

Optimierung des Abrichtverschleißverhaltens durch Anpassung des Abrichtprozesses

Einsatzvorbereitung von Stäbchenkorund-schleifscheiben

B. Denkena, B. Bergmann, A. Schulze

ZUSAMMENFASSUNG Zur Bearbeitung der Endkontur von Werkstücken werden vorwiegend Schleifverfahren eingesetzt. Aufgrund hoher thermischer und mechanischer Beanspruchungen des Werkstücks und Werkzeugs sind diese Verfahren jedoch auf geringe Abtragsleistungen begrenzt. Durch die Entwicklung neuartiger Stäbchenkorundschleifscheiben wird die Leistungsfähigkeit von Schleifprozessen erhöht. Diese sind bisher aufgrund hoher Kosten bei der Einsatzvorbereitung noch nicht wirtschaftlich einsetzbar.

STICHWÖRTER

Einsatzvorbereitung, Schleifwerkzeuge, Verschleißverhalten

Application preparation of rod-shaped corundum grinding wheels

ABSTRACT Grinding processes are predominantly used to machine the final contour of workpieces. However, due to high thermal and mechanical load on the workpiece and tool, these processes are limited to low removal rates. The development of new types of rod corundum grinding wheels will increase the performance of grinding processes. These are not yet economically viable due to the high costs of preparing them for use.

1 Einleitung

Schleifverfahren sind typischerweise durch niedrige Abtragsleistungen und hohe Schleiftemperaturen gekennzeichnet und stellen meist den letzten Schritt der Endkonturbearbeitung innerhalb eines Fertigungsprozesses dar. Die große thermische Beanspruchung von Werkstück und Werkzeug führt bei einer Vielzahl von Schleifprozessen zu einem frühzeitigen Erreichen der Prozessgrenze, die durch auftretenden Schleifbrand definiert wird. Bei derzeitigen Entwicklungen im Bereich der Schleiftechnologien steht unter anderem die Leistungssteigerung der Schleifprozesse im Fokus. Dabei wird neben der Senkung der Schleiftemperatur auch die Steigerung des Zeitspanvolumens angestrebt. Die Forderung nach höheren Abtragsleistungen bedingt hohe mechanische und thermische Belastungen, weshalb neuartige Schleifwerkzeuge nicht nur eine verbesserte Schnittleistung, sondern auch eine optimierte Kühlsmierstoffzufuhr ermöglichen müssen. Herkömmliche keramisch gebundene Schleifwerkzeuge sind aufgrund ihrer geringen Verschleißfestigkeit bei hohen mechanischen Beanspruchungen und der schlechten Wärmeleitfähigkeit nicht für diese Ansprüche geeignet. Eine Steigerung der mechanischen Belastung dieser Werkzeuge führt unmittelbar zu thermisch bedingten Schädigungen am Werkstück und hohen werkzeugbundenen und verschleißbedingten Kosten des Schleifprozesses. Stäbchenkorundschleifscheiben stellen hingegen eine Möglichkeit zur signifikanten Steigerung der Leistungsfähigkeit von Schleifprozessen dar. Dabei wird die Optimierung der Kühlsmierstoff-

zufuhr durch die Erhöhung der Porosität erreicht. Dadurch gelangt eine größere Menge an Kühlsmierstoff in die Kontaktzone und trägt zur Senkung der Schleiftemperaturen bei [1]. Bedingt durch die Stäbchenform der Schleifkörner wird die Erhöhung der Porosität ohne Verringerung der Bindungsstabilität erreicht [2–3]. Die Verwendung stäbchenförmiger Schleifkörner führt zusätzlich zu einer Reduktion hin zu kleineren negativen Spanwinkeln und somit auch zur Senkung der benötigten Energie für die Trennung des Werkstoffs. Das feinsplitterige Bruchverhalten der Schleifkörner bedingt eine große Anzahl aktiver Schneiden und damit die hohe Schnittfreudigkeit dieser Werkzeuge. Stäbchenkorunde besitzen somit das Potenzial, die Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz eines Schleifprozesses signifikant zu steigern. Dabei sind Steigerungen um bis zu 250 % möglich [4]. Dieses Potenzial zur Leistungssteigerung zeigt Bild 1, da bei gleicher umgesetzter Schleifleistung höhere bezogene Zeitspanvolumina Q'_w erzielt werden, indem die Schleifbrandgrenze erst bei höheren Zeitspanvolumina erreicht wird. Dies wird insbesondere anhand des Vergleichs herkömmlicher Schleifkörner aus Edelkorund weiß mit Stäbchenkorunden deutlich. Die höhere Schneidendichte der Schleifscheibentopographie resultiert hingegen bei der Einsatzvorbereitung in durchschnittlich 30 % höherem Radialverschleiß am Abrichtdiamanten und damit hohen werkzeugbundenen Kosten [5–6]. Die Kosten der Einsatzvorbereitung können dabei prozessindividuell bis zu 50 % der gesamten Prozesskosten betragen [7–8]. Dies verhindert derzeit den wirtschaftlichen Einsatz der Stäbchenkorundschleifscheiben. In Ver-

