

Herstellung positiver Freiwinkel auf einschichtig galvanisch belegten Diamantwerkzeugen

Maximilian WARHANEK¹, Josquin PFAFF², Christian WALTER³, Rico KREIS³,
Linus MEIER³, Konrad WEGENER³

¹ IWF, ETH Zürich, Switzerland, warhanek@iwf.mavt.ethz.ch

² IWF, ETH Zürich, Switzerland, pfaff@iwf.mavt.ethz.ch

³ IWF, ETH Zürich, inspire AG, Switzerland

Zusammenfassung:

Die Vorteile diverser Laserkonditionierprozesse wurden im vergangenen Jahrzehnt, insbesondere für superabrasive Schleif- und Abrichtwerkzeuge, ausführlich demonstriert. Das Aufkommen der Ultrakurzpulslasertechnologie ermöglicht das Lasertouchieren von einschichtig galvanisch belegten Diamantwerkzeugen ohne signifikante thermische Schädigung des Abrasivkorns. Die beträchtlichen mechanischen Belastungen der Körner bei konventionellen Konditionierverfahren werden beim Lasertouchieren vermieden. Des Weiteren wird wegen der absoluten Verschleissfreiheit von Laserprozessen beim Lasertouchieren höchste Präzision und Prozesssicherheit erreicht.

In diesem Artikel wird ein Lasertouchierprozess für einschichtig belegte Diamantwerkzeuge vorgestellt, welcher die Herstellung von positiven Freiwinkeln an den Schneidkanten der meisten Abrasivkörner ermöglicht. Der Prozess wird mit einem Ultrakurzpulslaser mit 10 ps Pulsdauer und 10 W Durchschnittsleistung implementiert. Zur Validierung des Prozesses werden umfangreiche 3D-Messungen des Abrasivbelags durchgeführt und ein Algorithmus zur Evaluierung der Freiwinkel entwickelt. Die Vorteile positiver Freiwinkel werden mittels generischen Abrichtversuchen auf keramisch gebundenem Korundschleifscheibenmaterial untersucht.

Die topographischen Analysen des Abrasivbelags zeigen, dass ein durchschnittlicher Freiwinkel von 2.4° an den Abrasivkörnern erzielt wird. Vergleichende Kraftmessungen während der Abrichtversuche ergeben eine Prozesskraftreduktion von 70% durch den Lasertouchierprozess gegenüber konventionell mechanisch touchierten Werkzeugen.

Schlüsselwörter: Abrichten, Laser, Freiwinkel, Prozesskräfte

1. Einleitung

Abrichten ist ein kritischer Teil der Schleifprozesskette. Sowohl die Effizienz als auch die Ergebnisqualität von Schleifprozessen wird erheblich durch die Konditionierung des Werkzeugs beeinflusst [1]. Dabei stellt insbesondere der zunehmende Einsatz von superabrasiven Schleif- und Abrichtwerkzeugen aus Diamant und CBN (kubisches Bornitrid) eine Herausforderung für die Werkzeugkonditionierung dar. Aus diesem Grund werden vermehrt neue Methoden auf Basis von Elektroerosions- und Laserverfahren entwickelt und eingesetzt. In den vergangenen Jahren wurden im Bereich der Forschung und Entwicklung diverse Laserprozesse in allen Bereichen des Abrichtens – Profilieren, Schärfen und Strukturieren – vorgestellt und vielversprechende Ergebnisse erzielt [1]. Grosse Fortschritte im Bereich der Industrietauglichkeit und Wirtschaftlichkeit von geeigneten Laserquellen haben zu ersten Schritten der industriellen Umsetzung dieser Prozesse geführt.

Diese Arbeit behandelt ein Lasertouchierverfahren welches neben der Herstellung der Makrogeometrie des Werkzeugs auch die Geometrie der Mikroschneidkanten am Abrasivkorn beeinflusst. In [2] werden die Vorteile dieses Vorgehens aufgezeigt. Obwohl die Form, Grösse, Orientierung und Position der Körner stochastisch sind, gelingt die Herstellung eines positiven Freiwinkels auf

einem Grossteil der im Abrichtprozess aktiven Körner. Dieser Lasertouchierprozess wird an galvanisch einschichtig belegten Diamantabrichtstiften demonstriert. Der Einfluss diverser Parameter wird für eine Optimierung des Abrichtprozesses untersucht. Für den Nachweis der Freiwinkelbearbeitung wird ein Messverfahren zur Ermittlung der Freiwinkel auf stochastischen Abrasivbelägen vorgestellt. Schliesslich wird der Einfluss von Freiwinkeln auf Diamantabrichtscheiben beim Konditionieren von Korundschleifwerkzeugen untersucht und unterschiedliche Einflussgrössen beleuchtet.

2. Stand der Technik

Konventionelle Abrichtmethoden, sowie auch neue laser- und EDM-basierte Verfahren, weisen nur stark limitierte Möglichkeiten zur Definition der Geometrie des Belags an Abrasivwerkzeugen auf Ebene der Körner auf. Sowohl die stochastische Topographie des Belags als auch die kleinen Dimensionen der Körner erschweren die gezielte Bearbeitung einzelner Schneidkanten. Mehrere Ansätze werden verfolgt, um den Grad der Topographiedefinition zu erhöhen. Neben der Sortierung von Körnern nach Grösse und Form, wird auch deren Anordnung durch Positionierung und Strukturierung kontrolliert. Ersteres wurde durch Pinto et al. [3] eingehend mittels Simulation und Experiment von Werk-

zeugen mit unterschiedlich definiert angeordneten Körnern untersucht. Vorteile dieser *Engineered Grinding Tools* werden insbesondere auf Verbesserung der Spanevakuierung und Kühlung zurückgeführt. Walter et al. [4] untersuchen strukturierte CBN-Schleifwerkzeuge mit unterschiedlichen laserbearbeiteten Mustern in der Grössenordnung des Korndurchmessers. Diese Methode überlagert eine definierte Geometrie mit der stochastischen Topographie des Schleifbelags. Zu einem gewissen Grad wird durch diesen Prozess die Position und Form der Mikroschneidkanten am Abrasivkorn definiert. Ähnliche Strukturen werden von Dold [5] mittels Ultrakurzpulslaser auf einschichtig galvanisch belegten Diamantabtrichträgern aufgebracht. Dabei wurde durch Wahl entsprechender Prozessstrategien sowohl Span-, als auch Freiwinkel gezielt eingestellt. In beiden Fällen wird jedoch ein signifikanter Anteil des Abrasivbelags entfernt um die Strukturierung herzustellen. Auch die Lage der verbleibenden Körner relativ zu einzelnen Strukturelementen ist stochastisch, weshalb nur ein geringer Anteil der ursprünglich aufgebrachten Körner nach erfolgter Strukturierung aktiv am Schleif- bzw. Abrichtprozess beteiligt ist. Vorteile von strukturierten Schleif- und Abrichtwerkzeugen werden wie bei Engineered Grinding Tools auf Verbesserung von Span- und Kühlschmiermittelfluss zurückgeführt. Ausserdem werden Prozesskräfte aufgrund der Reduktion der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück erheblich gesenkt.

