

Laserkonditionieren von Diamantschleifscheiben und deren Leistungsfähigkeit

Ali Zahedi¹, Bahman Azarhoushang²

¹Kompetenzzentrum für Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung (KSF), Hochschule Furtwangen; ali.zahedi@hs-furtwangen.de

² Kompetenzzentrum für Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung (KSF), Hochschule Furtwangen; aza@hs-furtwangen.de

Kurzzusammenfassung

Der Materialabtrag mittels Laser ist eine neue, nicht-mechanische Konditionierungsmethode zur Optimierung der Bearbeitungskosten von superabrasiven Schleifwerkzeugen. In dieser Arbeit werden geeignete Laserparameter für das Konditionieren von kunstharzgebundenen Diamantschleifscheiben vorgeschlagen, welche auf einer zuvor durchgeführten thermischen Analyse basieren. Eine große Rolle bei der Laserkonditionierung spielt die selektive Bearbeitung der Schleifscheibenkomponenten. Demzufolge wurde eine kunstharzgebundene Diamantschleifscheibe mit einem Pikosekundenlaser konditioniert. Die Leistungsfähigkeit der laserbearbeiteten Schleifscheibe wurde beim Einstechschleifen von Aluminiumoxid-Zirkoniumoxid-Keramik, welches ein herausforderndes Material darstellt, untersucht. Um die Effizienz des Schleifprozesses zu bewerten, wurden die Schleifleistung, der arithmetische Mittenrauwert und die gemittelte Rautiefe des geschliffenen Werkstücks senkrecht zur Schnitttrichtung gemessen.

Schlüsselwörter:

Laserabrichten, Diamantschleifscheibe, Aluminiumoxid-Zirkoniumoxid-Keramik, Schleifleistung, Schleifkräfte Oberflächenrauheit.

Einleitung

Das konventionelle Abrichten superabrasiver Schleifwerkzeugen stellt aufgrund verschiedener Aspekte eine Herausforderung dar. Die hohe Härte führt zu hohem Verschleiß und damit Ungenauigkeiten und hohen Kosten für die Abrichtwerkzeuge, weitere Nachteile sind lange Prozesszeiten und Verschmutzungen [1,2]. Mit nicht-mechanischen Konditionierungsmethoden für Schleifscheiben wie ELID (elektrolytisches in-Prozess Abrichten), Funkenerodieren und Laserabrichten wird versucht, die Prozessgenauigkeit zu erhöhen und Bearbeitungskosten von superabrasiven Werkzeugen zu senken.

Die ersten Schritte bei der Erforschung des Effekts von Lasern auf eine Schleifscheibe wurden in den späten 1980ern unternommen, indem konventionelle Aluminiumscheiben untersucht wurden [3,4]. Der Laserstrahl kann auf der Oberfläche der Schleifscheibe ein lokales Schmelzen von Bindungsmaterial und/oder Schleifkörnern bewirken. Der Laserstrahl kann zudem die konventionellen, mechanischen Abrichtmethoden unterstützen indem er die Scheibenkomponenten, vor dem Eingriff des Abrichtwerkzeugs, erweicht [5].

Das Laserabrichten bietet geringere Schleifkräfte, weniger Verschleiß und bessere Oberflächenqualitäten beim Schleifen als die Methoden mit mechanischem Kontakt [3,4]. Die Vorteile machen sich besonders beim Abrichten von superabrasiven Schleifscheiben bemerkbar, was sonst mit hohen Kosten und weiteren Herausforderungen behaftet ist [6-8]. Es wurde außerdem gezeigt, dass aufgrund der höheren Kontrollierbarkeit und der kleineren wärmebeeinflussten Zone, Puls laser besser geeignet sind als Dauerstrichlaser (cw-Laser) [9]. Bei gleicher Schleifqualität wie mit mechanischen Methoden, treten bei metallgebundenen Diamantschleifscheiben, welche mit Laser abgerichtet wurden, weniger Kornschädigungen und Rissbildungen in der Oberfläche auf [10].