bindung mit den fehlenden Kenntnissen zum Abrichtprozess wird deshalb das Potenzial der Stäbchenkornscheiben für Schleifprozesse bisher kaum genutzt. Dieser Beitrag zeigt den Einfluss des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses q_d beim Abrichten von Stäbchenkorundschleifscheiben auf das Verschleißverhalten des Abrichtwerkzeugs und schafft damit erste Erkenntnisse zum wirtschaftlichen Einsatz dieser neuartigen Schleifwerkzeuge. Während ein Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis von $q_d = 0,8$ dem industriellen Standard entspricht [9], wird mit der Steigerung von q_d die Reduzierung des Impulses beim Abrichten erwartet [10]. Dieser Impuls beeinflusst wiederum das Bruchverhalten der Wirkkomponenten, weshalb mit höheren Abrichtgeschwindigkeitsverhältnissen die Reduzierung des Abrichtverschleißes angestrebt wird.

2 Planung und -aufbau der Verschleißuntersuchungen

Um Kenntnis über den Einfluss des Abrichtprozesses auf die Verschleißmechanismen von CVD-D Abrichtdiamanten beim Abrichten von Stäbchenkorundschleifscheiben zu erlangen, werden Verschleißuntersuchungen durchgeführt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen die Auslegung des Abrichtwerkzeugs und -prozesses, die zur Reduktion des Verschleißes beiträgt. Zur isolierten Betrachtung der Verschleißmechanismen an einer Schneide eines Abrichtwerkzeugs erfolgen die experimentellen Schleifuntersuchungen im Analogieprozess. Der Versuchsaufbau ist in **Bild 2** dargestellt. Als konstante Abrichtparameter wurden eine Schnittgeschwindigkeit v_c von 30 m/s, eine Zustelltiefe a_e von 10 m sowie ein Überdeckungsgrad U_d von 5 verwendet. Neben dem Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis q_d (0,3; 0,8; 3) wurden der Eckenradius r_e (0,125 mm; 0,5 mm), die CVD-Sorte der Abrichtplatte (Bezeichnung des Herstellers Dr. Kaiser: P7; P8) sowie die Schleifscheiben (Edelkorund-weiß EKW als Referenz, Stäbchenkorundschleifscheiben mit verschiedenen Korn-Aspektverhältnissen $L = x \cdot D$) variiert. Die Prozessststellgrößen des Abrichtprozesses wurden gezielt gewählt, um erhöhte Belastungen beim Abrichten zu untersuchen. Die Variation des Eckenradius und der CVD-Sorte wurde auf zwei Versuchspläne aufgeteilt, womit bei teilstatistischer Durchführung und zweifacher Wiederholung insgesamt 90 Versuche resultieren. Die Versuche wurden auf einem 6-Achs-Verzahnungszentrum des Typs „KX1“ der Firma Kapp Niles durchgeführt. Dabei wird die CVD-D Abrichtplatte in ein einschneidendes rotierendes Abrichtwerkzeug eingespannt und mit der Schleifscheibe in Eingriff gebracht. Mittels stehendem Vielkornabrichter wurden die eingesetzten Schleifscheiben initial vor jedem Versuch abgerichtet. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Identifikation von Wechselwirkungen zwischen den Schleifscheibeneigenschaften, dem Abrichtwerkzeug (Eckenradius und CVD-D Sorte) sowie dem Abrichtprozess (Geschwindigkeitsverhältnis zwischen Schleifscheibe und Abrichtwerkzeug).

