

Schwingungsunterstützte Schleifbearbeitung

Friedrich BLEICHER¹, Jens BRIER²

¹ TU Wien, Inst. für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik, Wien, Österreich, bleicher@ift.at

² TU Wien, Inst. für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik, Wien, Österreich, brier@ift.at

Zusammenfassung:

In nahezu jedem technischen Produkt ist heute eine Komponente verbaut, deren erforderliche Oberflächengüte durch ein Schleifverfahren realisiert wird. Gerade die effiziente Schleifbearbeitung von Hochleistungswerkstoffen, dies sind beispielsweise hochlegierte metallische oder aber auch keramische Werkstoffe, stellt dabei eine Herausforderung an die Prozessoptimierung dar. Für eine wirtschaftliche Schleifbearbeitung ist ein hohes Zeitspanvolumen bei möglichst wenigen Fertigungsschritten von entscheidender Bedeutung. In diesem Zusammenhang eröffnet der Einsatz der schwingungsunterstützten Bearbeitung weitreichende Möglichkeiten zu einer signifikanten Verbesserung der Wirkmechanismen des Zerspanungsprozesses mit geometrisch unbestimmter Schneide. Aus der Überlagerung der Hauptschnittbewegung mit einer Schwingung resultiert durch die kinematischen Zusammenhänge ein alternierender Zerspanungsvorgang, welcher eine Begünstigung der Spanbildung und eine bessere Spülwirkung durch den Kühlschmierstoff ermöglicht. Der Effekt der Schwingungsanregung bewirkt ein zeitlich veränderliches Auftreten von Prozesskräften und damit eine reduzierte thermische Beeinflussung des Werkstücks bzw. des Werkzeugs. Die Schleifverfahren werden nach der Art und der Stelle der Schwingungsanregung sowie nach der Schwingungsform unterschieden, wobei sich Letztere vor allem durch die Frequenz und die Amplitude spezifiziert. Es wird in Schwingungen mit hoher (Ultraschall), mittlerer und niedriger Frequenz differenziert. Die Einbringung der Schwingungsanregung kann direkt am Werkstück oder über eine Bewegungsüberlagerung am Werkzeug erfolgen. Bei zielgerichteter Anwendung der Schwingungsanregung können am Werkstück eine verbesserte Oberflächenqualität oder bei der Zerspanung von sprödharten Werkstoffen eine Reduzierung von Kantenausbrüchen erreicht werden. Geringere Zerspanungskräfte und die begünstigte Kühlschmierung helfen, den Verschleiß der Schleifwerkzeuge zu senken. Das Zeitspanvolumen und damit die Effizienz von Schleifverfahren können durch die genannten Effekte signifikant gesteigert werden.

Schlüsselwörter: Schleifen, Schwingungsanregung, Ultraschallschwingung, Hybridbearbeitung

1. Einleitung

Die Entwicklung in der Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide war in den letzten Jahren insbesondere auch durch die Steigerung der Prozesseffizienz geprägt. Unterschiedliche Optimierungsansätze werden dabei verfolgt, beispielsweise führt in der Hochleistungsschleifbearbeitung die Steigerung der Schnittgeschwindigkeit zu hohen Abtragsraten. Dabei tragen der Einsatz von Superschleifmitteln wie CBN- oder PKD-Schleifkorn und auch die Verbesserung der Kühlschmierung zusammen mit unkonventionellen Prozessmethoden wie der Ultraschallbearbeitung zu signifikanten Verbesserungen bei. Bei der schwingungsunterstützten Zerspanung wird die Schnitt- oder Vorschubgeschwindigkeit des konventionellen Bearbeitungsprozesses durch eine Schwingbewegung bei hoher (Ultraschall), mittlerer oder tiefer Frequenz überlagert, welche in einer oder mehreren Achsen ausgeführt wird. Erste Untersuchungen zum technologischen Ansatz der Schwingungsunterstützung gehen auf die Mitte des letzten Jahrhunderts zurück (siehe [1, 2]) und verfolgten das