Die Auswahl der Laserparameter erfolgt bei den meisten Abrichtprozessen nach der Methode „trial and error“. Aus diesem Grund wurde eine thermische Analyse durchgeführt, bei der die Parameter für eine selektive Bearbeitung der verschiedenen Schleifscheibenkomponenten und für die gewünschten Abrichtprozesse definiert wurden [11]. Folglich ist in dieser Forschungsarbeit eine kunstharzgebundene Diamantschleifscheibe mittels eines Pikosekundenlasers radial abgerichtet. Rundscheifprozesse von Aluminiumoxid-Zirkoniumoxid-Keramik (AZ90) sind durchgeführt, bei denen konventionell abgerichtete (mittels einer grünen SiC-Abrichtscheibe) und laserabgerichtete Schleifscheiben zum Einsatz kamen. Der Vergleich der beiden Verfahren basiert auf den Ergebnissen der experimentellen Versuche.

Laserabrichtverfahren

In dieser Forschungsarbeit wurde für die Abrichtprozesse ein Yb:YAG Pikosekundenlaser (TruMicro 5050) der Firma TRUMPF eingesetzt. Die Spezifikationen des Lasers sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Der Laserstrahl wird über mehrere optische Komponenten in den Laserscanner geleitet und dort auf die Oberfläche der Schleifscheibe fokussiert.

Tabelle 1. Spezifikationen der Pikosekunden-Laseranlage.

Wellenlänge (nm)	1030
maximale Durchschnittsleistung (W)	50
Pulslänge (ps)	<10
maximale Pulsenergie (µJ)	125
Wiederholfrequenz (kHz)	400

Der verwendete Versuchsaufbau der Komponenten ist in Abbildung 1 dargestellt.

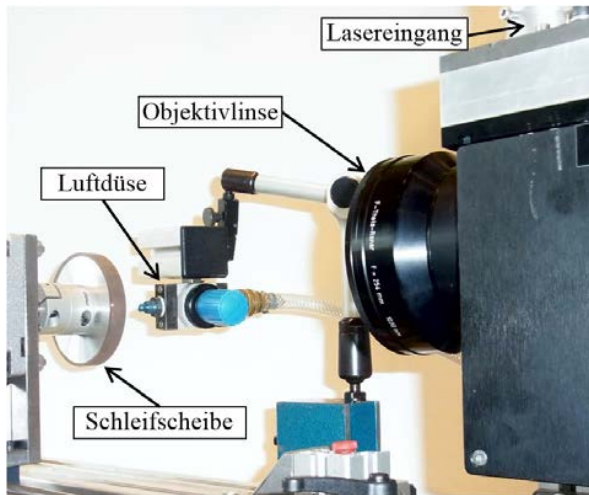


Abbildung 1. Versuchsaufbau der Laserkomponenten.

Um eine große Anzahl an Konditionierungsprozessen abzudecken, wurde die Schleifscheibenspinde mit einem genauen Positioniersystem ausgestattet, welches die Winkelposition und -geschwindigkeit der Schleifscheibe regelt.

Die durchschnittliche Korngröße der ausgewählten Schleifscheibe (hergestellt von Bärhausen) beträgt $76\ \mu\text{m}$, die Konzentration liegt bei 50. Unter Berücksichtigung der thermischen Analyse [11,12] und der mechanischen Eigenschaften von Diamantkörnern und Kunstharzbindung, beträgt die notwendige Pulsenergie für einen effektiven Abtrag von Korn- bzw. Bindungsmaterial ca. $37\ \mu\text{J}$ und $5\ \mu\text{J}$. Dementsprechend definiert die Differenz der Pulsenergien den Bereich, in dem das Bindungsmaterial abgetragen werden kann, ohne dabei die Diamantkörner zu beschädigen.

Dafür wird die Pulsenergie auf $25\ \mu\text{J}$ eingestellt und die Rotationsgeschwindigkeit der Schleifscheibe und der axiale Vorschub des Laserscanners so abgestimmt, dass die relative Scangeschwindigkeit $200\ \text{mm/s}$ beträgt, bei einem Abstand der Nuten von $50\ \mu\text{m}$. Dementsprechend entstehen Nuten mit einer Tiefe von $70\ \mu\text{m}$ wobei die Diamantkörner vollständig erhalten bleiben und genügend Schneidkanten und Spanräume entstehen.

