

Einsatzverhalten strukturierter Schleifscheiben beim Doppelseitenplanschleifen

# Bearbeitung hochharter Keramik-Werkstücke

E. Uhlmann, A. Muthulingam, M. van der Meer

**ZUSAMMENFASSUNG** Das zweiseitige Läppverfahren wird zunehmend durch das Doppelseitenplanschleifen substituiert. Die Vorteile liegen in der höheren Produktivität und der deutlich geringeren Umweltbelastung. Aktuell bestehen jedoch große Herausforderungen bei der Bearbeitung von hochharten und großflächigen Bauteilen hinsichtlich der geforderten Werkstückqualität und Wirtschaftlichkeit, sodass oft weiterhin auf das Läppverfahren zurückgegriffen wird. Vor diesem Hintergrund wurden strukturierte Schleifwerkzeuge entwickelt und im Einsatz untersucht.

**STICHWÖRTER**

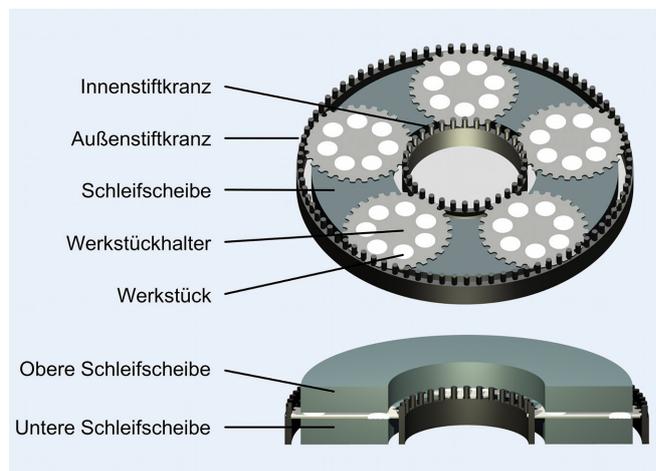
Fertigungstechnik, Schleifen, Keramik

## Application behaviour of structured grinding wheels in double face grinding – Machining of extremely hard ceramic workpieces

**ABSTRACT** The double-sided lapping process is increasingly being replaced by double face grinding process. The advantages are increased productivity and significantly lower environmental impact. However, there are challenges when machining extremely hard and large components in terms of the required workpiece quality and cost-efficiency, causing the continuing application of the lapping process. Based on this, structured grinding wheels were developed and analyzed during machining.

### 1 Einleitung

Der steigende Anspruch an die Werkstückqualität und die Kosteneffizienz von Zerspanungsprozessen sowie die zunehmende Bedeutung ihrer Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz führen zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung von Werkzeugen und den entsprechenden Fertigungsprozessen. Das zweiseitige Planläppen und das Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik (DPMP) werden zur Feinbearbeitung von planparallelen Funktionsflächen mit hohen Anforderungen an Form- und Maßgenauigkeit eingesetzt. Diese Verfahren werden beispielsweise zur Fertigung von Lagerringen, Wendschneidplatten sowie bei Dicht- und Regelscheiben angewendet [1; 2; 3]. Mit diesen Prozessen lässt sich eine sehr gute Oberflächenqualität sowie ein hoher Grad an Planparallelität der Bauteile erzielen [2; 4]. Aufgrund der niedrigen Materialabtrennrates und der erhöhten Umweltbelastung wird das zweiseitige Planläppen zunehmend durch das DPMP ersetzt. Die Vorteile des Doppelseitenplanschleifens liegen in einer gesteigerten Produktivität durch höhere Schnittgeschwindigkeiten sowie in einer deutlich geringeren Umweltbelastung durch den Einsatz von Schleifscheiben mit gebundenen Diamantschleifkörnern oder Schleifkörnern aus kubischem Bornitrid (CBN) in Kombination mit einem Kühlschmierstoffkreislauf [5; 6]. Die gebundenen Schleifkörnern nehmen bis zum vollständigen Ausbruch aus der Schleifscheibenbindung am Zerspanungsprozess teil. Neben den primären Aufgaben des Kühlschmierstoffs (KSS), wie der Reduktion von Reibung und der Kühlung der Kontaktzone, zählen auch sekundäre Aufgaben wie das Reinigen der Schleifscheibe und das Entfernen der Späne zu den Vorteilen.



**Bild 1.** Hauptkomponenten beim Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik [2]. Grafik: IFW

Durch den Einsatz von KSS und gebundenen Schleifkörnern können im Vergleich zum Läppen deutlich höhere Schnittgeschwindigkeiten und Materialabtrennrates erzielt werden. Dennoch sind die Schnittgeschwindigkeiten und die daraus resultierende Bearbeitungstemperatur im Vergleich zu anderen Schleifverfahren niedriger [2; 4; 7].

Der Maschinenaufbau beim DPMP besteht aus zwei horizontal angeordneten Schleifscheiben, zwischen denen die Werkstücke ungespannt in außenverzahnte Werkstückhalter eingelegt werden, **Bild 1**. Die Werkstückhalter werden von einem angetriebenen In-



**Bild 2.** Versuchsaufbau mit vollflächiger Schleifscheibe vs. strukturierter Schleifscheibe. *Grafik: IFW*

nenstiftkranz und einen meist feststehenden Außenstiftkranz geführt. Unter Einsatz von Kühlschmierstoff werden die Werkstücke unter stetigem, flächenhaftem und doppelseitigem Kontakt an der Ober- und Unterseite bearbeitet. Die Werkstücke werden während des Prozesses auf zyklischen Bahnformen über die Schleifscheibenoberflächen bewegt, die sich aus der Überlagerung der angetriebenen Schleifscheiben, der Drehung des Innenstiftkranzes und der daraus resultierenden Rotation des Werkstückhalters ergeben. Die Kinematik ähnelt der eines Planetengetriebes, woraus sich auch die Bezeichnung des Verfahrens ableitet. Durch den flächenhaften Eingriff der Schleifscheiben werden die Flächen eines Werkstücks gleichmäßig belastet. Die geschliffenen Werkstückoberflächen sind meist durch ungerichtete, sich kreuzende Bearbeitungsspuren charakterisiert [2; 8; 9].