Diverse Arbeiten der vergangenen Jahre zeigen ein erhebliches Potenzial zur Optimierung der Schnittprozesse mit Abrasivbelägen durch definierte Geometrien der Mikroschneidkanten an den Abrasivkörnern. Transchel et al. [6] zeigen den Einfluss des Freiwinkels auf die Prozesskräfte beim Schleifen von 100Cr6 Stahl anhand von Schnittversuchen mit einzelnen Diamantkörnern und numerischer Simulation. Ein signifikanter Anstieg der Kräfte wird bei Unterschreitung des Wirkfreiwinkels, dem Winkel bei dem die Freifläche aufgrund der Prozesskinematik die von der Schneidkante erzeugte Fläche berührt, festgestellt. Diese Schnittkraft-erhöhung wird mit dem Pflügen der Freifläche durch das Material bei negativem Freiwinkel erklärt. Mehrere Studien nutzen diesen Effekt bei der Anwendung von geometrisch definierten Abrasivbelägen. Butler-Smith et al. [7] erzeugten ebene Schleifwerkzeuge aus CVD-Diamant durch Laserstrukturierung der Oberfläche. Diese Methode ermöglicht einen hohen Grad an Definition der Mikroschneidkanten. Die erreichte Reduktion der Prozesskräfte beim Schleifen von Ti-6Al-4V wird neben den positiven Freiwinkeln auch auf positive Spanwinkel und Vorteile beim Spanfluss zurückgeführt. Das Konzept wird von Butler-Smith et al. [8] in weiterer Folge auch auf einem Rotationswerkzeug aus CVD-Diamant angewendet. Der direkte Vergleich mit konventionellen galvanisch belegten Schleifstiften zeigt erhebliche Vorteile hinsichtlich Oberflächenqualität am Werkstück und Standzeit des Schleifstifts mit definierter Geometrie.

Konditionierungsversuche mittels Hochleistungslaser, wie in dieser Arbeit angewendet, werden erstmals von Westkämper [9] durchgeführt. Spätere Entwicklungen konzentrieren sich auf die selektive Ablation des Bindemittels zur Schärfung der Schleifwerkzeuge [10]. Die Entwicklung neuer Kurz- und Ultrakurzpulslasersysteme mit hoher Leistung und Strahlqualität eröffnet Möglichkeiten für weitere innovative laserbasierte Konditionierungsprozesse, wie das Laserprofilieren von CBN-Werkzeugen [11]. Entscheidend für diese Anwendungen ist die kurze Interaktionszeit des Lasers mit dem temperaturempfindlichen Kornmaterial (Diamant, CBN), welche das Auftreten von signifikanten thermischen Schädigungen vermeidet. Die allgemeine Freiheit von Prozesskräften und Verschleiss bei der Anwendung des Lasers machen diesen zu einem idealen Werkzeug zur hochpräzisen Konditionierung von superabrasiven Werkzeugen. Die Machbarkeit des in dieser Arbeit weiterentwickelten Lasertouchierens von Diamantwerkzeugen wurde von Dold et al. [12] demonstriert. Dabei wurde mittels Raman-Spektroskopie gezeigt, dass bei Anwendung eines Ultrakurzpulslasers mit 10 ps Pulsdauer keine thermische Schädigung bzw. Graphitbildung an den bearbeiteten Diamantkörnern auftritt.

3. Aufbau und Versuchsdurchführung

3.1 Experimenteller Aufbau

Der Lasertouchierprozess wird an einem offenen Laborsystem, wie in Abbildung 1 dargestellt, durchgeführt. Der experimentelle Aufbau besteht aus einem Lasersystem mit MOPA (master oscillator power amplifier) Architektur. Dieser emittiert Laserpulse mit einer Pulslänge $\tau_p < 12$ ps und einer Pulsfrequenz von 50 kHz bis 8.2 MHz. Die Wellenlänge der Laserlichts beträgt 1064 nm. Das Lasersystem erreicht eine maximale Durchschnittleistung von 10 W und verfügt ausserdem über flexible Burstmodeeinstellungen. Diese ermöglichen jeden Puls in maximal acht Burstpulse mit 12.2 ns zeitlichem Abstand aufzuteilen. Für diese Studie werden Kombinationen aus zwei und drei Burstpulsen mit jeweils gleichen Anteilen der Pulsenergie angewendet. Die Burstpulse werden entsprechend ihrer Position in der Burstreihe bezeichnet, (z.B. Burstmode 1,4,7 beschreibt eine Teilung des Laserpulses in drei Burstpulse. Das Zeitintervall zwischen Position 1 und Position 4 bzw. 4 und 7 beträgt $3 \cdot 12.2 = 36.6$ ns.). Der Strahl wird über mehrere Spiegel durch Verzögerungsplatten zur Einstellung des Polarisationszustands und ein variables Teleskop zur Einstellung des Strahldurchmessers gelenkt. Schliesslich wird der Strahl in ein zweidimensionales Scansystem mit linearen Achsen in U- und V-Richtung parallel zu X und Y gelenkt und durch ein F-Theta Objektiv mit Brennweite 163 mm fokussiert. Der Fokussdurchmesser beträgt 35 μm . Das Scansystem ist auf einer Linearachse parallel zur optischen Achse des Strahls (Z-Richtung) montiert, um den Laserfokus auf dem Werkstück zu positionieren. Ein X-Y-Tisch und eine A-Rotationsachse dienen der Positionierung des Werkstücks relativ zur optischen Achse. Eine gemeinsame

CNC-Steuerung ermöglicht die synchrone Steuerung der vier mechanischen und zwei optischen Achsen.

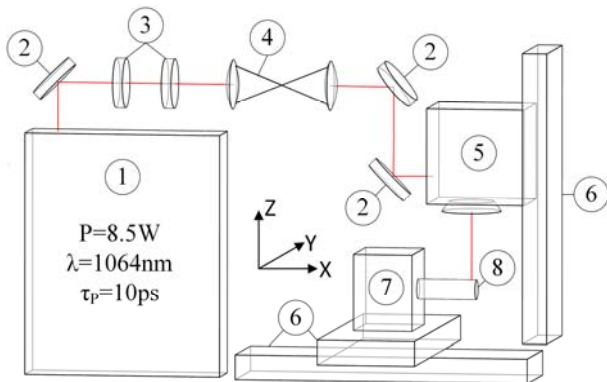


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau: (1) Laser, (2) Umlenkspiegel, (3) Verzögerungsplatten, (4) Teleskop, (5) Scankopf mit F-Theta Objektiv, (6) Linearachsen, (7) Rotationsachse, (8) Werkstück.