Hauptziel, eine wirtschaftliche Zerspanung mit hohen Zeitspanvolumina zu realisieren. Es erfolgt also die Zusammenführung zweier verschiedener Wirkmechanismen in einem Prozess; man spricht heute von einem hybriden Fertigungsverfahren. In diesem Sinne ist die ultraschallunterstützte Schleifbearbeitung dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich zur rotatorischen Hauptschnittbewegung des konventionellen Schleifens eine ein- oder mehrachsige Schwingung aufgebracht wird. Durch immer kürzer werdende Produktlebenszyklen ist ein flexibles und schnelles Reagieren in Produktionsabläufen erforderlich; die Reduktion der Bearbeitungszeit gilt dabei als ein Schlüsselfaktor [3]. Erstmals wurde 1927 von Wuth und Loomis die Materialbearbeitung unter Anwendung von Ultraschallschwingungen eingesetzt [4]. Ein weiterer wichtiger Faktor, der für eine Ultraschallunterstützung spricht, ist die erzielbare Verbesserung der Oberflächenqualität von geschliffenen Bauteilen. Wie später noch gezeigt wird, sind insbesondere bei sprödharten Werkstoffen sehr dünnwandige Strukturen erst durch die schwingungsunterstützte Schleifoperation mit einer hohen Oberflächenqualität und ohne groß-

flächige Abplatzungen herstellbar [5].

Eingangsooperanden		Prozess	Ausgangsooperanden	
Systemgrößen	Stellgrößen	Prozessgrößen	Wirkgrößen	
Maschine	Schnittgeschw.	Kräfte	Rauheiten	
Werkzeug	Vorschubgeschw.	Leistungen	Maße, Form des	
Spannsystem	Arbeitseingriff	Temperaturen	Werkstückes	
Werkstoff	Kühlschmierstoff	Akustische Emissionen	Randzonenbeeinflussung	
Rohteilform	Frequenz	Spanform	WZ-Verschleiß	
Aktorik	Amplitude	Schwingung ein-/mehrachsig	Maschinenveränderung	
	Phasenverschiebung			

Abbildung 1: Prozessbeschreibung mit Eingangs- und Ausgangsooperanden

Im Sinne einer strukturierten Beschreibung des Fertigungsprozesses der schwingungsunterstützten Schleifbearbeitung können Eingangs- und Ausgangsooperanden definiert werden. In Abbildung 1 sind jene Größen hervorgehoben, die bei der schwingungsunterstützten Schleifbearbeitung ergänzend zu definieren sind. Grundsätzlich kann die Schwingungsunterstützung der Schleifbearbeitung nach folgenden Kriterien definiert werden:

- Art der Frequenzanregung, wobei zwischen einer direkten und einer indirekten Anregung unterschieden werden kann,
- Form der Schwingungsanregung, beschrieben durch die Frequenz, die Amplitude(n) und die Phasenverschiebung bei mehrachsigen Schwingungen und die
- zeitliche und örtliche Einleitung der Schwingungsanregung in den Schleifprozess.

Für die Charakterisierung der Form der Schwingungsanregung in der Schleifbearbeitung ist vor allem der resultierende Effekt an der Wirkstelle von Bedeutung. Eine Schwingungsanregung bei hoher Frequenz umfasst üblicherweise ein Frequenzspektrum ab rund 15 kHz und höher. Die Anregungsfrequenzen liegen zumeist im Ultraschallbereich, also > 20 kHz. Resultierende Amplituden erreichen dabei eine Größenordnung, die sich üblicherweise deutlich kleiner $25 \mu\text{m}$ bemisst. Bei hohen Frequenzen werden zumeist Resonanzeffekte zur Amplitudenüberhöhung genutzt. Ein Aktuator regt einen schwingfähigen Körper in einer Eigenfrequenz an und die daraus resultierende Schwingbewegung koppelt an der Wirkstelle ein, d.h. die Anregung erfolgt auf indirekte Art.