3 Untersuchung der CVD-Abrichtdiamanten

Bei den Versuchen werden zwei CVD-D Sorten (P7, P8) sowie zwei Schneidenausführungen (Eckenradius $R = 0,125$ mm, $R = 0,5$ mm) verwendet. Vor Einsatz der CVD-D Abrichtdiamanten wird die Orientierung der Diamanten an der Oberfläche beider CVD-D Sorten untersucht. Aus vorherigen Arbeiten ist bekannt, dass die Textur der CVD-D Schicht einen Einfluss auf die

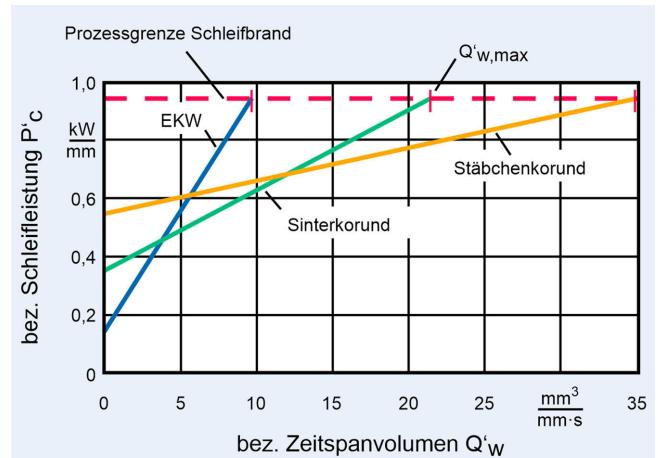


Bild 1. Einordnung Stäbchenkorund. Grafik: IFW Hannover

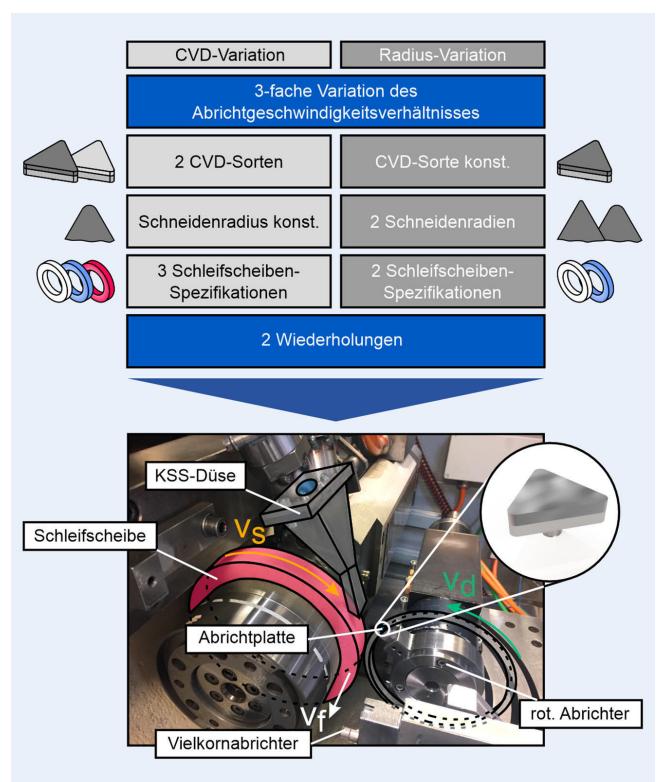


Bild 2. Versuchsplanung und -aufbau der Verschleißuntersuchungen. Grafik: IFW Hannover

Verschleißmechanismen hat. Derartige Erkenntnisse sind für die Schleifscheibenkonditionierung von Stäbchenkorundschleifscheiben bisher nicht verfügbar. Unter der Textur der CVD-D Schicht versteht man die Orientierung beziehungsweise Vorzugsrichtung der Diamanten an der Oberfläche der Abrichtdiamanten. Zur Analyse der Texturen wurden mittels Röntgendiffraktometer (XRD) sogenannte Polfiguren für jede der drei Netzebenen des Diamants (111, 220 und 311) erstellt. Dabei werden monochromatische Röntgenstrahlen unter dem jeweiligen Beugungswinkel auf eine Probe gerichtet. Diese wird während der Messung bei unterschiedlichen Poldistanzwinkel (0° bis 70°) um den Azimutwinkel (0° bis 360°) gedreht. Die gebeugten Strahlen werden aufgezeichnet und es entsteht eine charakteristische Intensitäts-