3.2 Versuchsdurchführung - Parameterstudie

Im Vorfeld zur Entwicklung des Lasertouchierprozesses wird eine umfangreiche Parameterstudie zur Ablation von Diamant durchgeführt, um die Einflüsse diverser Prozessparameter zu untersuchen. Da Diamantwerkzeuge mit einer Korngrösse von D426 (FEPA Standard) touchiert werden sollen und von einem Laserfokussdurchmesser kleiner $50\ \mu\text{m}$ ausgegangen wird, werden die Körner vom einfallenden Laserstrahl geschnitten. Folglich werden zu entfernende, hervorragende Diamantspitzen nicht vollständig ablatiert, was zu einer Zeitersparnis führen kann. Aus diesem Grund wird die Parameterstudie zur Untersuchung der Schnittgeschwindigkeit auf ebenen polykristallinen Diamantproben (Element Six, CTB 10) ausgelegt. Lineare Schnittfugen werden mit variierenden Pulsenergien, Pulsüberlappungen, Polarisierungen, Burst-Modes, Fokussdurchmessern und Scanstrategien erzeugt und nach unterschiedlichen Prozesszeiten vermessen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die in dieser Studie angewendeten Laserparameter. Die Variation der Scanstrategien besteht aus Versuchen mit ein bis drei parallelen Linien mit unterschiedlichen Abständen, um die Breite der erzeugten Schnittfuge zu beeinflussen. Bei allen Versuchen werden die Proben orthogonal zur optischen Achse des Strahls ausgerichtet.

Da Vorversuche zeigen, dass der Schnittprozess mittels Ultrakurzpulslaser in dieser Konfiguration skalierbar ist, i.e. bei Erhöhung der Laserleistung der Scangeschwindigkeit und der Pulsfrequenz um denselben Faktor sind gleiche Ergebnisse zu erwarten, wird die Laserleistung bei allen Versuchen konstant bei $8.5\ \text{W}$ belassen.

Wellenlänge	1064	nm
Pulsdauer	<12	ps
Leistung	8.5	W
Pulsenergie	17-170	μJ

Strahlqualität	<1.3
Polarisation	h, v, z
Fokussdurchmesser	25-55 μm

Tabelle 1: Untersuchte Laserparameter (Polarisationszustände: h – horizontal, v – vertikal, z – zirkular).

Um die Schnittgeschwindigkeiten in mehreren Stadien der Schnittfugenentstehung zu analysieren, werden diese nach 0.08 , 0.8 und $1.6\ \text{s/mm}$ Bearbeitungszeit an einem Alicona Infinite Focus 3D-Mikroskop vermessen. Diese 3D-Messungen, welche in Abbildung 2 dargestellt sind, werden anschliessend nach folgenden Schritten analysiert:

1. Eine Ausgleichsebene wird mit der Methode der kleinsten Quadrate an den unbearbeiteten Bereichen der Probe ermittelt, um eine Referenz für die nachfolgenden Schritte zu definieren.
2. Die linearen Schnittfugen, welche eine Länge von etwa $4\ \text{mm}$ aufweisen, werden in fünf gleiche Abschnitte entlang der Schnittrichtung geteilt. Alle nachfolgenden Schritte werden an jedem der fünf Abschnitte durchgeführt und gemittelt, um Einflüsse von Messfehlern und Verunreinigungen der Proben zu reduzieren. Jeder Abschnitt weist etwa 245 Datenpunkte in der Richtung parallel zur Schnittfuge auf.
3. Durch Mittelung der Datenpunkte in jedem Abschnitt werden zweidimensionale Querschnittsprofile erzeugt. Eine Referenzgerade wird durch einen entsprechenden Schnitt mit der Referenzebene definiert.
4. Die Tiefe der Schnittfuge wird durch den maximalen Abstand zwischen der Referenzgerade und dem Profil definiert.
5. Die Breite der Schnittfuge wird durch den Abstand der Schnittpunkte zwischen dem Profil und einer Parallelen der Referenzgerade $2\ \mu\text{m}$ unter dieser definiert um den Einfluss der Kantenverrundung zu vermeiden.
6. Die Querschnittsfläche der Schnittfuge wird durch die Fläche zwischen der Referenzgeraden und dem Profil definiert.

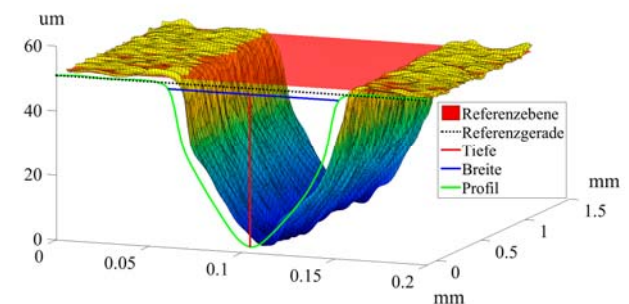


Abbildung 2: Schnittfugenvermessung.

3.3 Versuchsdurchführung - Lasertouchieren

Die Versuche zum Lasertouchieren werden an Abbrichtstiften mit $12\ \text{mm}$ Durchmesser durchgeführt. Diese sind galvanisch, einschichtig mit synthetischem D426 (FEPA Standard) Diamantkorn (Element Six, SDB 1125) belegt. Wie in Abbildung 3 dargestellt, wird der Laser-

touchierprozess durch eine lineare Scanbewegung des Lasers parallel zur Werkzeugachse realisiert, sodass die optische Achse tangential zur Mantelfläche des zylindrischen Werkzeugs ausgerichtet ist. Das Werkzeug wird während des Prozesses mit konstanter Geschwindigkeit entgegen der Richtung des Laserstrahls gedreht. Die Prozessparameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Der Scanner bewegt den Laserfokus entlang zwei paralleler Linien mit 20 µm Abstand an der Oberfläche der zu schneidenden Diamantkörner.

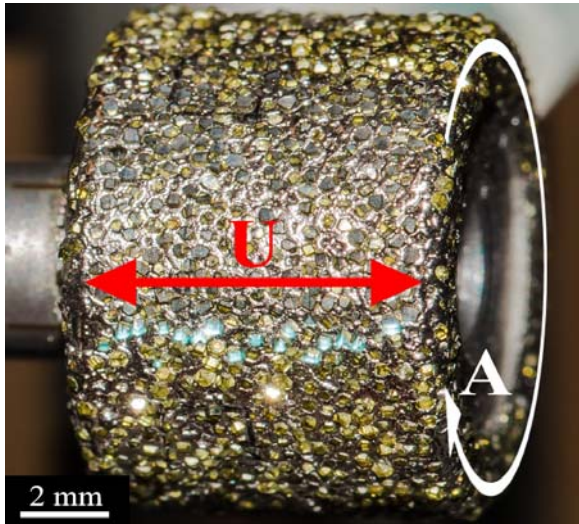


Abbildung 3: Kinematik des Lasertouchierens; U: Optische Achse, A: Mechanische Rotationsachse.

Leistung	10	W
Pulsenergie	100	µJ
Burst Mode	1,5	
Polarisation	z	
Fokusbereich	35	µm
Pulsüberlappung	80	%
Zustellung	41.7	µrad
	± 250	nm

Tabelle 2: Lasertouchierparameter.