Der mittlere Frequenzbereich umfasst Schwingungen von 1.000 Hz bis 15 kHz. Die dabei erreichten maximalen Amplituden liegen zumeist in einer Größenordnung $\leq 100 \mu\text{m}$. Der Frequenzbereich der tiefen Schwingungen reicht damit bis 1 kHz, wobei zumeist eine Größenordnung ≤ 250 Hz zum Einsatz kommt. Die dabei erreichbaren Amplituden können Werte bis zu einigen Millimeter annehmen. Hier erfolgt die Art der Anregung häufig durch eine direkte Aktorikwirkung, d.h. der Stellweg ist direkt proportional der Relativbewegung an der Wirkstelle der Schwingung. Die eingesetzten Akto-

ren und Kinematiken ermöglichen eine einachsige beziehungsweise auch mehrachsige Schwingungsbeaufschlagung. Üblicherweise werden elektrische (Tauchspule, Piezo-Elemente, magnetostruktives Prinzip), hydraulische, pneumatische oder rein mechanische (Exzenter, Nocken, etc.) Systeme eingesetzt. Eine Schwingung bei sehr tiefen Frequenzen oder eine Relativbewegung, die durch eine Positionierbewegung von NC-Stellachsen bewerkstelligt wird, sind letztlich nicht als Schwingbewegung im eigentlichen Sinne anzusehen. Es ist dann vielmehr von einer gezielten Achsstellbewegung zu sprechen.

In Abhängigkeit der Frequenz- und Amplitudengrößenordnung einer zu erzielenden Schwingbewegung werden heute vorwiegend elektromechanische Systeme eingesetzt, wodurch eine Bewegungsregelung im geschlossenen Regelkreis möglich ist. Je nach Ausprägung der Schwingung und in Abhängigkeit der Eigenschaften des zu bearbeitenden Werkstoffes bewirkt die Schwingungsunterstützung eine zeitlich veränderliche Eingriffssituation in Bezug auf die Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit sowie auf den Arbeitseingriff der Schneide. Daraus resultieren ein zeitlich veränderliches Auftreten von Prozesskräften und Spannungen im Werkstückwerkstoff (Mikrozerrüttung der Oberfläche bei der Zerspannung von sprödharten Werkstoffen), eine verbesserte Kühlung und Schmierung sowie eine signifikante Beeinflussung der Spanbildung und des Spanbruchs bis zu einem unterbrochenen Schnitt. Es lässt sich damit auch ein vorteilhaftes Austragen von Spänen erzielen.

2. Möglichkeiten der Schwingungsunterstützung

Zahlreiche Forschungsaktivitäten und industrielle Applikationen befassen sich mit der ultraschallunterstützten Schleifbearbeitung (UUS oder ultrasonic assisted grinding - UAG).

2.1 Schwingungsanregung

Bei der UUS wird zwischen der Anregung des Werkzeuges oder des Werkstückes unterschieden (Abbildung 2). Eingeleitet werden die Schwingungen beim UUS zumeist über die Arbeitsspindel oder in einem separaten System im Werkzeughalter [1]. Die Anregung des Werkstückes mit Ultraschall bedingt die Bearbeitung von Werkstücken mit tendenziell kleiner Masse. Die Realisierung der Ultraschallschwingung an einem rotierenden Werkzeug erfordert speziell entwickelte Spindelsysteme, die in den üblichen Ausführungsformen mit piezoelektrischen, magnetostruktiven oder elektromechanischen Aktoren ausgestattet sind. Wird der magnetostruktive Schwinger mit einem Hochfrequenzgenerator verbunden, welcher ein magnetisches Wechselfeld im ferromagnetischen Kern des Schwingers erzeugt, ändert sich die Lage im Rhythmus der Erregungsfrequenz [3]. Nachteilig an dieser Art der Erzeugung ist, dass eine hohe elektrische Leistung nur mit großen Verlusten in Schwingungsleistung umgewandelt werden kann, was in

zahlreichen Versuchen gezeigt wurde [4, 6-8]. Beim piezoelektrischen Effekt wird durch eine elektrische Spannung ein kristalliner Stoff mechanisch verformt. Der Wirkungsgrad bei Frequenzen um 20 kHz liegt dabei über 90% [4, 9]. Mit zunehmender Frequenz sinkt die erzielbare Leistungsdichte durch die Eigenschaften des piezoelektrischen Materials [4, 10]. Somit ist es erstrebenswert, eine möglichst niedrige Betriebsfrequenz zu realisieren. Die Aktorik ist an einen Booster und/oder an eine Sonotrode gekoppelt. Implementiert in einer Hauptspindel erfolgt die rotatorische Lagerung des Spindelrotors über Wälzlager, welche mit erhöhter Dauerfestigkeit ausgelegt sind und an Schwingungsknoten platziert werden. Für eine dynamische Gesamtsystemabstimmung bedarf es auch einer speziellen konstruktiven Ausführung der rotierenden Werkzeuge, um bei einer definierten Anregungsfrequenz die gewünschte Schwingung als Eigenform auszuführen [12].