Trotz der genannten Vorteile des DPMP gibt es derzeit Herausforderungen bei der Bearbeitung von hochharten und großflächigen Werkstücken, insbesondere im Hinblick auf die Erreichung der erforderlichen Werkstückqualität und Kosteneffizienz, wie beispielsweise bei der Bearbeitung von Messern und Schabern aus Siliziumcarbid oder -nitrid in der Papierverarbeitung. Durch die Ausprägung eines KSS-Films, ähnlich dem Effekt beim Aquaplaning, in der Kontaktzone wird die zur Zerspanung erforderliche Prozesskraft beeinträchtigt. Nach der Bearbeitung können die Werkstücke außerdem an der oberen Schleifscheibe durch Adhäsionskräfte haften und die Nebenzeiten beim Be- und Entladen verlängern. Zudem ist aufgrund der großen Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstück die Versorgung mit KSS oft unzureichend, um einen ausreichenden Spanabtransport sicherzustellen. Dadurch führen abgetrennte Materialwerkstoff sowie Korn- und Bindungsrückstände zu einer Zusetzung der Schleifscheiben. Die daraus resultierende kurze Standzeit und das häufige Abrichten der Schleifwerkzeuge führen zu einer verringerten Produktivität und einer höheren Umweltbelastung. Aus den genannten Gründen wird die Bearbeitung von hochharten und großflächigen Werkstücken trotz der enormen Umweltbelastung weiterhin durch das Läppverfahren durchgeführt.

Einen Ansatz zur Begegnung der oben genannten Herausforderungen stellt die Schleifbelagsstrukturierung dar. Hierzu können Nuten in den Belag eingebracht werden, die den Spanraum vergrößern, sodass die KSS-Zufuhr und die Spanabfuhr begünstigt werden. Zudem wirken die Nuten dem Aufschwimmen und Anhaften der Werkstücke entgegen. Die Strukturierung kann dabei über radiale oder evolventenförmige Nuten sowie Schleifpellets beliebiger Form und Abstände zueinander realisiert wer-

den. Forschungsprojekte zum Umfangsschleifen haben gezeigt, dass strukturierte Schleifscheiben das Prozessverhalten hinsichtlich der erzielbaren Werkstückqualität, der KSS-Zufuhr in den Schleifspalt und der Spanabfuhr positiv beeinflussen können [10; 11]. Für das DPMP liegen diesbezüglich bisher nur allgemeine Erkenntnisse und das Erfahrungswissen der Hersteller vor. Eine gezielte, anwendungsspezifische Auslegung eines Schleifwerkzeugkonzeptes für die doppelseitige Schleifbearbeitung großflächiger und hochharter Werkstücke ist Gegenstand laufender Forschung. Dazu wurden zunächst in Kooperation mit dem Schleifscheibenhersteller Krebs & Riedel Schleifscheibenfabrik GmbH (nachfolgend K&R), Bad Karlshafen, verschiedene Schleifbelagsstrukturen entwickelt und deren Einfluss auf das Fließverhalten des KSS im Schleifspalt untersucht. Anschließend wurden experimentelle Untersuchungen mit der idealen Schleifbelagsstrukturierung durchgeführt. Zur Beurteilung des Einsatzverhaltens wurden zusätzlich Versuche ohne Schleifbelagsstrukturierung durchgeführt. Die Ergebnisse werden in diesem Beitrag vorgestellt.

## 2 Technologische Untersuchungen

Die Wahl einer geeigneten Schleifbelagsstruktur kann die KSS-Zufuhr während des Schleifprozesses begünstigen, die ein Anhaften sowie ein Aufschwimmen der Bauteile verhindert. Um den Einfluss verschiedener Schleifbelagsstrukturen zu bewerten, wurde ein Computational Fluid Dynamics (CFD) basiertes Simulationsmodell entwickelt. Es konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von evolventenförmigen Nuten zu einer gleichmäßigen Verteilung des Kühlschmierstoffs über den gesamten Schleifscheibenbelag führt, die sich aus der Verdrängungswirkung der Struktur ergibt [10]. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurden technologische Untersuchungen mit und ohne Schleifbelagsstrukturierung durchgeführt, **Bild 2**. Zusätzlich wurden die Prozessparameter Schleifscheibendrehzahl  $n_s$ , Drehzahlverhältnis  $N_L$  und KSS-Volumenstrom  $\dot{V}_{KSS}$  variiert und deren Einfluss auf das Prozessverhalten untersucht. Das Drehzahlverhältnis  $N_L$  ist als Quotient aus Drehzahl des Innenstiftkranzes  $n_i$  und Drehzahl der Schleifscheibe  $n_s$  definiert. Die Versuche wurden zunächst mit der vollflächigen Schleifscheibe durchgeführt. Anschließend wurden die Schleifscheiben bei K&R vorbereitet und mittels des Wasserstrahlschneidens die evolventenförmigen Nuten eingebracht. Der Versuchsplan ist in der **Tabelle** dargestellt.

Die Versuche wurden auf dem Maschinensystem „DLM 505 HS“ der Firma Stähli Läpp Technik AG, Pieterlen/Biel,

Tabelle. Versuchsplan für die technologischen Untersuchungen.

Einflussgröße	Einheit	Prozessfenster	
KSS-Volumenstrom $\dot{V}_{KSS}$	l/min	50	25
Schleifscheibendrehzahl $n_s$	1/min	200	400
Drehzahl des Innenstiftkranz $n_i$	1/min	- 10	- 100
Schleifscheibenspezifikation	-	vollflächig	strukturiert

**Werkzeug**

Bezeichnung 43D126 X18 V 121 18 - 75  
 Schleifmittel Diamant  
 Bindung Keramik  
 Korngröße  $d_k = 126 \mu\text{m}$   
 Kornkonzentration  $C = 3,3 \text{ ct/cm}^3$

**Werkstück**

Werkstoff ZTA  
 Länge  $l_w = 50 \text{ mm}$   
 Breite  $b_w = 50 \text{ mm}$

**Abrichtwerkzeug**

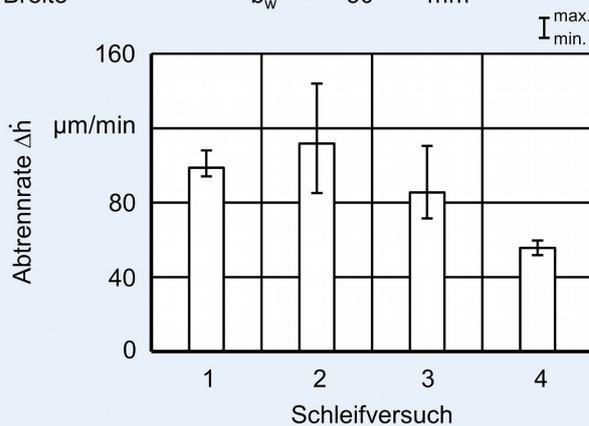
SiC-Schärfringe

**Abrichtparameter**

$n_{sd,o} = 38 \text{ 1/min}$   
 $n_{sd,u} = -30 \text{ 1/min}$   
 $n_{i,d} = 30 \text{ 1/min}$   
 $F_{pd} = 30 \text{ daN}$   
 $\Delta h_d = 400 \mu\text{m}$

**Schleifprozess:**

Gegenlauf  
 $n_s = \text{var.}$   
 $n_i = \text{var.}$   
 $F_p = 70 \text{ daN}$   
 $\dot{V}_{KSS} = 50 \text{ l/min}$



**Schleifversuch**

Nr.	Einheit	$n_s$	$n_i$
1	1/min	200	-10
2	1/min	200	-100
3	1/min	400	-10
4	1/min	400	-100