Wie zuvor erwähnt, werden die Abrasivkörner bei diesem Prozess nicht abgetragen sondern geschnitten. Dabei entsteht, wie bei den Versuchen zur Parameterstudie, eine V-förmige Schnittfuge mit einem Öffnungswinkel von etwa 18° bevor die Diamantkörner durchgeschnitten werden. Somit weist jedes Korn im Moment des Durchschneitens eine Schneidkante mit etwa 9° Freiwinkel an der dem Strahl abgewandten Seite auf. Bei der weiteren Rotation wird die hervorstehende Schneidkante des Kornes in den fokussierten Laserstrahl bewegt. Dadurch wird weiteres Material abgetragen und der Freiwinkel wird reduziert. Aufgrund des flachen Einfallswinkels des Lasers auf der gerade erzeugten Freifläche wird der Fokus auf eine grössere Fläche verteilt und ein höherer Anteil der Laserleistung reflektiert. Infolgedessen sinkt die absorbierte Energie an einem gewissen Punkt unter die Ablationsschwelle. Wie Wien

in Abbildung 4 dargestellt, bleibt der zu diesem Zeitpunkt verbleibende Freiwinkel erhalten.

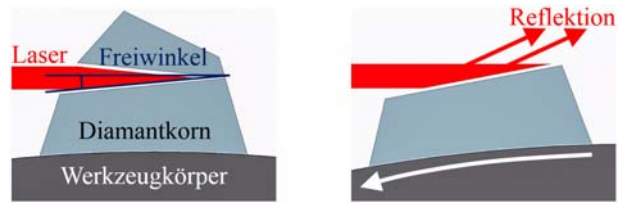


Abbildung 4: Entstehung des Freiwinkels beim Lasertouchieren.

3.4 Freiwinkelvermessung

Zur Vermessung der beim Lasertouchieren erzeugten Freiwinkel an den Diamantkörnern des Abrasivbelags wird eine Real3D Aufnahme des Werkstücks an einem Alicona Infinite Focus erstellt. Dabei wird eine dreidimensionale Abbildung eines ringförmigen Streifens mit 1.4 mm Breite um den Umfang des Werkzeugs erzeugt. Folgende Schritte zur automatischen Ermittlung der Freiwinkel an allen aktiven Körnern auf dem vermessenen Teil des Abrasivbelags werden vorgenommen:

1. Ein Zylinder wird mittels der Methode der kleinsten Quadrate an die 3D-Messdaten angenähert, um die Rotationsachse des Werkzeugs zu ermitteln. Etwaige Umspannabweichungen (Radialschlag, Taumelfehler) bei der Messung werden dadurch in den weiteren Schritten berücksichtigt.
2. Die 3D-Messdaten werden mittels Koordinatentransformation um die in 1. ermittelte Rotationsachse abgerollt. So können die weiteren Schritte und Analysen an ebenen Daten, wie in Abbildung 5 dargestellt, durchgeführt werden.

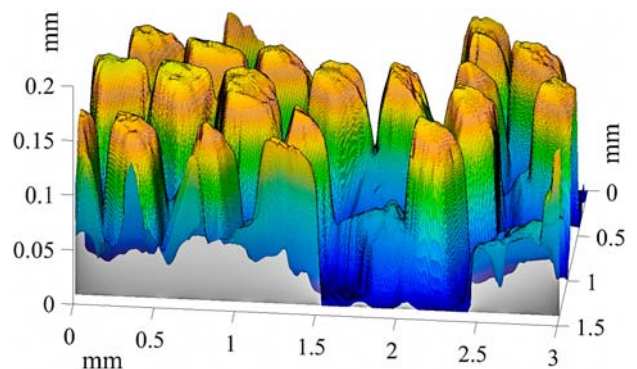


Abbildung 5: Abschnitt der abgerollten Messdaten.

3. Der Delaunay Triangulationsalgorithmus (Matlab®) wird angewendet, um die ungeordneten Messpunkte in eine kartesische Matrix zu konvertieren, um nachfolgende Schritte zu erleichtern.
4. Bereiche mit offensichtlichen Messfehlstellen (in der Randzone mit Ausreißern grösser 200% der Korngrösse) werden entfernt. Keine weitere Filterung der Daten wird durchgeführt.

5. Die Position, der sich während des mechanischen Abrichtprozesses im Eingriff befindlichen Körner, wird mit einem Höhenlimit ermittelt. Körner, deren Querschnitt auf Höhe des Limits kleiner als ein gewisser Grenzwert ist, werden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Dieser Grenzwert wird gewählt, sodass die maximale Anzahl Körner separat betrachtet werden.

6. An jedem detektierten Korn wird ein iterativer Algorithmus angewendet, um die Freifläche zu erkennen. Abbildung 6 stellt die Schritte dieser Annäherung an einer Testgeometrie dar. Als Startzone wird ein quadratischer Bereich mit 40 µm Seitenlänge um den höchsten Punkt des Kornes definiert. Anschliessend wird abwechselnd eine Ebene mit der Methode der kleinsten Quadrate in den Bereich eingepasst und der Bereich aktualisiert. Die Anpassung erfolgt jeweils soweit die Messdaten eine gewisse Distanz zu der Ebene nicht überschreiten. Das Verfahren wird abgeschlossen, wenn nach dem Einpassen der Ebene in einen erweiterten Bereich keine erneute Erweiterung möglich ist und dieser damit die gesamte Freifläche umfasst.

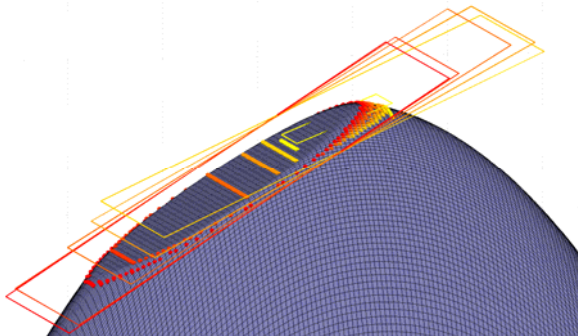


Abbildung 6: Iterative Freiflächenerkennung an der Testgeometrie (Quadrat: gefittete Ebene; Punkte: Grenze der Freifläche; Farbverlauf: Startwert gelb, Ergebnis rot).

7. Der Freiwinkel wird als der Winkel zwischen der Freifläche und der Tangente an den Zylinder in einer Ebene orthogonal zur Werkzeugachse definiert.

Mindestens 110 aktive Körner werden an jedem Werkzeugvermessen. Die Messungen werden in regelmässigen Intervallen über die Standzeit der Werkzeuge während der in 3.5 beschriebenen Abrichtversuche wiederholt.

3.5 Versuchsdurchführung - Abrichtversuche

Um die Auswirkungen des Lasertouchierprozesses auf die Anwendung der Werkzeuge zu untersuchen, werden Abrichtversuche auf Schleifkörpern aus keramisch gebundenem Korundkorn (A80G8V0057) durchgeführt. Die Proben werden aus industriell angewendeten Schleifscheiben der Reishauer AG gefertigt. Der in Abbildung 7 dargestellte Versuchsaufbau für diese Studie basiert auf der Arbeit von Walter et al. [11]. Die Werkzeuge werden an einem mit einer Fischer MFM-10120/11 Hochgeschwindigkeitsspindel ausgestatteten 5-achsigen Micron HSM 400U Bearbeitungszentrum getestet. Die Proben werden auf einer Kistler

Minidyn Typ 9256C1 Kraftmessplattform montiert um die Prozesskräfte zu messen. Das Schleiföl Blasgrind HC5 wird durch eine eigens für die angewendete Werkzeuggeometrie gefertigte Düse als Kühlschmiermittel (KSM) eingesetzt.