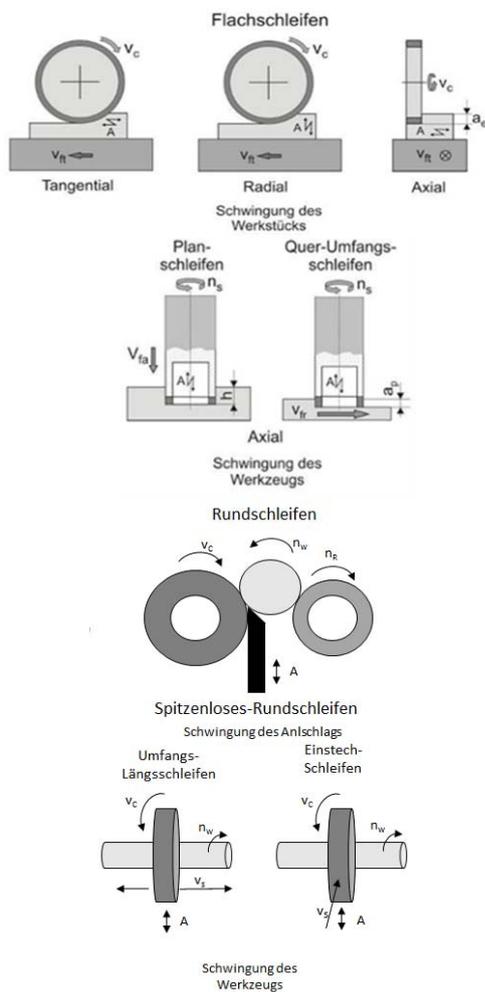


Abbildung 2: Beispiele für die UUS (nach [13])

Diese speziell konstruierten Werkzeuge, die zur Gewährleistung einer effektiven Schwingungsentstehung im Ultraschallbereich eine hohe Steifigkeit aufweisen müssen und zumeist in ihren Dimensionen klein gestaltet

sind, benötigen zur Realisierung einer üblichen Schnittgeschwindigkeit eine sehr hohe Rotationsgeschwindigkeit. Typische Anwendungen liegen dann im Bereich von kleinen Durchmessern mit speziell gestalteten Werkzeugschäften im Quer-Umfangsschleifen. Übliche Ultraschallspindeln weisen zumeist nur eine bevorzugte Resonanzfrequenz bei kleiner Amplitude auf. Demgegenüber zeigt die Schwingungsanregung am Werkstück einige Vorteile. Die Integration der ultraschallunterstützten Zerspanung am Werkstück vermeidet sowohl die Beeinflussung der Lebensdauer der Spindellagerung als auch eine höhere Wärmeentwicklung aufgrund von unvermeidbarer Absorption der Schwingenergie. Bei der Anwendung der Schwingungsunterstützung können zwei unterschiedliche Steuerprinzipien zum Einsatz kommen.

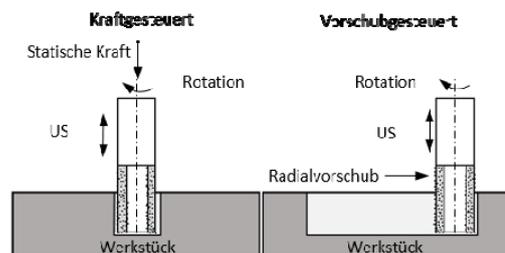


Abbildung 3: Steuerprinzipien der Schleifmaschinen [1]

Die Vorschubbewegung kann dabei, wie in Abbildung 3 dargestellt, kraft- oder geschwindigkeitsgesteuert erfolgen. Bei der Kraftsteuerung ist eine direkte Kopplung von Prozesseffekten mit der Vorschubregelung gegeben. Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass durch die konstruktiven Ausführungsdetails die Anschaffungskosten einer Werkzeugmaschine mit Ultraschallspindel sowie der zugehörigen Werkzeuge signifikant höher sind als jene von konventionellen Systemen.