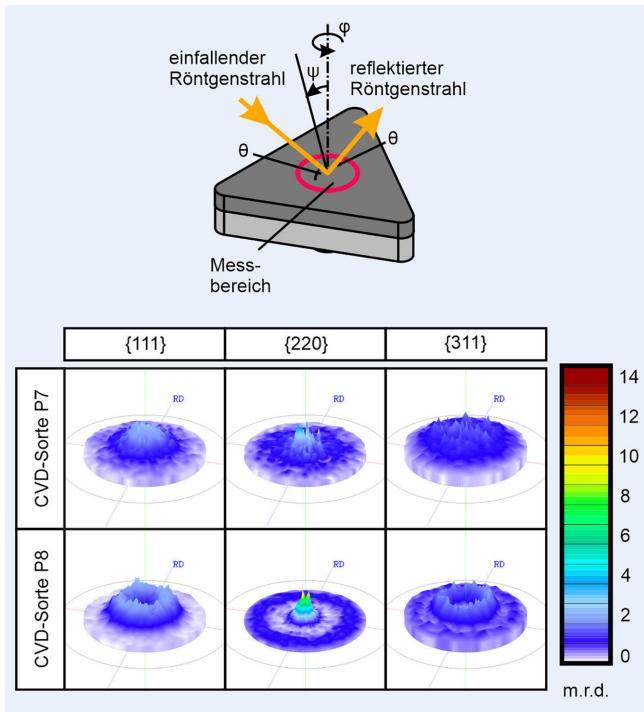


Bild 3. Texturanalyse und Polfiguren. Grafik: IFW Hannover

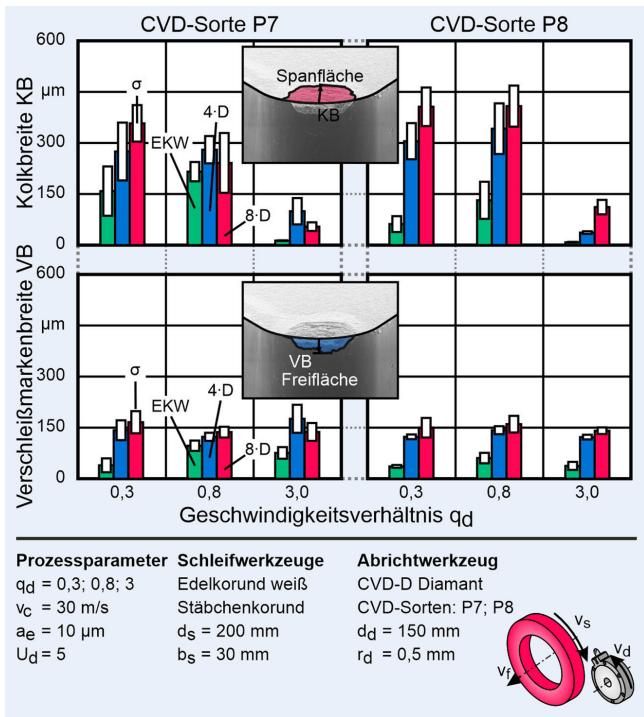


Bild 4. Kolkbreiten und Verschleißmarkenbreiten an den CVD-D Abrichtdiamanten. Grafik: IFW Hannover

verteilung, die als Polfiguren dargestellt wird. Aus diesen Polfiguren können die Orientierung der Kristallite und der Texturgrad der Beschichtung bestimmt werden. Der Texturgrad wird in der Einheit m.r.d. (multiples of the random distribution) angegeben. Insgesamt wurden drei Messungen je CVD-D Sorte durchgeführt und mit der Software „LaboTex“ ausgewertet. **Bild 3** zeigt für beide untersuchten CVD-D Sorten drei charakteristische Polfigu-

ren je Netzebene. Die Messergebnisse der der Sorte P7 zeigen eine leichte, die der Sorte P8 eine etwas ausgeprägtere Fasertextur. Diese Netzebene ist parallel zur Spanfläche orientiert. Bedingt durch den schichtweisen CVD-Herstellungsprozess ist diese Orientierung am häufigsten anzufinden.