Zur gleichen Zeit wurde eine entsprechende Schleifscheibe mit einer keramikgebundenen **SiC-Abrichtscheibe (Körnung #320) konventionell abgerichtet** (Scheibengeschwindigkeit beim Abrichten, $v_{sd} = 30\text{m/s}$, Abrichtscheibendrehzahl, $n_{SiC} = 100\text{U/min}$, Zustellbetrag beim Abrichten, $a_{ed} = 5\ \mu\text{m}$, Axialvorschub beim Abrichten, $v_{fad} = 800\text{mm/min}$) und danach mit einem Aluminiumoxidstück 20 mal ($\times 20\ \mu\text{m}$) geschärft. Beide Abrichtprozesse und die generierten Oberflächen sind in den Abbildungen 2 und 3 dargestellt. Die dunklen Bereiche in den Abbildungen stellen die Diamantkörner dar. Auf der Oberfläche der konventionell abgerichteten Scheibe können Kornausbrüche erkannt werden.

Durch die kombinierte Bewegung in Umfangs- und Axialrichtung wurden beim Laserabrichten nebeneinanderliegende Nuten auf der

Schleifscheibenoberfläche generiert (zu erkennen in in Abbildung 3).

Die quantitative Untersuchung der Oberflächentopographie erfolgte mit einem Konfokalmikroskop. Aus den Konfokalbildern können die Tiefe und Breite der generierten Nuten sowie die Kornüberstände ermittelt werden. Abbildung 4 und 5 zeigen die Konfokalbilder der konventionell- und laserabgerichteten Schleifscheiben.

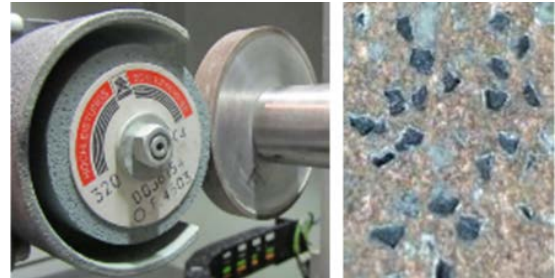


Abbildung 2. Konventionelles Abrichten von Diamantschleifscheiben (links); und generierte Oberflächentopographien (rechts).



Abbildung 3. Laserabrichten von Diamantschleifscheiben (links); und generierte Nuten in der Oberflächentopographie (rechts).

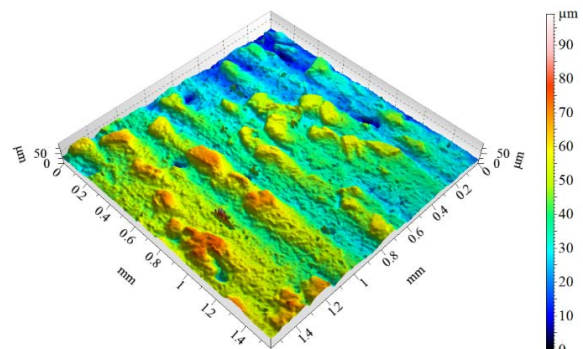


Abbildung 4. Konfokalbild der konventionell abgerichteten und geschärften Schleifscheibenoberfläche.

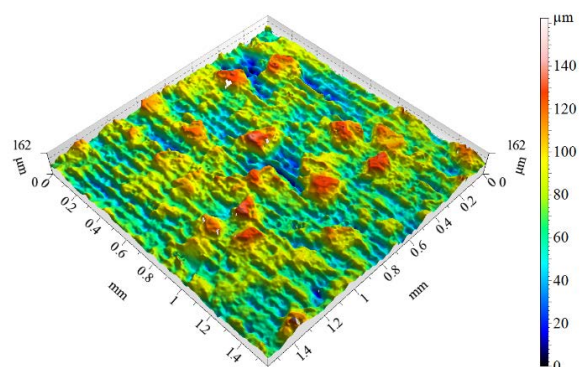


Abbildung 5. Konfokalbild der laserabgerichteten Schleifscheibenoberfläche.

Das Konfokalbild der laserabgerichteten Scheibe zeigt die regelmäßigen Nuten die durch den Laserstrahl generiert sind, ebenso wie die selektive Ablation der Komponenten ohne nennenswerte Schädigung der Körner (die Nuten werden nicht über der Kornoberfläche fortgeführt). Ein weiterer Unterschied der beiden Abrichtverfahren ist, dass das Abrichten mit dem Laser einen effektiveren Kornüberstand aufweist, als das mechanische Verfahren. Ein besserer Kornüberstand hat den Vorteil, dass die Schleifkräfte, durch eine Minderung der Reibung zwischen Werkstück und Bindungsmaterial, sinken. Zudem entsteht eine größere Anzahl an aktiven Schneidkanten für den Materialabtrag und größere Spanräume. Die Projektion der Nuten auf die Werkstückoberfläche in Kombination mit einer reduzierten Reibung mit dem Bindungsmaterial kann zu einer Erhöhung der Oberflächenrauheit führen. Dieser Effekt wird in den nächsten Abschnitten diskutiert.