2.2 Ultraschallunterstütztes Abrichten von Schleifscheiben

Neben der Schwingungseinleitung direkt im Prozess wird teils auch eine nicht primär prozesswirksame Schwingungsunterstützung genutzt. Es kann der Vorgang des Schleifscheibenkonditionierens mit Schwingungsbeaufschlagung erfolgen. Die Schwingung bewirkt beim Abrichten eine modifizierte Prozessfunktion, welche sich sowohl auf den Profilier- als auch auf den Schärfvorgang auswirkt. Der konventionelle Abrichtprozess ergibt zumeist eine glattere Oberfläche an der Schleifscheibe, welche jedoch durch diese Struktur hinsichtlich der Spanbildung eine nicht optimale Topografie aufweist. Grundsätzlich wird beim Abrichten zwischen stehendem und rotierendem Abrichtwerkzeug unterschieden.

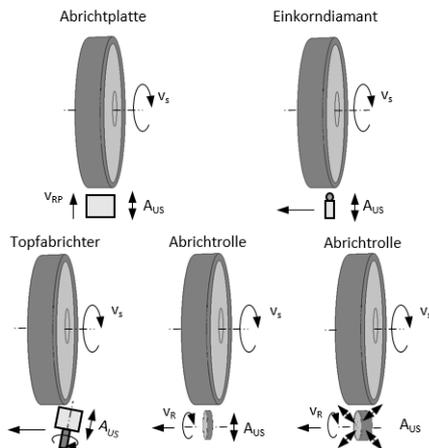


Abbildung 4: Ultraschallunterstütztes Abrichten von CBN-Scheiben [14]

Wie anhand von Abbildung 4 erkennbar, besteht der Unterschied zwischen dem schwingungsunterstützten und dem konventionellen Abrichten in der zusätzlich eingebrachten hochfrequenten Bewegung des Abrichtwerkzeuges. Die Schwingungsamplitude A_{US} beträgt dabei, typisch für die hochfrequente Anregung, nur wenige Mikrometer. Beispielsweise kann durch das US-unterstützte Abrichten von CBN-Scheiben eine signifikant günstigere, initiale Schnittigkeit des Schleifbelages erreicht werden. Dieser Effekt lässt sich durch geringere Schleifkräfte messtechnisch nachweisen. Im Vergleich zu konventionell abgerichteten Scheiben entstehenden beim schwingungsunterstützten Abrichten höhere Rautiefen R_z zufolge der gröberen topografischen Struktur der Schleifscheibenoberfläche. Dieser Effekt ist in vielen Anwendungsfällen vernachlässigbar, da die Vorteile niedrigerer Schleiftemperaturen und hierdurch reduzierter thermischer Schädigungen aufgrund geringerer Schleifkräfte überwiegen [14].

3. Wirkmechanismus der Schwingungsunterstützung

Wirkt die Schwingungsanregung direkt auf den Zerspanungsvorgang ein, resultieren aus der Schneidkorn-Werkstückwerkstoff-Interaktion modifizierte physikalische Randbedingungen für den Zerspanungsvorgang. Gerade die Prozessdynamik des UUS zeigt signifikante Effekte. Aufgrund der durch den Ultraschall erzeugten Änderung der mechanischen Materialeigenschaften duktiler Werkstoffe (Verringerung der Streckgrenze, Festigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen plastische Deformation) wird die Bearbeitung effektiver [15-19]. Für spröde Werkstoffe wurde nachgewiesen, dass die duktile Schleiftiefe aufgrund des Einflusses auf das Werkstoffverhalten im Bereich der oberflächennahen Randzonen erhöht werden kann. Die Martensit-Phasenübergangsrate des Werkstückes (Al_2O_3/ZrO_2) kann durch das Einbringen von Ultraschallschwingungen verringert werden [20, 21]. Eine Einkoppelung der Schwingungen auf das Werkstück ist aus Prozesssicht zu bevorzugen.