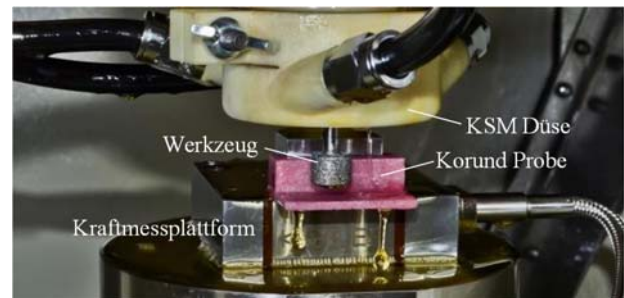


Abbildung 7: Versuchsaufbau für Abrichtversuche mit touchierten Diamantwerkzeugen.

Die Abrichtversuche werden mit vier lasertouchierten Werkzeugen durchgeführt. Zwei weitere konventionell mechanisch touchierte Werkzeuge werden getestet, um eine Vergleichsbasis zu schaffen. Nach einer Einlaufphase mit 3'000 mm³/mm spezifischem Spanvolumen wird eine Variation der Prozessparameter vorgenommen, um Kraftmessungen bei unterschiedlichen Vorschüben, Zustellungen und Zeitspanvolumina zu messen. Anschliessend wird das Langzeitverhalten der Werkzeuge über die Standzeit mit 70'000 mm³/mm spezifischem Spanvolumen untersucht. Die angewendeten Prozessparameter sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Parameter	Variation	Langzeit
Schnittgeschw. [m/s]	50	50
Vorschub [mm/min]	1500, 3000, 9000	3000
Zustellung a _e [mm]	0.5, 1, 3	1
Zustellung a _p [mm]	5	5

Tabelle 3: Parameter für Abrichtversuche.

Um den Einfluss der erzeugten Freiwinkel zu zeigen, werden die Versuche in beide Rotationsrichtungen durchgeführt, sodass positive und negative Freiwinkel nach der in 3.4 genannten Definition untersucht werden. Die angewendete Definition des Freiwinkels ist bei den angewendeten Prozessparametern im Fall von negativen Freiwinkeln nicht korrekt. Da die Spandicke kleiner als die Höhendifferenz auf der Freifläche ist, kommt dieselbe Schneidkante bei beiden Rotationsrichtungen in Eingriff. Demzufolge wird die Freifläche bei entgegengesetzter Rotationsrichtung zu einer Spanfläche mit grossem negativem Spanwinkel.

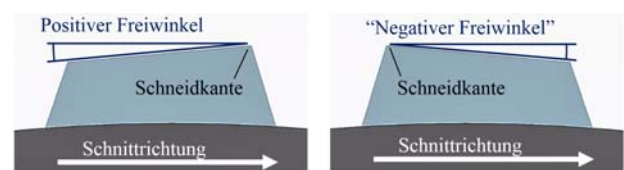


Abbildung 8: Positiver und "negativer" Freiwinkel.

Um auszuschliessen, dass die Ergebnisse durch andere Einflüsse beim Ändern der Rotationsrichtung verfälscht werden, sind zwei der lasertouchierten Werkzeuge im Uhrzeigersinn und zwei entgegen dem Uhrzeigersinn abgerichtet, sodass positive und "negative" Freiwinkel bei beiden Rotationsrichtungen auftreten.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Schnittgeschwindigkeit und Schnitttiefe

Die Ergebnisse der Parameterstudie zum Lasertouchieren beziehen sich in erster Linie auf die Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit von der Schnitttiefe. Da die Schnittrichtung beim Lasertouchieren tangential zur zylindrischen Werkzugenoberfläche gerichtet ist, bezieht sich die Schnittgeschwindigkeit in dieser Studie auf die Zunahme der Schnitttiefe über der Zeit. Abbildung 9 zeigt die Schnitttiefe nach 0.08, 0.8 und 1.6 s/mm Bearbeitungszeit bei unterschiedlichen Pulsenergien. Nach kurzer Bearbeitungszeit und Schnitttiefen unter 25 μm wird die höchste Schnittgeschwindigkeit mit einer geringen Pulsenergie von 17 μJ erreicht. Mit steigender Schnitttiefe sinkt die Schnittgeschwindigkeit jedoch ab und der Abtrag kommt bei einer gewissen Tiefe, in diesem Fall 50 μm , zum Stillstand. Diese maximale Schnitttiefe ist material-, laserparameter- und prozessabhängig. Eine Erhöhung der Pulsenergie führt zu einer Vergrößerung der maximalen Schnitttiefe. Da jedoch die Schnittgeschwindigkeit bei hoher Pulsenergie abnimmt, kann für jeden Schnittprozess ein optimaler Wert gefunden werden. Wird dieser Wert unterschritten und die maximale Schnitttiefe erreicht, wird ein grosser Anteil der Laserleistung in der Schnittfuge in Wärme umgewandelt und schädigt damit das Material. Ursache für die maximale Schnitttiefe sind die sich ändernden Einfallswinkel für die Laserstrahlung während der Ausbildung der Schnittfuge. Diese weist, wie in 3.3 erwähnt, eine V-Form auf. Der Laserfokus wird an den steilen Flanken projiziert. Die Pulsenergie wird damit auf eine grössere Fläche verteilt. Damit sinkt die absorbierte Fluenz an der Oberfläche bei einem gewissen Flankenwinkel und gegebener Pulsenergie unter die Ablationsschwelle und der Materialabtrag ist beendet.

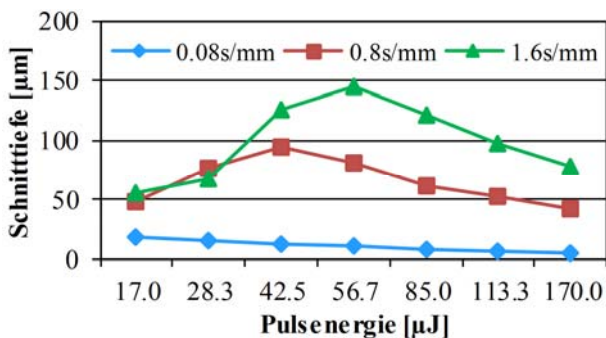


Abbildung 9: Schnitttiefe nach 0.08, 0.8 und 1.6 s/mm Bearbeitungszeit bei unterschiedlichen Pulsenergien und 8.5 W Durchschnittleistung.

Da die eingebrachte Energie jedoch aufgrund von Mehrfachreflektionen in der Schnittfuge jedoch zu einem hohen Anteil absorbiert wird, führt die Bearbeitung im Bereich der maximalen Schnitttiefe zu einer Wärmeakkumulation im Werkstück und zur Ausbildung einer thermischen Schädigungszone.