Schleifversuche

Für eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit von laserabgerichteten und konventionell abgerichteten Schleifscheiben, wurden Einstechschleifversuche an keramischen Werkstücke auf einer Rundschleifmaschine (Firma EMAG) durchgeführt. Als Material für die Werkstücke wurde Aluminiumoxid-Zirkoniumoxid-Keramik (AZ90), mit 90% Aluminium und 10% Zirkonium, ausgewählt. Trotz vergleichbarer Härtewerte, besitzt die mit Zirkoniumoxid verstärkte Aluminiumoxidkeramik im Vergleich zu monolithischer Aluminiumoxid-Zirkoniumoxid-Keramik eine höhere Belastungsfähigkeit und hydrothermale Stabilität [13]. Die Schleifexperimente wurden unter der Verwendung von Schleiföl durchgeführt. Tabelle 2 zeigt die verwendeten Parameter beim Einstechschleifen, dabei wurden verschiedene Werte für die Schnittgeschwindigkeit v_c (Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe), Werkstückgeschwindigkeit v_w und die radiale Vorschubgeschwindigkeit v_{fr} verwendet. Der Aufbau der Rundschleifversuche ist in Abbildung 6 gezeigt.

Tabelle 2. Parameter beim Rundschleifen.

Schnittgeschwindigkeit v_c , (m/s)	30, 50
radiale Zustellgeschwindigkeit v_{fr} , (mm/min)	1, 2, 3, 4
Geschwindigkeitsverhältnis, $q_s = v_c/v_w$	60

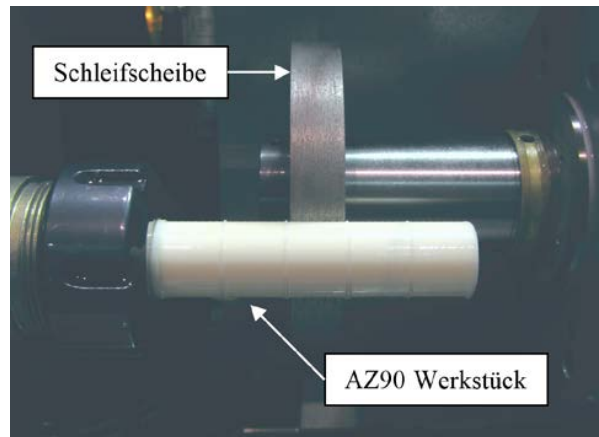


Abbildung 6. Versuchsaufbau der Rundschleifversuche einschließlich Schleifscheibe und Werkstück.

Um die Effekte des Lasers im Vergleich zum konventionellen Abrichtprozess zu untersuchen, wurden während der Schleifprozesse die Schleifleistung aufgezeichnet und zudem die Oberflächenrauheiten der geschliffenen Werkstücke mit einem Hommel T8000 Messgerät ermittelt. Bei der Aufzeichnung und Beurteilung der Schleifleistung muss darauf geachtet werden, dass nur die Leistung in Bezug auf den Materialabtrag beachtet wird und nicht die Leistung, die durch die Lagerreibung und Einflüsse von Kühlschmierstoffen verbraucht wird.

Ergebnisse und Diskussion

Beim zylindrischen Einstechschleifen hängt die spezifische Materialabtragsrate Q' nur von der radialen Zustellgeschwindigkeit ab und kann wie folgt berechnet werden:

$$Q' = \pi d_w v_{fr} \quad (1)$$

d_w stellt den Durchmesser des Werkstücks dar. Demgemäß wurden die bezogenen Spindleleistungen über den Zustellgeschwindigkeiten aufgetragen. Die Spindleleistungen bezogen auf die Scheibenbreite für konventionelle- und Laserabrichtprozesse sind in Abbildung 7 für Schnittgeschwindigkeiten von 30 m/s und 50 m/s dargestellt.