4 Durchführung und Auswertung der Analogieuntersuchungen

Zur Analyse der Verschleißmechanismen wurde der Verschleiß der CVD-D Abrichtplatten anhand von Mikroskopaufnahmen der Span- und Freifläche der Schneiden beurteilt. Hierfür wurden Aufnahmen mit einem digitalen Bildmikroskop des Typs „VHX-600DSO“ der Firma Keyence gemacht. Zur Messung des Verschleißes wurden die Kolk- und Verschleißmarkenbreite (KB, VB) erfasst. Zusätzlich wurden REM-Aufnahmen der Ausbruchstellen erstellt, um die Verschleißmechanismen zu ermitteln. Zur Analyse potenzieller Materialanhäufungen in den Ausbruchstellen wurden EDX-Messungen an ausgewählten Schneiden durchgeführt.

4.1 Auswertung des Verschleißes der Abrichtdiamanten

In **Bild 4** werden die gemessenen Kolkbreiten in Abhängigkeit vom Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis q_d für beide untersuchten CVD-D Sorten dargestellt. Des Weiteren erfolgt eine Unterscheidung zwischen den drei verschiedenen Schleifscheibenarten Edelkorund weiß (EKW) als Vergleichsschleifscheibe sowie den Stäbchenkorundschleifscheiben mit den Aspektverhältnissen 4-D und 8-D. Es zeigt sich, dass das Abrichten mit Stäbchenkorundschleifscheiben im Vergleich zur EKW-Schleifscheibe zu einem signifikant höheren Verschleiß an der Spanfläche und Freifläche der Abrichtplatte führt. Der erhöhte Verschleiß ist hierbei auf die höhere Anzahl aktiver Schneiden zurückzuführen. Dies führt zu einer Steigerung der Korneingriffe am Abrichtwerkzeug, das zu einer Zunahme des Verschleißes führt. Mit Steigerung des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses verkürzt sich die Kontaktlänge des Eingriffsbogens der Schneide der Abrichtplatte. Dies wirkt sich somit auf den Verschleiß des Abrichtwerkzeugs aus und führt zu einer Reduktion der Kolkbreite. Beim Vergleich der CVD-D Sorten ist auffällig, dass das Verschleißniveau der Sorte P8 höher als das der Sorte P7 ist. Dies ist auf die unterschiedlich ausgeprägte Textur der CVD-D Schicht beider eingesetzter Abrichtplatten-Sorten zurückzuführen. Es wird dabei deutlich, dass eine stärker ausgeprägte Textur (CVD-D Sorte P8) mit einem größeren Verschleiß an der Spanfläche einher geht. In vorangegangenen Untersuchungen konnte dieses Verhalten ebenfalls beobachtet werden und wurde auf die Anisotropie der Diamantschicht zurückgeführt [11]. Darüber hinaus weisen die Verschleißmessungen auch Unterschiede zwischen den Stäbchenkorundschleifscheiben (4-D und 8-D) auf. Es zeigt sich, dass die Schleifscheibe mit größerem Aspektverhältnis grundsätzlich zu einem geringfügig gesteigerten Verschleiß an der Spanfläche führt. Ursächlich ist dabei die verlängerte Reiblänge des Schleifkorns. Im Vergleich zur Kolkbreite wird der Freiflächenverschleiß nur geringfügig vom Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis beeinflusst. Jedoch führt auch hier das Abrichten von Stäbchenkorundschleifscheiben gegenüber der Referenz zu erhöhtem Verschleiß. Ursächlich für dieses Verhalten ist, dass der primäre Eingriff und somit der Abtrag der Schleifscheibenoberfläche durch die Spanfläche erfolgt. Der Impuls, der

von der Rotationsgeschwindigkeit abhängt, wirkt somit hauptsächlich auf die Spanfläche und bedingt den Einfluss auf die Kolkbreite. Mit der Vergrößerung des Eckenradius von 0,125 mm auf 0,5 mm verringert sich der Spanflächenverschleiß um durchschnittlich 67 %. Es wird gefolgert, dass bei kleinem Eckenradius eine höhere Flächenlast auftritt, wodurch kritische Spannungen im Abrichtwerkzeug entstehen, während die Flächenlast bei größerem Eckenradius geringer ist und entlang der Schneide verteilt wird.

