Füllkornkonzentration von 25 Vol.-% nach dem Abrichten mit dem Korund-Abrichter.

Foto: IFW Hannover

## Literatur

- [1] Kress, J.: Auswahl und Einsatz von polykristallinem kubischem Bornitrid beim Drehen, Fräsen und Reiben. Essen: Vulkan-Verlag 2007
- [2] Butler-Smith, P.: The economics of rapid grinding of PCD and PCBN cutting tools. *Industrial Diamond Review* 63 (2003) 596, pp. 20–23
- [3] Wendt GmbH: Know-How gesucht und gefunden. Systemanbieter präsentiert optimale Lösungen beim Schleifen von CBN-/PKD-Werkzeugen. *NC-Fertigung* (2003) 05–03, S. 84–87
- [4] Behrens, L.: Schleifen von PCBN. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Garbsen: TEWISS Verlag 2016
- [5] Friemuth, T.: Herstellung spanender Werkzeuge. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002
- [6] Denkena, B.; Grove, T.; Kempf, F. et al.: Model-based manufacturing and application of metal-bonded grinding wheels. *CIRP Annals* 68 (2019) 1, pp. 321–324
- [7] Denkena, B.; Krödel, A.; Wilckens, M.: Einfluss der Kornkonzentration auf die Bindungshärte sintermetallischer Schleifwerkzeuge. *Werkstatt und Betrieb*. Stand: Juli 2021. Internet: [www.werkstatt-betrieb.de/a/article-339084](http://www.werkstatt-betrieb.de/a/article-339084). Zugriff am 05.05.2023



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

Dr.-Ing. **Benjamin Bergmann**

Dr.-Ing. **Michael Wilckens**

Leibniz Universität Hannover  
Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen  
An der Universität 2, 30823 Garbsen  
Tel. +49 511 / 762-18849  
[wilckens@ifw.uni-hannover.de](mailto:wilckens@ifw.uni-hannover.de)  
[www.ifw.uni-hannover.de](http://www.ifw.uni-hannover.de)

## DANKSAGUNG

Das IGF-Vorhaben 21444 N „Metallgebundene Werkzeuge zur Produktivitätsmaximierung beim Schleifen hochharter Schneidstoffe“ der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. (FGW) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz und der FGW für die Förderung und Unterstützung des Vorhabens.

## LIZENZ



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