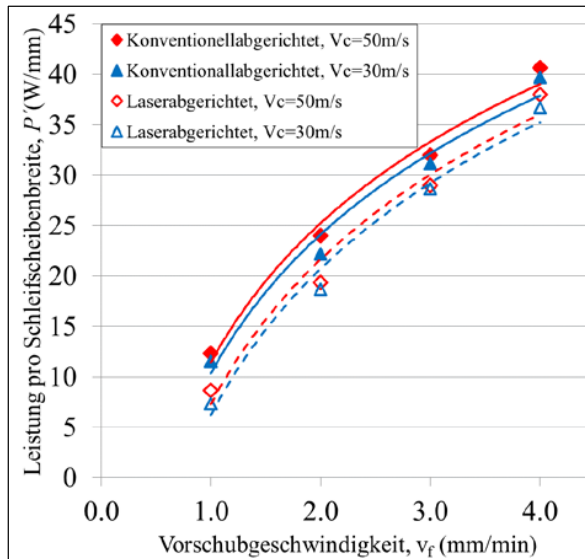


Abbildung 7. Schleifleistung über der Zustellgeschwindigkeit für konventionell und laserabgerichtete Scheiben.

Die konventionell abgerichteten Schleifscheiben führen zu höheren Schleifleistungen, dabei erscheint der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Schleifleistung nicht erwähnenswert. Bei der Gegenüberstellung der Tangentialkräfte kann ein Einfluss der Schnittgeschwindigkeiten ausgemacht werden, wodurch ein differenzierter Vergleich der beiden Verfahren möglich ist. Die Tangentialkräfte sind ein wesentlicher Faktor für die Beurteilung des Prozesses, da sie bestimmend sind für den Verschleiß der Schleifscheibe und einen direkten Bezug zu den Schleifnormalkräften haben, welche die Hauptursache für Oberflächenschädigungen und Materialausbrüche ist. Abbildung 8 zeigt die Verläufe der Tangentialkräfte für die konventionell- und laserabgerichteten Schleifscheiben.

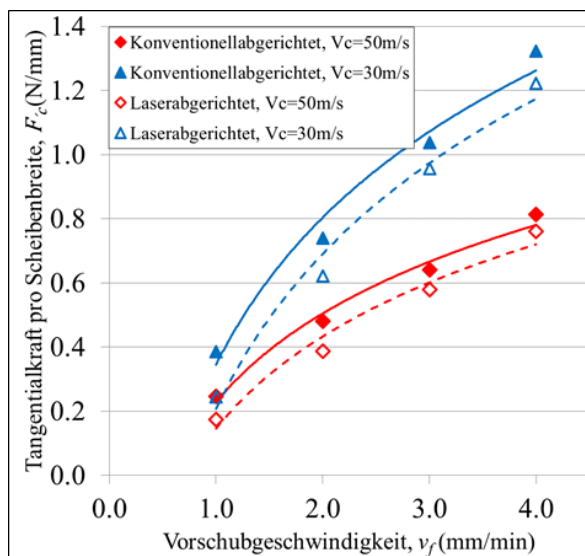


Abbildung 8. Tangentialkräfte über der Zustellgeschwindigkeit für konventionell- und laserabgerichtete Schleifscheiben.

Wie erwartet steigen die bezogenen Schleifkräfte mit einer Erhöhung der Zustellgeschwindigkeit und einem infolgedessen höheren Materialabtrag. Höhere Schnittgeschwindigkeiten begünstigen eine Senkung der Schleifkräfte, was zu einer Erhöhung der Genauigkeit führt, insbesondere beim Rundschleifen bei dem das Werkstück zum Durchbiegen neigt. In allen Fällen war die Schleifleistung der laserabgerichteten Scheibe niedriger als bei der konventionell abgerichteten. Die Tangentialkräfte zeigten dieselbe Tendenz, so dass Reduzierungen von bis zu 35% der Tangentialkräfte gemessen werden konnten. Gründe hierfür können zum einen eine effektivere Ablation des Bindungsmaterials bei gleichzeitiger Erhaltung der Schleifkörner (selektive Bearbeitung der Komponenten) und zum anderen ein effektiverer Kornüberstand bei den laserabgerichteten Schleifscheiben sein. Folglich steigt der prozentuale Anteil an Energie, die für die Zerspanung des Werkstoffs genutzt wird deutlicher als der Energieverlust durch Reibung. Dieses Verhalten kann auch mit der Erhaltung der Kornschärfe durch die Laserbearbeitung in Verbindung gebracht werden, da es bei konventionellen Abrichtverfahren mit SiC-Scheiben zu Abstumpfung der Körner kommt.