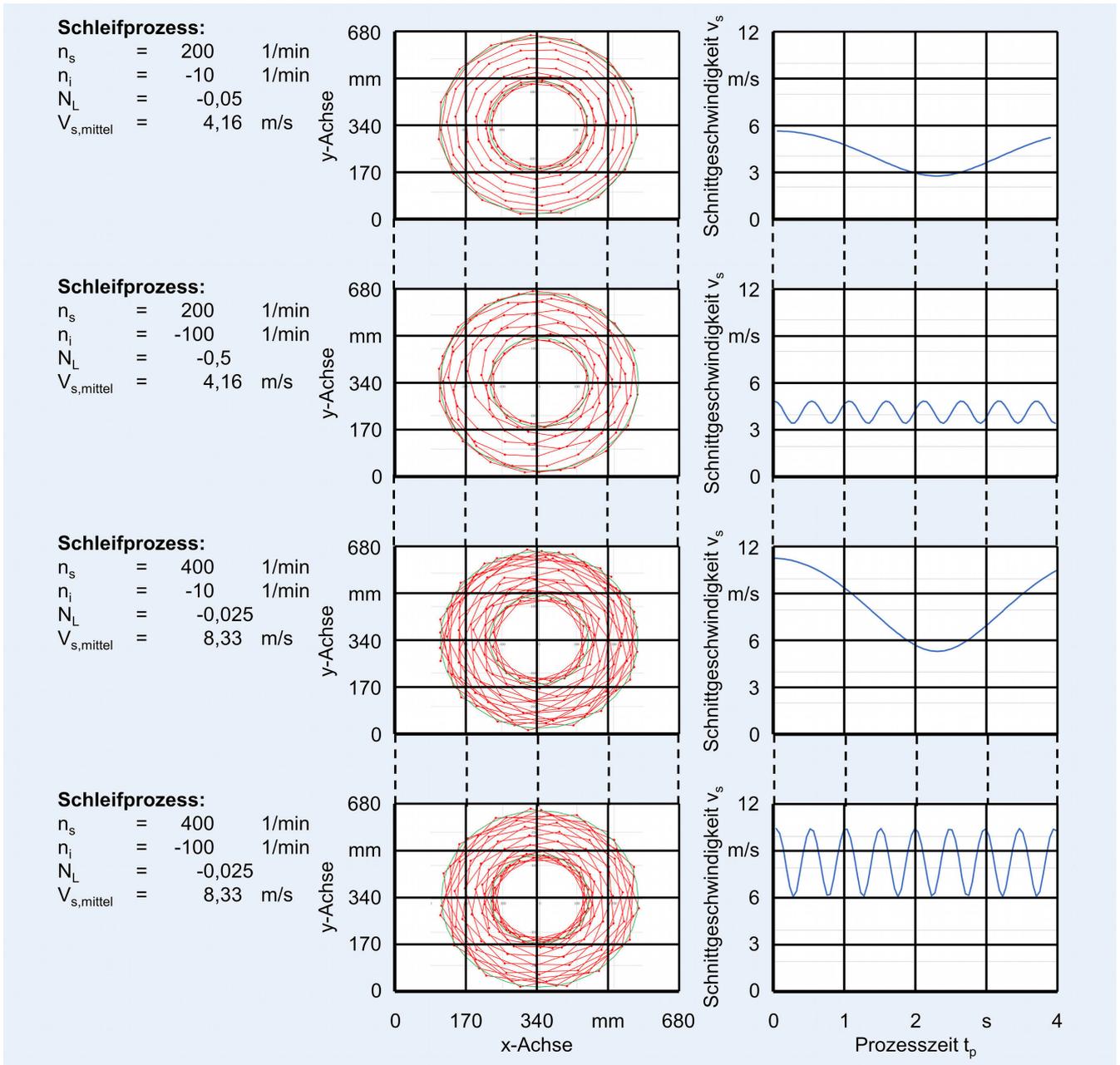
Bild 3. Einsatzverhalten vollflächiger Schleifscheiben. Grafik: IFW

Schweiz, am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin durchgeführt. Als Werkzeuge kamen keramikgebundene Diamantschleifscheiben mit der Belagsspezifikation 43D126 X18 V 121 18 75 der Firma K&R zum Einsatz. Die Schleifversuche wurden mit keramischen Versuchswerkstücken aus Zirkoniumoxid verstärktem Aluminiumoxid (ZTA) bei einer Werkstückbelegung von  $B = 22,66 \%$  durchgeführt. Die Werkstücke wurden von der Firma Qsil, Ilmenau, zur Verfügung gestellt. Für die Bearbeitung wurden jeweils drei Werkstücke in den Abmaßen 50 mm x 50 mm in fünf Läuferscheiben eingesetzt. Jede Parameterkombination wurde dreimal durchgeführt und die Schleifscheiben anschließend mit Siliziumcarbid (SiC) Schärfringen mit der Spezifikation 57C 120 I5 V59, ebenfalls von K&R bereitgestellt, abgerichtet. Die Abrichtparameter wurden konstant gehalten. Sowohl die Schleif- als auch die Abrichtprozesse erfolgten unter Einsatz des Schleiföls „DP5“ der Firma Rhenus Lub GmbH, Mönchengladbach.

### 3 Auswirkung der Schleifbelagsstrukturierung auf das Schleifverhalten

In technologischen Untersuchungen wurde zunächst das Einsatzverhalten der vollflächigen Schleifwerkzeuge beim Doppelseitenplanschleifen der Keramikbauteile untersucht. Die Ergebnisse zu den erzielten Abtrennraten  $\Delta h$  bei konstanter Prozesskraft von  $F_p = 70 \text{ daN}$  und variierenden Drehzahlen der Antriebe sind in **Bild 3** dargestellt. Bei einer Schleifscheibendrehzahl von  $n_s = 200 \text{ 1/min}$  und einer Drehzahl des Innenstiftkranzes von  $n_i = -10 \text{ 1/min}$  wird eine mittlere Abtrennrates von  $\Delta h = 98,89 \mu\text{m/min}$  erreicht. Die Erhöhung der Drehzahl des Innenstiftkranzes auf  $n_i = 100 \text{ 1/min}$  bewirkt eine Zunahme der mittleren Abtrennrates um 13 % auf  $\Delta h = 111,84 \mu\text{m/min}$ .