Die Pulsenergie ist der primäre Einflussfaktor für die maximale Schnitttiefe. Die Variationen von Pulsüberlapp und Polarisationszustand zeigen keine signifikanten Veränderungen der in Abbildung 9 gezeigten Ergebnisse. Da ein Einfluss der Polarisationsrichtung relativ zur Schnittrichtung auf die erzeugten Freiwinkel nicht ausgeschlossen werden kann, wird in weiterer Folge zirkulare Polarisation angewendet, um variable Ergebnisse bei Veränderung der Schnittrichtung zu vermeiden. Die Anwendung von Doppel- und Dreifachburstpuls führt, wie in Abbildung 10 dargestellt, bei jedem durchgeführten Versuch zu einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit bei geringer Schnitttiefe. Gleichzeitig sinkt jedoch die maximale Schnitttiefe insbesondere bei Dreifachburstpuls stark ab. Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass die Pulsenergie zwischen den Burstpuls aufgeteilt wird. Sowohl die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit als auch die Reduktion der maximalen Schnitttiefe verhalten sich analog zu einer Veränderung der Pulsenergie durch Anpassung der Pulsfrequenz. Dies gilt auch bei hoher Pulsenergie, wo die Energie jedes Burstpulses der optimalen Pulsenergie von Einzelpuls entspricht. Geringe Vorteile durch die Anwendung des Burstmodes werden auch bei tiefen Schnittfugen erreicht, wenn die Aufteilung der Pulsenergie bei dessen Einsatz berücksichtigt wird.

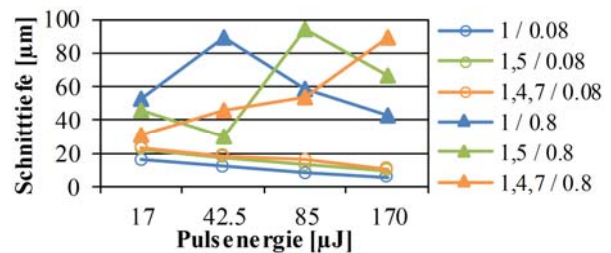


Abbildung 10: Schnitttiefe nach 0.08 und 0.8 s/mm Bearbeitungszeit mit unterschiedlichen Burstmodes (Legende: Burstmode / Bearbeitungszeit [s/mm]).

Weitere Prozessvariationen sollen die maximale Schnitttiefe und die Geschwindigkeit bei tiefen Schnitten durch Verbreiterung der Fuge erhöhen. Dazu wird zunächst die Fokusgrösse variiert und der Strahl defokussiert, um den Strahldurchmesser an der Oberfläche des Materials zu vergrössern. Die gleichen Ergebnisse werden erzielt, wenn diese Vergrößerung durch Defokussierung oder durch Variation der Fokusgrösse erzeugt wird. In beiden Fällen wird die Schnittfuge breiter und die Abtragsrate [mm^3/s] erhöht. Die höhere Abtragsrate wird durch den grösseren Interaktionsbereich und die besseren Einfallswinkel an

den weniger steilen Schnittflanken erklärt. Die Ergebnisse in Abbildung 11 zeigen jedoch, dass die Schnittgeschwindigkeit [mm/s] auf dem gleichen Niveau verbleibt, weil aufgrund der breiteren Schnittfuge mehr Material abgetragen wird, um die gleiche Schnitttiefe zu erreichen. Auch die maximale Schnitttiefe wird nicht verbessert, weil bei gleicher Pulsenergie und grösserem Strahldurchmesser nur eine geringere Fluenz erreicht wird.

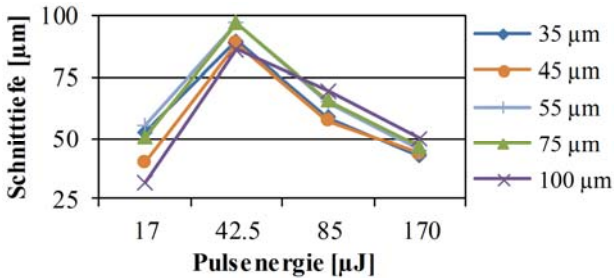


Abbildung 11: Schnitttiefe nach 0.8 s/mm Bearbeitungszeit mit unterschiedlichem Strahldurchmesser auf der Probenoberfläche.

Die zweite Prozessvariation zur Verbreiterung der Schnittfuge ist die Anpassung der Scanstrategie. Das Scannen von mehreren parallelen Linien verbreitert die Schnittfuge ohne die Fluenz zu reduzieren. Damit werden die Vorteile der flacheren Flanken mit denen hoher Fluenz kombiniert. Die Ergebnisse in Abbildung 12 zeigen, dass durch Schraffuren mit 20 μm Breite und zwei oder drei Scanlinien sowohl die Abtragsrate als auch die Schnittgeschwindigkeit um 30% gesteigert wird.

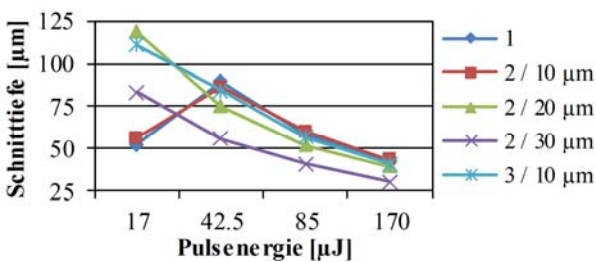


Abbildung 12: Schnitttiefe nach 0.8 s/mm Bearbeitungszeit mit unterschiedlichen Scanstrategien (Legende: Anzahl Linien / Abstand zwischen Linien).

Dies wird ermöglicht, weil sich eine W-förmige Nut ausbildet, die den schnelleren Abtrag bei geringer Pulsenergie auch bei höheren Fugentiefen ermöglicht. Ausserdem wird die maximale Schnitttiefe aufgrund der breiteren Schnittfuge deutlich erhöht. Lasertouchieren

Basierend auf den Ergebnissen von 4.1 werden die Parameter für das Lasertouchieren, wie in Tabelle 2: Lasertouchierparameter zusammengefasst, gewählt. Abbildung 13 zeigt zwei geschnittene Diamantkörner des für die Versuchswerkzeuge angewendeten Typs. Links ist ein Korn abgebildet, bei dessen Schnitt die maximale Schnitttiefe überschritten wurde. In diesem

Fall sind starke thermische Schädigungen in Form von Graphitisierung und 3-5 μm tiefen Kerben an der Freifläche zu erkennen. Das rechte Korn hingegen wurde mit den optimierten Parametern geschnitten und weist eine homogene, ebene Freifläche mit einer Rauheit von $R_a < 100 \text{ nm}$ auf.



Abbildung 13: Geschnittene SDB 1125 Diamantkörner mit Grösse D426; links: Thermische Schädigung an der Freifläche aufgrund Überschreitens der maximalen Schnitttiefe; rechts: Schnittergebnis mit optimierten Prozessparametern.

Der Vergleich eines lasertouchierten Kornes mit einem konventionell mechanisch touchierten Korn in Abbildung 14 zeigt deutliche Unterschiede im Ergebnis. Spuren der mechanischen Bearbeitung äussern sich in Form von Kerben an der Freifläche und Ausbrüchen an der Schneidkante. Die Laserbearbeitung hingegen hinterlässt eine ebene Freifläche und klar definierte Schneidkanten.