Die Analyse der Rauheit eines Werkstücks ist in der Schleiftechnologie deutlich komplizierter als die Untersuchung der Kräfte und Energien. Es wurde gezeigt [14], dass die Spandicke h_e ein bestimmender Parameter bei der Untersuchung von Oberflächenrauheiten ist. Ein weiterer Parameter, welcher sich mehr auf die einzelnen Körner bezieht, ist die mittlere Kornquerschnittsfläche A_e welche in dieser Arbeit betrachtet wird. Beide Parameter können entsprechend der folgenden Gleichungen ermittelt werden [14]:

$$h_e = a_e v_w / v_c \quad (2)$$

$$A_e = h_e / Cl_c \quad (3)$$

wobei $a_e = \pi d_w v_{fr} / v_w$ die Zustellung beim Einstech-Schleifen ist. C ist die Konzentration der Körner auf der Oberfläche der Schleifscheibe und l_c die Länge der Kontaktzone zwischen Werkstück und Schleifscheibe. Die Kontaktlänge kann bezogen auf die Zustellung, den Werkstückdurchmesser und den Scheibendurchmesser d_c wie folgt angenähert werden [14]:

$$l_c \approx \sqrt{a_e d_c d_w / (d_c + d_w)} \quad (4)$$

Als die zwei ausschlaggebenden Rauheitswerte wurden Abweichungen der mittleren Rauheit R_a und der gemittelten Rautiefe R_z des geschliffenen Werkstücks senkrecht zur Schnitttrichtung ermittelt und über der mittleren Kornquerschnittsfläche A_e aufgetragen. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 9 und 10 zu sehen.

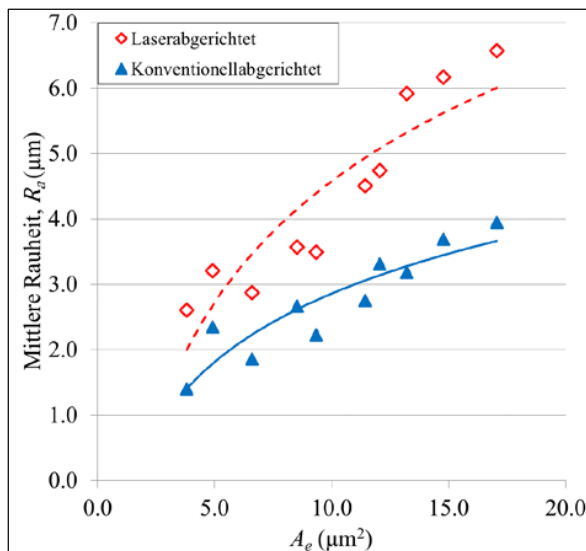


Abbildung 9. Die mittlere Rauheit des geschliffenen Werkstücks.

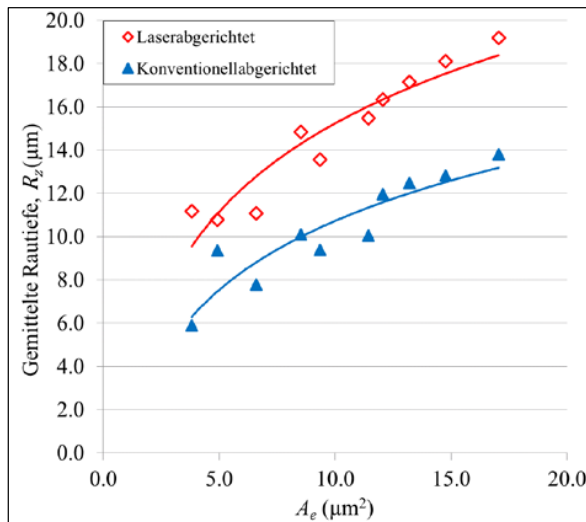


Abbildung 10. Die gemittelte Rautiefe des geschliffenen Werkstücks.