Im Gegensatz dazu führt eine Erhöhung der Schleifscheibendrehzahl von  $n_s = 200 \text{ 1/min}$  auf  $n_s = 400 \text{ 1/min}$  zu einer Verringerung der mittleren Abtrennrates  $\Delta h$ . Diese Reduzierung fällt mit 13 % bei niedriger Drehzahl des Innenstiftkranzes gering aus, verstärkt sich aber auf 44 % bei höherer Drehzahl des Innenstiftkranzes. Dabei ergibt sich bei einer Drehzahl des Innenstiftkranzes von  $n_i = -10 \text{ 1/min}$  eine mittlere Abtrennrates von  $\Delta h = 85,48 \mu\text{m/min}$ , während bei  $n_i = -100 \text{ 1/min}$  die mittlere



**Bild 4.** Zyklische Bewegungsbahnen der Werkstücke über die Schleifscheibenoberfläche sowie die mittlere Schnittgeschwindigkeit  $v_{s,mittel}$  in Abhängigkeit der Prozessparameter. Grafik: IFW

Abtrennrate auf  $\Delta h = 55,74 \mu\text{m}/\text{min}$  abnimmt. Die Unterschiede in den Ergebnissen resultieren durch die variierende Bahnformbewegung, welche durch das Drehzahlverhältnis  $N_L$  beeinflusst wird.

Zur weiteren Analyse wurden die resultierenden zyklischen Bewegungsbahnen der Werkstücke über die Schleifscheibenoberfläche sowie die mittlere Schnittgeschwindigkeit  $v_{s,mittel}$  betrachtet, **Bild 4**. Die entstehenden Bahnformen der Werkstücke hängen vom gewählten Drehzahlverhältnis  $N_L$  der Antriebe ab, also dem Verhältnis zwischen der Drehzahl des Innenstiftkranzes  $n_i$  und der Schleifscheibendrehzahl  $n_s$ . Die Drehzahländerung des Innenstiftkranzes von  $n_i = -10$  1/min auf  $n_i = -100$  1/min hat keinen Einfluss auf die mittlere Schnittgeschwindigkeit  $v_{s,mittel}$ . Bei einer Schleifscheibendrehzahl von  $n_s = 200$  1/min beträgt die

mittlere Schnittgeschwindigkeit  $v_{s,mittel} = 4,16$  m/s. Eine Erhöhung der Schleifscheibendrehzahl auf  $n_s = 400$  1/min führt zu einer Verdopplung der mittleren Schnittgeschwindigkeit auf  $v_{s,mittel} = 8,33$  m/s, wodurch sich die Anzahl der Überläufe pro Zeit erhöht.

Bei einer Drehzahländerung des Innenstiftkranzes verändert sich jedoch das Drehzahlverhältnis  $N_L$  von  $N_L = 0,05$  auf  $N_L = 0,5$  beziehungsweise von  $N_L = 0,025$  auf  $N_L = 0,25$ . Dies führt zu weniger konzentrischen Werkstückbahnen, wie es in **Bild 4** zu erkennen ist. Die Analyse der entsprechenden mittleren Schnittgeschwindigkeiten  $v_{s,mittel}$  zeigt, dass bei einer Drehzahl des Innenstiftkranzes von  $n_i = -100$  1/min ein schneller Richtungswechsel der Schnittgeschwindigkeit auftritt, während bei  $n_i = -10$  1/min ein homogener Verlauf zu beobachten ist. Bei

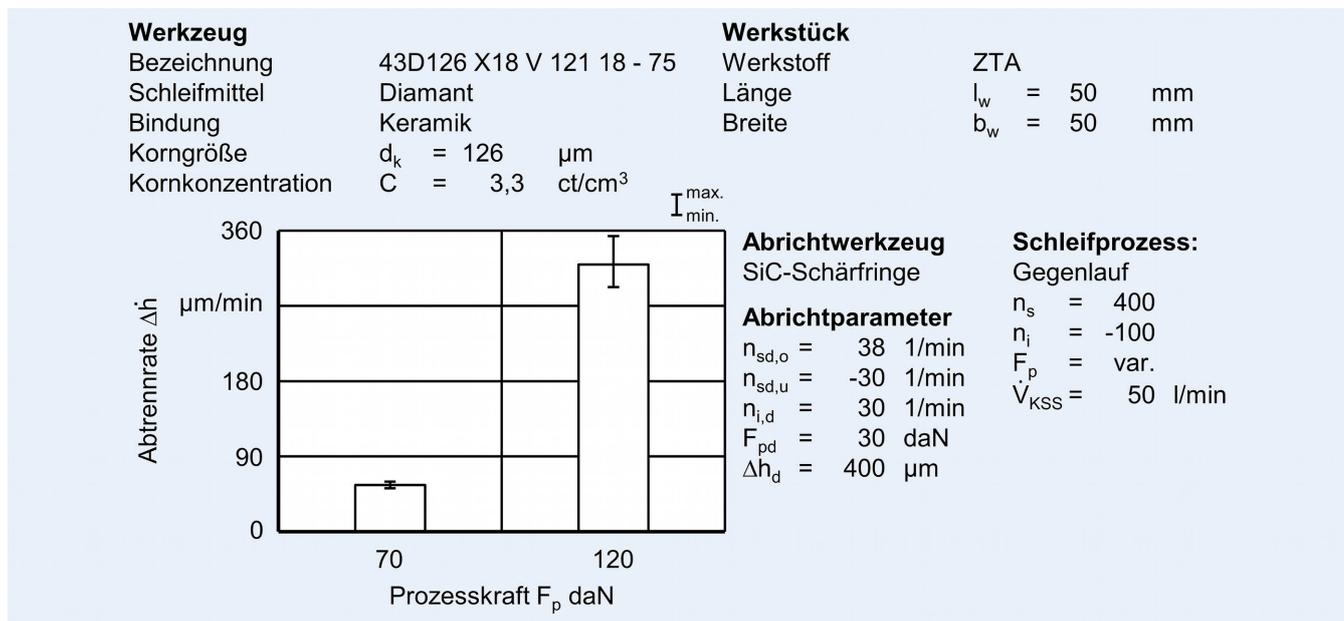


Bild 5. Einfluss der Prozesskraft  $F_p$  auf die mittlere Abtrennrate  $\Delta h$ .  
Grafik: IFW