Die Ergebnisse der Freiwinkelvermessung zeichnen ein deutliches Bild. Abbildung 15 zeigt ein Histogramm der Körner an den vier lasertouchierten und zwei mechanisch touchierten Werkzeugen im Neuzustand. Die Freiwinkelvermessungen während späterer Stadien im Verlauf der Werkzeugstandzeit ergeben ähnliche Verteilungen. Die Freiwinkel an mechanisch touchierten Werkzeugen sind mit einem Durchschnittswert von -0.2° und einer Standardabweichung von 0.8° erwartungsgemäss symmetrisch um null verteilt. Durch den Lasertouchierprozess werden weitgehend positive Freiwinkel mit einem Durchschnittswert von 2.4° und einer Standardabweichung von 1.4° erzeugt. Der vorgestellte Lasertouchierprozess kann somit erfolgreich für hohe Korngrössen wie D426 eingesetzt werden. Auch die Beeinflussung der Freiwinkel an stochastisch positionierten Körnern durch den Lasertouchierprozess wird deutlich gezeigt.

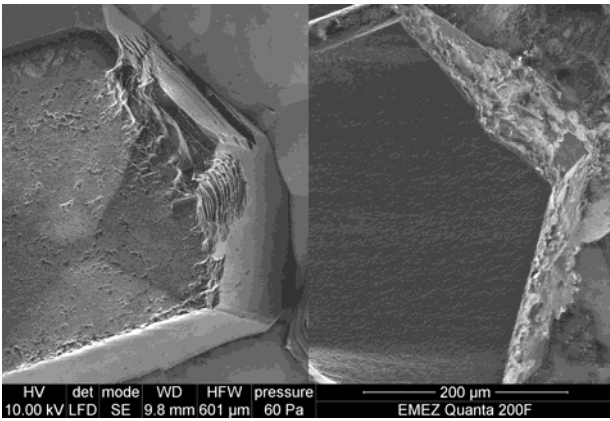


Abbildung 14: REM-Aufnahmen von touchierten SDB 1125 Diamantkörnern mit Grösse D426; links: konventionell mechanisch touchiert; rechts: lasertouchiert.

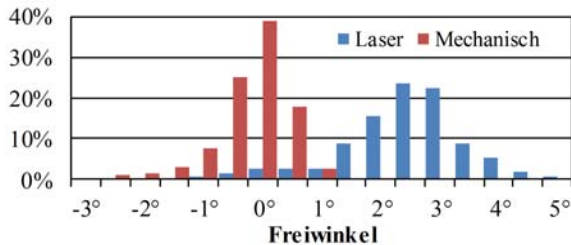


Abbildung 15: Histogramm der an touchierten Körnern gemessenen Freiwinkel.

4.2 Abrichtversuche

Die Ergebnisse der Normalkraftmessungen während der Abrichtversuche sind in Abbildung 16 dargestellt. Mit einem durchschnittlichen Schnittkraftverhältnis von 0.67 bei lasertouchierten Werkzeugen und 0.57 bei konventionell touchierten Werkzeugen verhalten sich die in Abbildung 17 dargestellten, Tangentialkräfte analog. Die Ergebnisse sind Mittelwerte von je zwei Werkzeugen. Bei jedem einzelnen Werkzeug und bei jedem Prozessparameter ergibt sich jedoch das gleiche Bild. Die Prozesskräfte sind bei Anwendung der Werkzeuge mit positiven Freiwinkeln tiefer als bei Anwendung mit negativen Freiwinkeln und mechanisch touchierte Werkzeuge verursachen unabhängig von der Rotationsrichtung wesentlich höhere Prozesskräfte als lasertouchierte. Im Durchschnitt sinken die Kräfte durch das Lasertouchieren mit negativen Freiwinkeln um 64% und mit positiven Freiwinkeln um 77%.

Die Auswertung der Langzeitversuche in Abbildung 18 zeigt, dass die Vorteile lasertouchierter Werkzeuge und positiver Freiwinkel über die Standzeit hinweg erhalten bleiben. Doch sinken die Differenzen der Prozesskräfte zwischen lasertouchierten und konventionell touchierten Werkzeugen insbesondere während den ersten 10^4 mm^3/mm spezifischem Spanvolumen stark ab. Auch danach sinken die Differenzen der Kraftverläufe, was auf einen gemeinsamen verschlissenen Zustand unabhängig vom Abrichtprozess hinausläuft. Dieser äussert sich, wie in Abbildung 19

gezeigt, in einer Verrundung der Schneidkanten und zunehmender Rauheit der Freiflächen. Auch die Differenzen der Schnittkraftverhältnisse sinken über die Standzeit der Werkzeuge. Das Schnittkraftverhältnis lasertouchierter Werkzeuge fällt während der Langzeitstudie kontinuierlich auf 0.57 ab, während das der mechanisch abgerichteten Werkzeuge nur eine geringe Reduktion auf 0.54 aufweist.

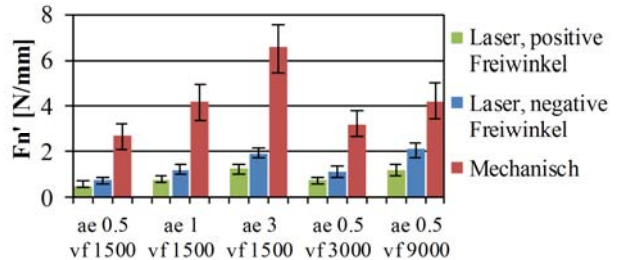


Abbildung 16: Normalkräfte beim Abrichten von Korund mit lasertouchierten und mechanisch touchierten Werkzeugen (ae: Zustellung [mm], vf: Vorschub [mm/min]).

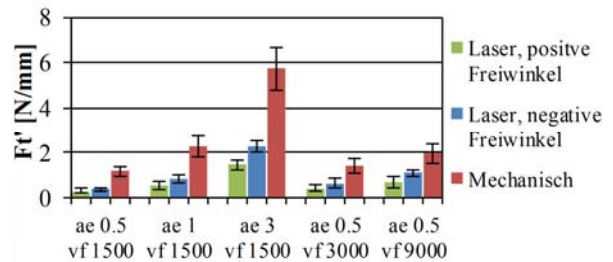


Abbildung 17: Tangentialkräfte beim Abrichten von Korund mit lasertouchierten und mechanisch touchierten Werkzeugen (ae: Zustellung [mm], vf: Vorschub [mm/min]).

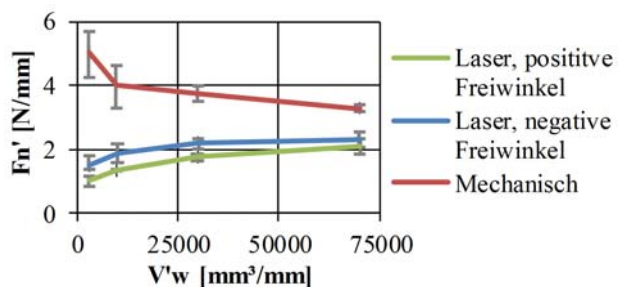


Abbildung 18: Verlauf der Normalkräfte beim Abrichten über die Standzeit der Werkzeuge.