4.2 REM und EDX-Messungen

Bild 5 zeigt REM-Aufnahmen ausgewählter Ausbruchstellen an der Schneide der Abrichtplatte exemplarisch für die CVD-D Sorte P8 nach dem Abrichten der Stäbchenkorundschleifscheibe 8-D. Während die Messung der Kolk- und Verschleißmarkenbreite eine quantitative Aussage zum auftretenden Verschleiß zulässt, ermöglichen die REM-Aufnahmen eine qualitative Beurteilung der primär vorherrschenden Verschleißmechanismen. Anhand der Aufnahmen wird ersichtlich, dass der Verschleiß bei geringen Abrichtgeschwindigkeitsverhältnissen vorwiegend durch große Ausbrüche der CVD-D Substratschicht geprägt ist. Besonders deutlich wird dies an der großen Bruchkante der ersten Probe ($q_d = 0,3$). Mit steigendem Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis tritt hingegen zunehmend eine Kombination der Mechanismen der Oberflächenzerrüttung (ausgeprägt) und des abrasiven Verschleißes (geringfügig ausgeprägt) auf, die sich zudem auf eine signifikant kleinere Verschleißfläche beschränkt. Im Gegensatz zum Abrichten der Stäbchenkorundschleifscheiben treten beim Abrichten der EKW-Schleifscheiben keine Ausbrüche, sondern ausschließlich abrasiver Verschleiß auf. Neben rasterelektronischen Aufnahmen wurden die Proben mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie analysiert, um adhäsionsbedingte Verschleißmechanismen zu charakterisieren. Ein Auszug der gemessenen Spektren ist in **Bild 6** dargestellt. Reste der Schleifscheiben aus Korund (Al_2O_3) lagern sich in Form von Werkstoffanhafungen (adhäsiver Verschleiß) an der Ausbruchstelle des CVD-D Abrichtdiamanten ab. Diese kennzeichnen sich durch erhöhte Anteile von Aluminium. Das Abrichten der Stäbchenkorundschleifscheiben führt erst bei $q_d = 3$ zu Aluminiumablagerungen an der Schneide. Die verwendeten Stäbchenkorundschleifscheiben unterscheiden sich dabei ebenfalls (0,98 Vol.-% Al bei 4-D zu 1,78 Vol.-% Al bei 8-D). In Folge des Verschleißes durch Ausbrüche kommt es bei $q_d \leq 0,8$ zu keinen Werkstoffanhafungen. Beim Abrichten der EKW-Schleifscheibe treten hingegen, unabhängig vom Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis, durchgehend Materialanhafungen auf.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Verschleißreduzierung bei der Einsatzvorbereitung von Stäbchenkorundschleifscheiben stellt eines der zentralen Ziele zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit beim Einsatz dieses Schleifscheibentyps dar. Da zur Profilierung dieser Werkzeuge typischerweise CVD-D Abrichtwerkzeuge eingesetzt werden, ist Verschleiß an diesen Werkzeugen sehr kostenintensiv. Bei den durchgeföhrten Abrichtuntersuchungen der Stäbchenkorundschleifscheiben resultierte erhöhter Verschleiß an den CVD-D Abrichtdiamanten. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl das Aspektverhältnis des Stäbchenkorunds sowie auch das Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis

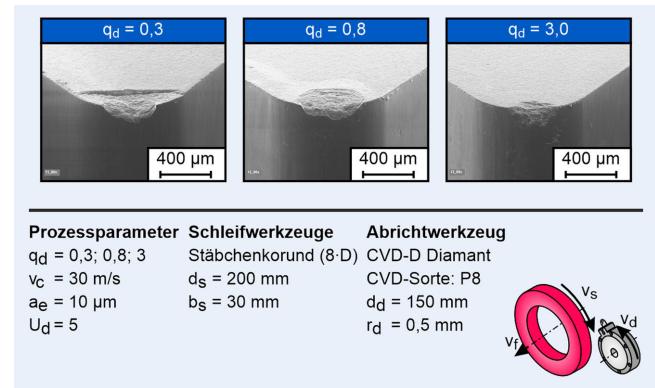


Bild 5. REM-Aufnahmen der Ausbruchstellen am Beispiel der CVD-D Sorte P8. *Grafik: IFW Hannover*