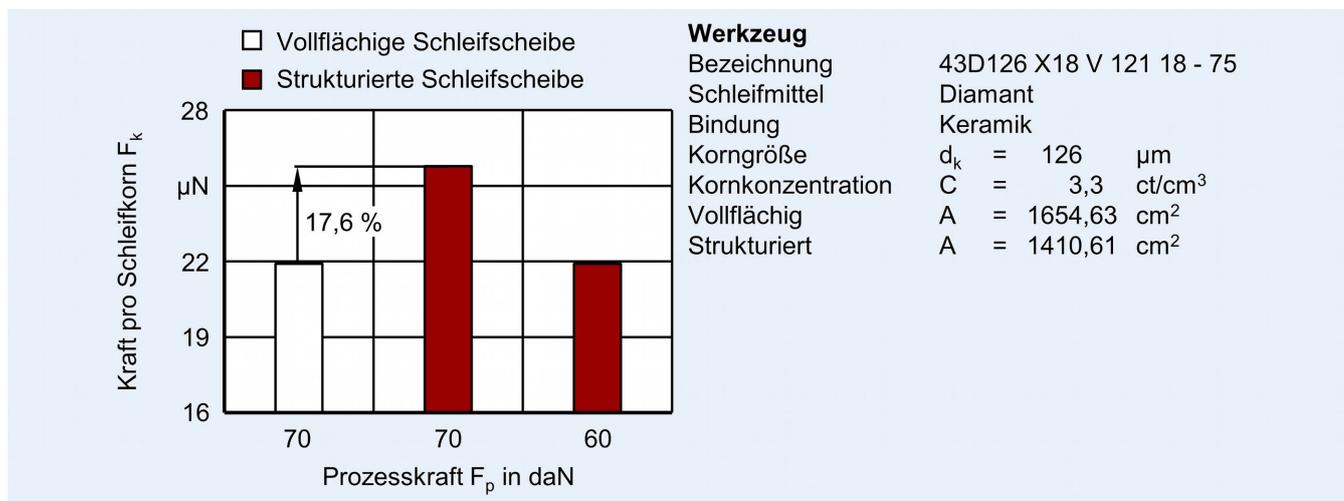


Bild 6. Einfluss der Schleifbelagsstrukturierung auf die lokale Kornbelastung. Grafik: IFW

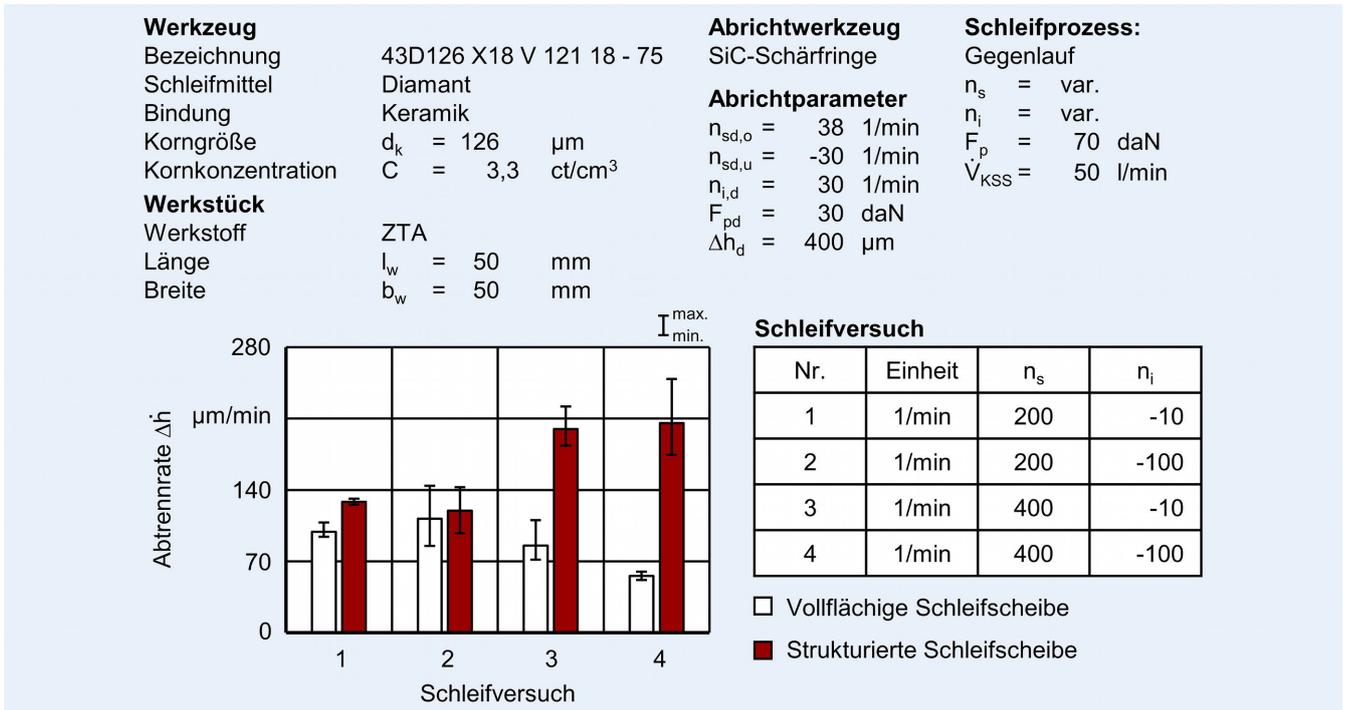
einer Schleifscheibendrehzahl von  $n = 200$  1/min führt dies erwartungsgemäß zu einer Zunahme der mittleren Abtrennrate  $\Delta h$  aufgrund der gesteigerten Überläufe.

Entgegen der Erwartung führt eine Steigerung der Schleifscheibendrehzahl  $n_s$  nicht zu einer Zunahme der Abtrennrate  $\Delta h$ . Im Gegenteil, die Abtrennrate verringert sich zusätzlich durch den schnellen Richtungswechsel. Der Grund dafür liegt im unzureichenden Druck, der für das tiefere Eindringen der Schleifkörner in das Werkstückmaterial benötigt wird. Dies wurde anhand von Druckerhöhung bei einer Schleifscheibendrehzahl von  $n_s = 400$  1/min und  $n_i = -100$ /min gegengeprüft, Bild 5. Bei einer Erhöhung der Prozesskraft von  $F_p = 70$  daN auf  $F_p = 120$  daN steigt die mittlere Abtrennrate deutlich an und beträgt  $\Delta h = 319,46$   $\mu\text{m}/\text{min}$ . Damit kann die Prozesszeit  $t_p$  deutlich verkürzt werden.

In den weiteren technologischen Untersuchungen wurde das Einsatzverhalten der strukturierten Schleifwerkzeuge beim

Doppelseitenplanschleifen der Keramikbauteile untersucht. Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse diskutiert und den Ergebnissen mit der vollflächigen Schleifscheibe gegenübergestellt.

Die Versuche wurden ebenfalls mit einer Werkzeugbelegung von  $B = 22,66$  % und einer Anpresskraft von  $F_p = 70$  daN durchgeführt. Durch die Einbringung der evolventenförmigen Nuten wird die Schleifbelagsfläche um 15 % reduziert. Dementsprechend liegen nun die gleichen Bauteile auf weniger Schleifbelag auf. Damit steigt bei konstanter Anpresskraft von  $F_p = 70$  daN der spezifische Druck pro Bauteil von  $p_s = 0,19$  daN/cm<sup>2</sup> auf  $p_s = 0,22$  daN/cm<sup>2</sup> an und dementsprechend auch die lokale Kornbelastung. Die Betrachtung der lokalen Kornbelastung zeigt, dass die Kraft pro Schleifkorn  $F_k$  um mehr als 17 % ansteigt, Bild 6. Um eine gleichbleibende lokale Kornbelastung zu erzielen, ließe sich die Prozesskraft von  $F_p = 70$  daN auf  $F_p = 60$  daN reduzieren, was einer Reduzierung um 14,3 % entspricht.