3.1 Interaktion von Schneide und Werkstück

In Gleichung 1 bis 3 ist die Beziehung für die Eingriffsbahn einer Einzelschneide auf Basis der Polarkoordinaten für die drei Raumrichtungen dargestellt. Einflussfaktoren sind neben der Zeit t , die Werkstückgeschwindigkeit v_w , der Schleifwerkzeugradius r_s , die Winkelgeschwindigkeit ω_s , die Amplitude der Ultraschallschwingung A_{US} , die Frequenz der Ultraschallschwingung f_{US} und die Phasenverschiebung φ_{US} der Schwingungen bei mehrachsiger Anregung [22].

$$s_x(t) = x(t) = v_w \cdot t - r_s \sin(\omega_s \cdot t) \quad (1)$$

$$s_y(t) = y(t) = r_s \cdot \cos(\omega_s \cdot t) \quad (2)$$

$$s_z(t) = z(t) = A_{US} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{US} \cdot t + \varphi_0) \quad (3)$$

Aufgrund der Trajektorie eines Schleifkornes ist der Korneingriff nicht konstant, sondern zeitlich veränderlich. Es kommt zu einer Überlagerung der einzelnen Schleifkornbahnen, wobei das Folgekorn phasenverschoben der Bahn des vorangegangenen Kornes nachfolgt. Über die Periodendauer der Schwingung und den mittleren Kornabstand lässt sich diese Verschiebung ermitteln [22]. Durch die eingangs erwähnten physikalischen Effekte wird die Interaktion von Schneidkorn und Werkstückwerkstoff günstig beeinflusst. Die Spanbildung findet im Vergleich zur konventionellen Zerspanung im Durchschnitt bei geringeren Schleifkräften statt [2]. Der Hauptmechanismus des Materialabtrags beim Schleifen von sprödharten Werkstoffen beruht zusätzlich auf abrasiven Effekten, wie in Abbildung 5 ausgeführt. Bei der konventionellen Schleifbearbeitung erfolgt der Materialabtrag bzw. der Trennvorgang durch das im Eingriff befindliche Korn infolge von hohen Spannungen und Temperaturen. Es kommt dabei durch das Schleifkorn zu einer plastischen Deformation im umliegenden Werkstückbereich. Überschreitet die Belastung die Festigkeit des Werkstückwerkstoffes kommt es zur Bildung dreier verschiedener Risstypen. Neben radialen und lateralen Rissen entstehen hierbei auch mediane Risse, welche parallel zur Vorschubrichtung verlaufen.

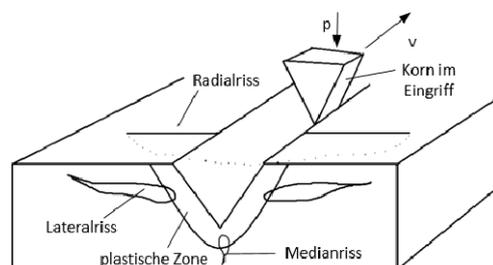


Abbildung 5: Risstypen beim Schleifen [1]

Zudem breiten sich ausgehend von der Zerspannungszone Radialrisse normal zur Vorschubrichtung aus. Diese liegen meist im Kantenbereich zwischen Zerspannungszone und Werkstoffoberfläche. Hauptverant-

wortlich für den Materialabtrag insbesondere in der Schleifbearbeitung von sprödharten Werkstoffen sind laterale Risse. Für die resultierenden Prozesskräfte sind aber auch die Medianrisse von großer Bedeutung, wohingegen radiale Risse einen geringeren Einfluss auf die Reduzierung der Prozesskräfte ausüben [1]. Neben der Abrasion stellen im Falle des Einbringens von US-Schwingungen auch die Extraktion und die Dynamik des Aufschlagens des Werkzeuges Komponenten des Materialabtrags dar. Bei der Extraktion kommt es zu einem Abtrag infolge von Rotation und Schwingung des Schleifkorns (siehe Abbildung 6). Durch das Auftreffen des Diamantkorns auf das Werkstück entstehen zusätzliche mediane und laterale Risse im Material. Das Rissnetzwerk aus Median- und Lateralissen schwächt die Werkstückstruktur und reduziert dadurch die für den Materialabtrag benötigten Prozesskräfte. Aufgrund der geringen Dauer des Einschlags eines Korns werden die mittleren Prozesskräfte nicht erhöht.