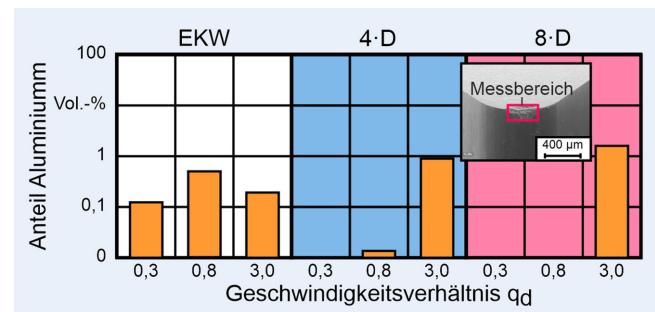


Bild 6. Verschleiß durch Adhäsion in der Ausbruchstelle. *Grafik: IFW Hannover*

nis signifikant den Verschleiß am Abrichtwerkzeug beeinflussen. Der Einfluss des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses ist dabei am signifikantesten. Daraus folgt, dass durch die Steigerung des Geschwindigkeitsverhältnisses zwischen Schleifscheibe und Abrichtwerkzeug ein erhebliches Potenzial zur wirtschaftlichen Einsatzvorbereitung von Stäbchenkorundschleifscheiben besteht. Zukünftig werden die Erkenntnisse dieser Untersuchungen vom Analogieprozess mit einschneidigem Werkzeug auf den industriell relevanten Abrichtprozess mit Formrolle übertragen. Eine weitere Steigerung des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses bietet dabei das Potenzial für eine Optimierung des Verschleißverhaltens und entsprechender Senkung der Kosten der Einsatzvorbereitung. Daraüber werden die Wirkzusammenhänge zwischen den Stellgrößen der Einsatzvorbereitung und dem Einsatzverhalten untersucht.

DANKSAGUNG

Die dargestellten Ergebnisse wurden innerhalb des AiF geförderten Projektes „Grundlagen für den wirtschaftlichen Einsatz von Stäbchenkorundschleifscheiben“ erarbeitet. Die Autoren danken der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen und dem Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. (VDW) für die finanzielle Förderung innerhalb des Projektes „N22061/N“. Zudem danken die Autoren dem projektbegleitenden Ausschuss für die fachliche Diskussion und die Bereitstellung der Werkzeuge.

L i t e r a t u r

- [1] Heinzel, C.; Meyer, D.; Kolkwitz, B.; Eckebrécht, J.: Advanced approach for a demand-oriented fluid supply in grinding, CIRP Annals – Manufacturing Technology 64, S. 333–336, 2015
- [2] Bohr, S.: Analytische Betrachtung hochporöser Bindungssysteme für das Präzisionschleifen, in: Azarhoushang, B. (Hrsg.): Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung, 11. Seminar, Villingen-Schwenningen, 2016
- [3] Huber, C.: Strategien für einen kühleren Schliff durch innovative Schleifwerkzeuge, in: Tawakoli, T. (Hrsg.): Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung, 9. Seminar, Stuttgart, 2012
- [4] Wegener, K.; Bleicher, F.; Krajnik, P.; Hoffmeister, H.-W.; Becher, C.: Recent developments in grinding machines, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 66, S. 779–802, 2017
- [5] Liu, Q.; Chen, X.; Gindy, N.: Assessment of Al₂O₃ and superabrasive wheels in nickel-based alloy grinding,
- [6] International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 33, S. 940–951, 2007
- [7] Al-Rawi, R.: Interview zum Verschleiß von konventionellen Schleifwerkzeugen, Schleiftechnologieexperte, Saint-Gobain Abrasive GmbH, 04.06.2020
- [8] Brunner, G.: Schleifen mit mikrokristallinem Aluminiumoxid, Dr.-Ing. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 1997
- [9] Suntharakumaran, V.: Profilschleifen mit sintermetallischen CBN-Schleifscheiben, Schleifen von aluminiumhaltigem UHC-Stahl, Dr.-Ing. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2019
- [10] Wegener, K.; Hoffmeister, H.-W.; Karpuschewski, B.; Kuster, F.; Hahmann, W.-C.; Rabiey, M.: Conditioning and monitoring of grinding wheels, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 60, S. 757–777, 2011

- [11] Marinescu, I.D.; Hitchiner, M.; Uhlmann, E.; Rowe, W.B.; Inasaki, I.: Handbook of Machining with Grinding Wheels, CRC Press, Boca Raton, 2007
- [12] Gartzke, T.: Profiltiefschleifen mit mikrostrukturierter Schleifscheiben-topographie, Dr.-Ing. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2022



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

Dr.-Ing. Benjamin Bergmann

Alexander Schulze, M. Sc. 

Universität Hannover
Institut für Fertigungstechnik
und Werkzeugmaschinen IFW
An der Universität 2, 30823 Garbsen
Tel. +49 511 / 762 18179
schulze@ifw.uni-hannover.de
www.ifw.uni-hannover.de

L I Z E N Z



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