**Bild 7.** Einsatzverhalten strukturierter Schleifscheiben. Grafik: IFW

Im Realprozess erhöht sich die Schleifkraft sukzessive bei abstumpfenden Schleifwerkzeugen und vorgegebener Abtrennrates  $\Delta h$ , bis eine Maximalkraft erreicht wird und neu abgerichtet werden muss. Die Reduzierung der notwendigen Prozesskraft  $F_p$  bewirkt eine Verschiebung der Abrichtintervalle, wodurch sich die Prozessnebenzeiten verkürzen und der allgemeine Maschinennutzungsgrad steigt.

Bei konstanten Prozessparameter führt eine Erhöhung der lokalen Kornbelastung zu einer höheren Abtrennrates  $\Delta h$ . Dies konnte auch in den Versuchen mit der strukturierten Schleifscheibe gezeigt werden, **Bild 7**. Bei einer Schleifscheibendrehzahl von  $n_s = 200 \text{ 1/min}$  steigt die mittlere Abtrennrates  $\Delta h$  bei einer Drehzahl des Innenstiftkranzes von  $n_i = -10 \text{ 1/min}$  um 30 % an und um 7 % bei  $n_i = -100 \text{ 1/min}$ . Besonders vorteilhaft erweisen sich die strukturierten Schleifscheiben bei der höheren Schleifscheibendrehzahl von  $n_s = 400 \text{ 1/min}$ . Hier verdoppelt beziehungsweise verdreifacht sich die mittlere Abtrennrates  $\Delta h$  gegenüber der vollflächigen Schleifscheibe. Dies führt dazu, dass sich die Prozesszeit  $t_p$  halbiert beziehungsweise drittelt.

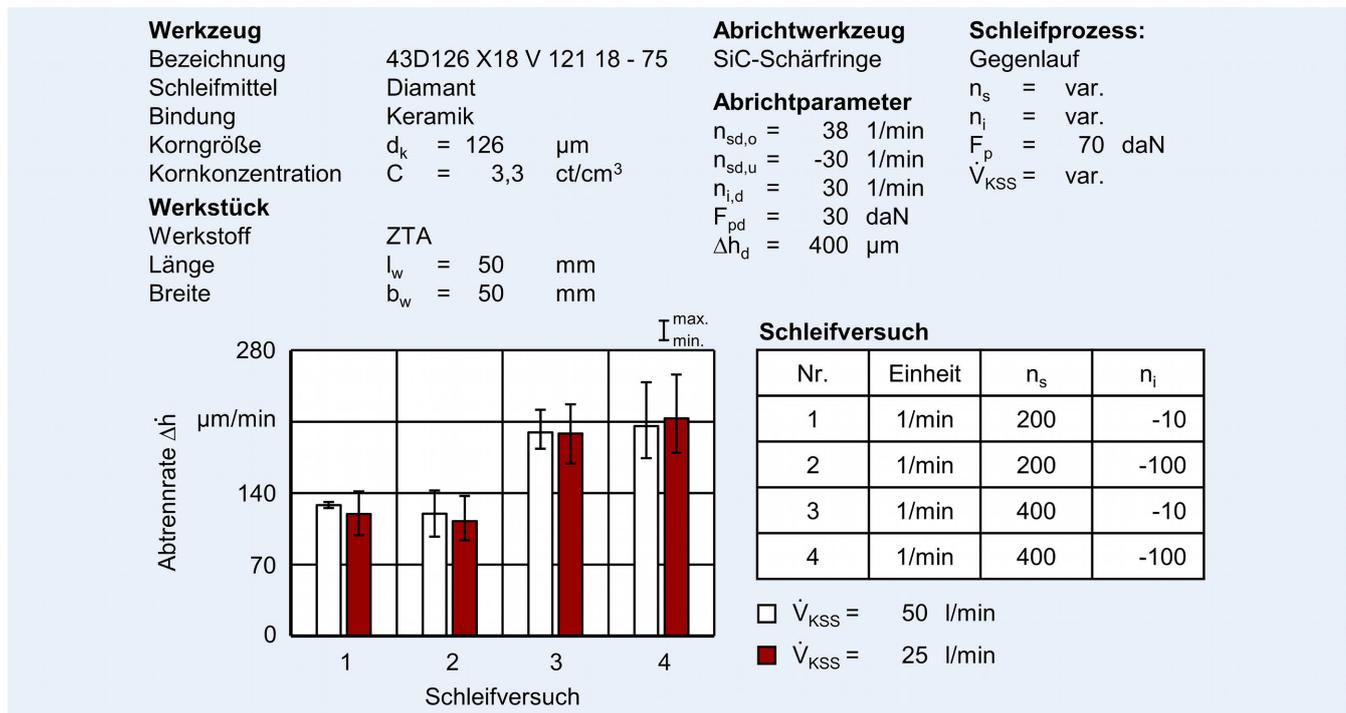
#### 4 Einfluss des KSS-Volumenstroms

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigten, dass eine gezielt ausgelegte Schleifbelagsstrukturierung zu einer höheren mittleren Abtrennrates  $\Delta h$  führt und damit den Schleifprozess positiv begünstigt. Um den Einfluss dieser Belagsstrukturierung auf die KSS-Zufuhr zu bewerten, wurden weitere Versuche mit reduziertem KSS-Volumenstrom  $V_{KSS}$  durchgeführt. Das betrachtete Maschinensystem fördert den KSS über zwei Axialpumpen zur Maschine. Eine Pumpe leitet den KSS durch Bohrungen im Schleifbelag, während die zweite Pumpe diesen über Nuten im Grundkörper in den Arbeitsraum befördert. Beide Pumpen können jeweils einen maximalen Volumenstrom von  $V_{KSS} = 50 \text{ l/min}$  fördern. Für die präzise Steuerung des Volumenstroms wurde ein