Die Werte von A_e beinhalten indirekt die Schleifparameter. Eine Erhöhung von A_e , welche direkt proportional zur Zustellgeschwindigkeit und umgekehrt proportional zur Schnittgeschwindigkeit ist, führt zu einer Erhöhung der Rauheitswerte. Im Gegensatz zu den Leistungswerten, sind die Rauheitswerte mit der laserabgerichteten Schleifscheibe höher als bei der konventionell abgerichteten Scheibe. Der Grund hierfür könnte in der Generierung der Mikronuten in Schnittrichtung liegen, welche auf die Oberfläche des Werkstücks übertragen werden. Angesichts der Reduktion der Schleifleistung und der Erhöhung der Rauheitswerte bei laserabgerichteten Schleifscheiben kann gefolgert werden, dass diese Werkzeuge am effizientesten für grobe Schleifprozesse angewendet werden können. Für andere Anwendungen sind feinere Abrichtprozesse mit kleinerem **Abstand zwischen den Laserspuren** notwendig.

Fazit

Ein neues Verfahren für die kontrollierte Bearbeitung von Komponenten einer kunstharzgebundenen

Diamantschleifscheibe wurde angewendet. Die Schleifversuche haben gezeigt, dass die laserabgerichtete Schleifscheibe zu niedrigeren Schleifleistungen, geringeren Tangentialkräften und durchgehend weniger Verschleiß und Formungenauigkeiten neigt. Auf der anderen Seite sind die Rauheitswerte erhöht, was einen feineren Abrichtprozess oder die Anwendung von Finishing-Prozessen mit Ausfunkezeit erfordert.

Danksagung

Das Projekt wurde vom MWK Baden-Württemberg im Rahmen des Programmes „Innovative Projekte“ gefördert, wofür wir uns herzlich bedanken. Die Autoren möchten auch der Firma TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH ihren Dank aussprechen, für die Unterstützung bei der Installation und beim Einsatz der Pikosekunden-Laseranlage.

Literatur

- [1] I.D. Marinescu, M.P. Hitchiner, E. Uhlmann, W.B. Rowe, I. Inasaki, Handbook of Machining with Grinding Wheels, Taylor & Francis, 2006.
- [2] Syoji K., Truing and dressing of superabrasive wheels, Machine and tools 2 (1989) 18–26.
- [3] N. Ramesh Babu, V. Radhakrishnan, Murti, Y. V. G. S., Investigations on Laser Dressing of Grinding Wheels—Part I: Preliminary Study, J. Eng. for Industry 111 (1989) 244.
- [4] N. Ramesh Babu, V. Radhakrishnan, Investigations on Laser Dressing of Grinding Wheels—Part II: Grinding Performance of a Laser Dressed Aluminum Oxide Wheel, J. Eng. for Industry 111 (1989) 253.
- [5] N.B. Dahotre, S.P. Harimkar, Laser fabrication and machining of materials, Springer Science+Business Media, New York, N.Y., ©2008.
- [6] C. Zhang, Y. Shin, A novel laser-assisted truing and dressing technique for vitrified CBN wheels, International Journal of Machine Tools and Manufacture 42 (2002) 825–835.
- [7] Y. Tian, Y.C. Shin, Thermal modelling and experimental evaluation of laser-assisted dressing of superabrasive grinding wheels, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 221 (2007) 605–616.
- [8] H.W. Hoffmeister, J. Timmer, Laser Conditioning of Superabrasive Grinding Wheels, Industrial Diamond Review 60 (2000) 209–218.
- [9] X.-Z. Xie, G.-Y. Chen, L.-J. Li, Dressing of resin-bonded superabrasive grinding wheels by means of acousto-optic Q-switched pulsed Nd:YAG laser, Optics & Laser Technology 36 (2004) 409–419.
- [10] A. Hosokawa, T. Ueda, T. Yunoki, Laser Dressing of Metal Bonded Diamond Wheel, CIRP Annals - Manufacturing Technology 55 (2006) 329–332.

- [11] A. Zahedi, T. Tawakoli, B. Azarhoushang, J. Akbari, Picosecond laser treatment of metal-bonded CBN and diamond superabrasive surfaces, *Int J Adv Manuf Technol* (2014) 1-13.
- [12] A. Zahedi, T. Tawakoli, J. Akbari, B. Azarhoushang, Conditioning of Vitrified Bond CBN Grinding Wheels Using a Picosecond Laser, *Advanced Materials Research Advances in Abrasive Technology XVII* (2014) 573–578.
- [13] De Aza, A. H., J. Chevalier, G. Fantozzi, M. Schehl, R. Torrecillas, Crack growth resistance of alumina, zirconia and zirconia toughened alumina ceramics for joint prostheses, *Biomaterials* 23 (2002) 937–945.
- [14] S. Malkin, C. Guo, *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*, Industrial Press, 2008.