Die prozesskraftreduzierende Wirkung positiver Freiwinkel, wie von Transchel [6] beschrieben, wird damit deutlich bestätigt. Allerdings weisen die Ergebnisse auf einen weiteren Mechanismus bei Freiwinkeln um 0° als Ursache für die wesentlich höheren Prozesskräfte mechanisch touchierter Werkzeuge hin. Weitere Analysen [2] deuten darauf hin, dass die Grösse der Kontaktfläche, die bei 0° Freiwinkel am höchsten ist, einen wesentlichen Einfluss auf die Prozesskräfte hat.

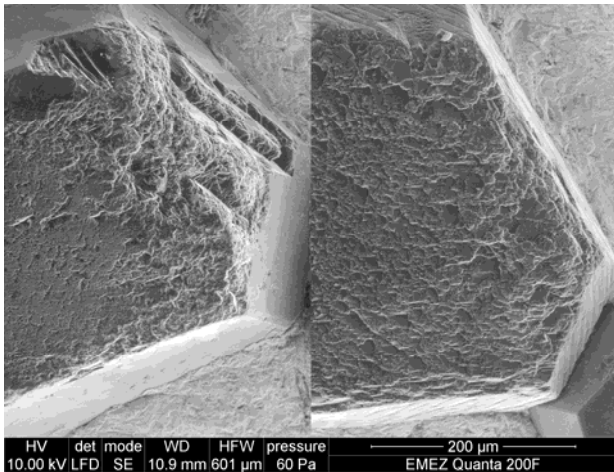


Abbildung 19: REM-Aufnahmen von touchierten Diamantkörnern nach 30'000 mm³/mm spezifischem Spanvolumen; links: konventionell mechanisch touchiert; rechts: lasertouchiert.

Da die gezeigten Messergebnisse nicht vollständig mit den gegebenen Interpretationen erklärt sind, werden weitere schwer zu quantifizierende Einflüsse vermutet. Diese dürften insbesondere bei den in Abbildung 14 gezeigten Unterschieden der Freiflächen- und Schneidkantenqualität liegen. Die Auswirkung der Schneidkanten geometrie im neuen und im verschlissenen Zustand auf die Mikro- Zerspanungsprozesse am Abrasivkorn sind nicht ausreichend verstanden um abschliessend gesicherte Aussagen zu tätigen.

5. Fazit

Die vorgestellte Studie beschäftigt sich zunächst intensiv mit den Einflüssen unterschiedlicher Prozessparameter beim Lasertouchieren mittels Ultrakurzpulslaser. Dabei wird insbesondere die Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit von der Schnitttiefe beleuchtet. Die Pulsenergie und die Schnittfugenbreite werden als primäre Einflussfaktoren für das Absinken der Schnittgeschwindigkeiten in tiefen Schnittfugen identifiziert. Die Anwendung von Burstpulsen ermöglicht eine weitere Optimierung des Prozesses durch Erhöhung der Schnittgeschwindigkeiten in Schnittfugen mit geringem Schachtverhältnis.

Der Prozess wird an Abrichtstiften mit synthetischem D426 Diamantkorn demonstriert. Die dabei erzeugten Freiwinkel an den stochastisch positionierten Körnern werden mit einem eigens entwickelten Mess- und Auswerteverfahren ermittelt. Abrichtversuche auf Korund zeigen, dass die Freiwinkel von etwa 2,4° reduzierend auf die Prozesskräfte wirken. Ausserdem wird festgestellt, dass lasertouchierte Stifte unabhängig vom Vorzeichen des Freiwinkels um 70% geringere Prozesskräfte als konventionell mechanisch touchierte Werkzeuge hervorrufen. Als primäre Ursache wird die höhere Kontaktfläche bei 0° Freiwinkel, wie sie beim mechanischen Touchieren auftritt, angeführt. In diesem Fall gelingt mit dem vorgestellten Laserprozess eine erhebliche Reduktion der Prozesskräfte durch Vermin-

derung der Kontaktfläche. Anders als beim Strukturieren geht dies nicht mit einer Reduktion der Anzahl aktiver Körner einher, was sich positiv auf den Verschleiss der Werkzeuge auswirkt.

Weitere Studien werden auf das Verschleissverhalten von lasertouchierten und mechanisch touchierten Werkzeugen fokussieren. Ausserdem soll der Prozess an anderen Werkzeugen mit komplexen Geometrien sowie mit anderem Abrasivkorn für Schleifanwendungen getestet werden.

6. Danksagung

Die Forschung welche zu diesen Ergebnissen geführt hat wurde durch das 7. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union (FP7/2007-2013, grant agreement n° 314731) gefördert. Die Autoren danken der Reishauer AG für ihren Beitrag zu diesem Projekt.

7. Referenzen

- [1] Wegener, K., Hoffmeister, H.-W., Karpuschewski, B., Kuster, F., Hahmann, W.-C., Rabiey, M., 2011, Conditioning and monitoring of grinding wheels, CIRP Annals, Vol.60, No.2, pp.757-777.
- [2] Warhanek, M., Walter, C., Huber, S., Hänni, F., Wegener, K., 2015, Cutting characteristics of electroplated diamond tools with laser-generated positive clearance, CIRP Annals, Vol.64, No.1, pp.317-320.
- [3] Pinto, F.W., 2008, An experimental and numerical approach to investigate the machining performance of engineered grinding tools, Dissertation, ETH Zurich.
- [4] Walter, C., Komischke, T., Kuster, F., Wegener, K., 2014, Laser-structured grinding tools – Generation of prototype patterns and performance evaluation, Journal of Materials Processing Technology, Vol.214, pp.951-961.
- [5] Dold, C., 2013, Picosecond laser processing of diamond cutting edges, Dissertation, ETH Zurich.
- [6] Transchel, R., Leinenbach, C., Wegener, K., 2014, Cutting and ploughing forces for small clearance angles of hexa-octahedron shaped diamond grains, CIRP Annals, Vol.63, No.1, pp.325-328.
- [7] Butler-Smith, P.W., Axinte, D.A., Daine, M., 2011, Ordered diamond micro-arrays for ultra-precision grinding - An evaluation in Ti-6Al-4V, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.51, pp.54-66.
- [8] Butler-Smith, P.W., Axinte, D.A., Daine, M., 2012, Solid Diamond Micro-Grinding Tools: From Innovative Design and Fabrication to Preliminary Performance Evaluation in Ti-6Al-4V, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.59, pp.55-64.
- [9] Westkämper, E., (1995) Grinding Assisted by Nd:YAG Lasers, CIRP Annals, Vol.44, No.1, pp.317-320.

- [10] Hosokawa, A., Ueda, T., Yunoki, T., 2006, Laser dressing of metal bonded diamond wheel, *Annals of the CIRP* Vol.55, No.1, pp.329-332.
- [11] Walter, C., Rabiey, M., Warhanek, M., Jochum, N., Wegener, K., 2012, Dressing and truing of hybrid bonded CBN grinding tools using a short-pulsed fibre laser, *CIRP Annals* Vol.61, No.1, 279-282.
- [12] Dold, C., Transchel, R., Rabiey, M., Langenstein, P., Jaeger, C., Pude, F., Kuster, F., Wegener, K., 2011, A study on laser touch dressing of electroplated diamond wheels using pulsed picosecond laser sources, *CIRP Annals*, Vol.60, No.1, pp.363-366.