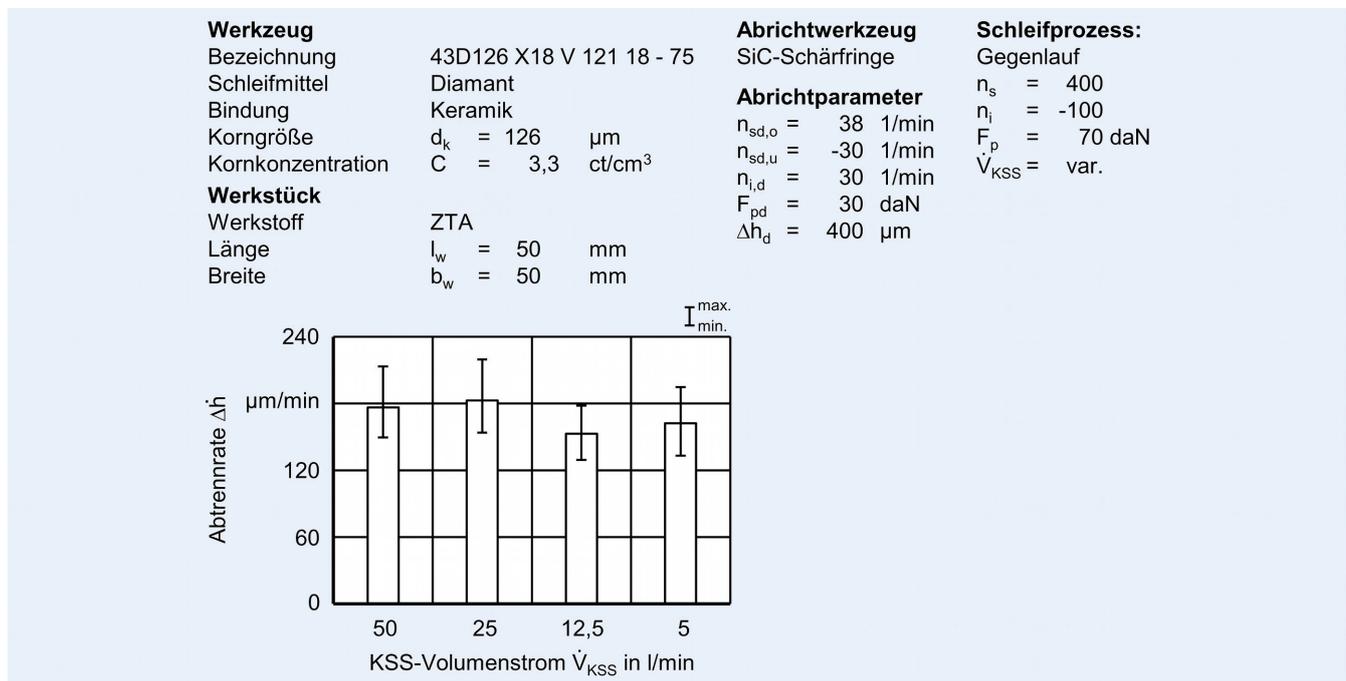
Regelsystem entwickelt und implementiert, das auf einem ansteuerbaren Ventil basiert. Die Umsetzung erfolgte zunächst nur an der Axialpumpe, die den KSS über die Bohrungen in den Arbeitsraum befördert.

**Bild 8** verdeutlicht die Ergebnisse der Schleifuntersuchungen bezüglich der mittleren Abtrennrates  $\Delta h$  bei verschiedenen KSS-Volumenströmen  $V_{KSS}$  und Prozessparameter. Wie bereits in den vorherigen Untersuchungen beobachtet, hat die Drehzahl des Innenstiftkranzes  $n_i$  auch bei reduziertem KSS-Volumenstrom  $V_{KSS}$  keinen signifikanten Einfluss auf die mittlere Abtrennrates  $\Delta h$ . Bei einer Schleifscheibendrehzahl von  $n_s = 200 \text{ 1/min}$  führt die Erhöhung der Drehzahl des Innenstiftkranzes von  $n_i = -10 \text{ 1/min}$  auf  $n_i = 100 \text{ 1/min}$  zu einer geringen Abnahme der mittleren Abtrennrates von  $\Delta h = 119,67 \mu\text{m/min}$  auf  $\Delta h = 112,71 \mu\text{m/min}$ , was einer Änderung von 6 % entspricht. Im Gegensatz dazu zeigt sich bei einer Schleifscheibendrehzahl von  $n_s = 400 \text{ 1/min}$  mit steigendem Drehzahlverhältnis  $N_L$  eine Zunahme der mittleren Abtrennrates von  $\Delta h = 198,47 \mu\text{m/min}$  auf  $\Delta h = 213,23 \mu\text{m/min}$ . Die Änderungen liegen hier unter 8 %.

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die Reduzierung des KSS-Volumenstroms von  $V_{KSS} = 50 \text{ l/min}$  auf  $V_{KSS} = 25 \text{ l/min}$  bei allen Parameterkombinationen nur einen geringfügigen Einfluss auf die mittlere Abtrennrates  $\Delta h$  hat. Bei einer Schleifscheibendrehzahl von  $n_s = 200 \text{ 1/min}$  führt die Verringerung des KSS-Volumenstroms sowohl bei einer Drehzahl des Innenstiftkranzes von  $n_i = -10 \text{ 1/min}$  als auch bei  $n_i = -100 \text{ 1/min}$  zu einer Reduzierung der mittleren Abtrennrates  $\Delta h$  um etwa 7 %. Die Erhöhung der Schleifscheibendrehzahl auf  $n_s = 400 \text{ 1/min}$  führt bei einer Drehzahl des Innenstiftkranzes von  $n_i = 10 \text{ 1/min}$  zu vergleichbaren Ergebnissen wie bei voll eingeschaltetem KSS-Volumenstrom  $V_{KSS}$ . In Kombination mit einer Drehzahl des Innenstiftkranzes von  $n_i = 100 \text{ 1/min}$  erhöht sich die mittlere Abtrennrates sogar um etwa 4 %. Daraus ergibt sich, dass die Schleifbelagsstrukturierung die KSS-Zufuhr in die Kontaktzone und damit verbunden



**Bild 8.** Einfluss des KSS-Volumenstroms  $\dot{V}_{KSS}$  auf die Abtrennrate  $\Delta h$  bei variierenden Prozessparametern. Grafik: IFW



**Bild 9.** Einfluss des KSS-Volumenstroms  $\dot{V}_{KSS}$  auf die Abtrennrate  $\Delta h$  bei der Verwendung von strukturierten Schleifscheiben. Grafik: IFW

auch die Spanabfuhr aus der Kontaktzone verbessert, sodass der notwendige KSS im Schleifprozess reduziert werden kann. Die Verringerung des KSS resultiert in einer besseren Ökobilanz und der Kostenreduktion durch Einsparung erforderlicher Betriebsstoffe.

Mit den durchgeführten technologischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine gezielte Auslegung der Schleifbelagsstrukturierung eine Reduzierung des notwendigen KSS-Volumenstroms  $\dot{V}_{KSS}$  ermöglicht, ohne die mittlere Abtrennrate  $\Delta h$

wesentlich zu beeinflussen. Zur detaillierteren Untersuchung des Einflusses des KSS-Volumenstroms  $\dot{V}_{KSS}$  wurden zusätzliche Versuche mit Volumenströmen von  $\dot{V}_{KSS} = 12,5 \text{ l/min}$   $\dot{V}_{KSS} = 5 \text{ l/min}$  durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Bild 9** dargestellt. Die Verringerung des KSS-Volumenstroms auf  $\dot{V}_{KSS} = 12,5 \text{ l/min}$  führt zu einer Reduzierung der mittleren Abtrennrate um 16 % im Vergleich zum Schleifprozess mit einem KSS-Volumenstrom von  $\dot{V}_{KSS} = 50 \text{ l/min}$ . Dabei nimmt die mittlere Abtrennrate von  $\Delta h = 205,70 \mu\text{m/min}$  auf  $\Delta h = 178,31 \mu\text{m/min}$  ab. Bei einer

weiteren Reduzierung des KSS-Volumenstroms auf  $\dot{V}_{\text{KSS}} = 5 \text{ l/min}$  verringert sich die mittlere Abtrennrates  $\Delta h$  lediglich um 8 % gegenüber dem voll eingeschalteten KSS-Volumenstrom  $\dot{V}_{\text{KSS}}$  und erreicht einen Wert von  $\Delta h = 189,35 \text{ } \mu\text{m/min}$ .

Eine Verringerung des KSS-Volumenstroms unter  $\dot{V}_{\text{KSS}} = 25 \text{ l/min}$  führt zu einer niedrigeren mittleren Abtrennrates  $\Delta h$  und damit zu einer längeren Prozesszeit  $t_p$ . Dennoch werden im Vergleich zur vollflächigen Schleifscheibe auch bei deutlich reduzierten KSS-Volumenströmen  $\dot{V}_{\text{KSS}}$  höhere mittlere Abtrennrates  $\Delta h$  erzielt.

## 5 Zusammenfassung

Bisher gab es hauptsächlich theoretische Erkenntnisse zur Strukturierung von Schleifscheiben, wohingegen eine gezielte Anpassung an das DPMP in diesem Forschungsprojekt erstmals umfassend untersucht wurde.

Zur Bewertung verschiedener Schleifbelagsstrukturen wurde zunächst ein Simulationsmodell auf Basis der CFD entwickelt. Daraus konnte abgeleitet werden, dass evolventenförmige Nuten eine gleichmäßigere KSS-Verteilung im Schleifspalt ermöglichen. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden Experimente auf einer „DLM 505 HS“ Doppelseitenplanschleifmaschine mit keramikgebundenen Diamantschleifscheiben zur Bearbeitung von Zirconiumoxid-verstärktem Aluminiumoxid (ZTA) mit strukturierten und nicht strukturierten Schleifscheiben durchgeführt.

Die Untersuchungen mit vollflächigen Schleifscheiben zeigten eine Abnahme der Abtrennrates bei höheren Schleifscheibendrehzahlen, da der Druck auf die Schleifkörner nicht ausreichend war. Erst eine Erhöhung der Prozesskraft führte zu einer deutlichen Steigerung der Abtrennrates. Bei strukturierten Schleifscheiben zeigte sich ein signifikant verbessertes Schleifverhalten. Durch die 15 % reduzierte Schleifbelagsfläche stieg der spezifische Druck pro Bauteil um 8 %. Die mittlere Abtrennrates erhöhte sich um 30 % bei niedrigen und bis zu 300 % bei hohen Schleifscheibendrehzahlen. Die Prozesszeit konnte halbiert bis gedrittelt werden.

Die Strukturierung erleichterte die KSS-Zufuhr und verbesserte die Spanabfuhr. Technologische Untersuchungen mit reduziertem KSS-Volumenstrom zeigten, dass auch mit weniger KSS eine hohe Abtrennrates erzielt wurde, was den Ressourcenverbrauch senkt.

Strukturierte Schleifscheiben verbessern das DPMP erheblich, indem sie die Abtrennrates steigern, die Prozesszeiten reduzieren und den KSS-Bedarf verringern. Dies führt zu höherer Produktivität, geringerer Umweltbelastung und verbessertem Einsatzverhalten beim Schleifen hochharter Keramiken.

## DANKSAGUNG

Die hier dargestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des Kooperationsprojektes der Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) „Entwicklung einer energieoptimierten Bearbeitung zum Ersatz des Läppens planparalleler, großflächiger hochharter Werkstücke“ mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technische Universität Berlin, mit der Krebs und Riedel Schleifscheibenfabrik GmbH & Co. KG, Bad Karlshafen, unterstützt mit Werkstoffen von der Firma QSIL Ceramics GmbH aus Auma-Weidatal, durchgeführt.

## LITERATUR

- [1] Uhlmann, E.; Hasper, G.; Hoghé, T.; Hübert, C.; Mihotovic, V.; Sammler, C.: Machining and Finishing of Ceramics. *Ceramics Science and Technology*, 2013, S. 247–266
- [2] List, M.: Ortsabhängiges Verschleißmodell für das Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik. Dissertation TU Berlin. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Hrsg.: Uhlmann, E. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2019
- [3] Uhlmann, E.; List, M.; Lichtschlag, L.: Stellgrößen beim Doppelseitenplanschleifen mit Planetenkinematik. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2016, 111 (7/8), S. 399–402
- [4] Ardel, T.: Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik. Dissertation TU Berlin. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Hrsg.: Uhlmann, E. Berlin: IPK, 2001
- [5] Janssen, J. M. (2006): Feinschleifen ersetzt Läppen. In: *WB Werkstatt + Betrieb* (9), S. 30–32
- [6] Uhlmann, E.; List, M.; Patraschkov, M.; Trachta, G.: A new process design for manufacturing sapphire wafers. In: *Precision Engineering* 53 (2018), S. 146–150
- [7] Rußner, C.: Präzisionsplanschleifen von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Keramik unter Produktionsbedingungen. Dissertation TU Dresden. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2006
- [8] Uhlmann E, Hoghé T (2012) Wear reduction at double face grinding with planetary kinematics. *Prod Eng* 6 (3): S. 237–242
- [9] Egger, R.: Planschleifen von Keramik mit zyklodischer Wirkbewegung. Dissertation IFW Hannover. Fortschrittberichte VDI. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001
- [10] Kirchgatter, M.: Einsatzverhalten genuteter CBN-Schleifscheiben mit keramischer Bindung beim Außenrund-Einsteichschleifen. Dissertation, TU Berlin, 2010
- [11] Uhlmann, E.; Hochschild, L.: Tool optimization for high speed grinding. *Production engineering*, 2013, 7. Jg., Nr. 2-3, S. 185–193



**Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann**

Foto: Fraunhofer IPK

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK)

**Arunan Muthulingam, M.Sc.**

Tel. +49 30 / 314-22903

arunan.muthulingam@ifw.tu-berlin.de

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing Eckart Uhlmann

Technische Universität Berlin  
Institut für Werkzeugmaschinen  
und Fabrikbetrieb (IFW)  
Pascalstr. 89, 10587 Berlin  
www.ifw.tu-berlin.de

**Dr.-Ing. Marijke van der Meer**

Tel. +49 5672 / 184-264

m.vandermeer@krebs-riedel.de

Krebs & Riedel Schleifscheibenfabrik GmbH  
Bremer Str. 44, 34385 Bad Karlshafen  
www.krebs-riedel.de

## LIZENZ



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