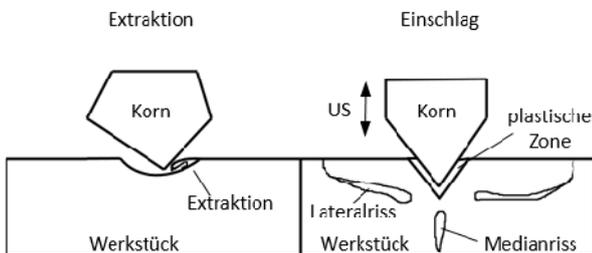


Abbildung 6: Trennmechanismen beim UUS [1]

Die Einschlagkräfte der US-Bewegung in der Korneinflusszone sind jedoch ausreichend für die Rissentstehung [1]. Nach Klocke [5], Daus [25] und Uhlmann [44] hat der Korneinschlag aber auch einen Einfluss auf den Werkzeugverschleiß. Bedingt durch hohe Kräfte beim Einschlag entstehen nicht nur am Werkstück sondern auch im Diamantkorn Risse. Dieser Effekt führt zu einer längeren Schnitfähigkeit durch den Selbstschärfungseffekt des Korns. Eine duktile Zerspanung bei geringer Zustellung ist möglich. Ist die maximale Spandicke geringer als die kritische Spandicke h_c , welche mit dem Elastizitätsmodul E , der Werkstückhärte H und der Bruchzähigkeit K_c mittels Gleichung 4 errechnet werden kann, dominiert die plastische Deformation [23].

$$h_c = 0,15 \cdot (E/H) \cdot (K_c/H)^2 \quad (4)$$

Die maximale Spandicke h_{max} wird nach Gleichung 5 mit dem Vorschub v_f , der Schnittgeschwindigkeit v_s , der Diamantkornkonzentration des Werkzeugs C , der mittleren Spandicke h_m , der radialen Schnitzzustellung a_e und dem Werkzeugdurchmesser d berechnet [22].

$$h_{max} = (4 \cdot v_f / v_s \cdot C \cdot h_m \cdot (a_e / d)^{1/2})^2 \quad (5)$$

Infolge der zuvor genannten Effekte der UUS auf die Prozesskräfte sind dadurch höhere Vorschubgeschwin-

digkeiten und gesteigerte Zeitspanvolumina möglich. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Abtransport der entstehenden Späne und die Temperaturreduktion in der Schleifzone, welche infolge einer verbesserten Kühlschmierstoffzuführung resultiert. Nach Vicario [24] wirkt sich die verbesserte Kühlung bei einer längeren Zerspannungsdauer für Zirkoniumdioxid ZrO_2 und für Mischoxid-Keramiken wie $H_2O_3-ZrO_2$ zudem ebenfalls positiv auf die Prozesskräfte aus. Dieser positive Einfluss wurde bei vorschubgesteuerten Maschinen auch durch verschiedene Versuche von Dans [25], Vicario [24], Ishikama [26] und Klocke [27] aufgezeigt, wobei auch hier ein bedeutender Einfluss der Prozessparameter auf die Reduktion der Prozesskräfte festgestellt wurde.

3.2 Ritzversuch

Um den Einfluss des Ultraschalls auf den Korneingriff zu untersuchen, wurde in [28] ein Mehrkorn-Ritzversuch mit Diamantkörnern durchgeführt. Dazu wurde ein Segment eines Schleifbelages präpariert und dieses am Umgang eines Schwungradwerkzeuges angeordnet. Abbildung 7 zeigt das Versuchswerkzeug mit der präparierten Schneidkorngemetrie. Im Gegensatz zum Einkorn-Ritzversuch war es somit möglich, ein realitätsnahes Korneingriffsverhalten und die Wechselwirkung zwischen mehreren Einzelkörnern zu untersuchen. Der durchgeführte Bewegungsablauf und die Abmessung des Werkzeugs und des Werkstücks sind aus Abbildung 8 zu entnehmen. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 9 dargestellt.

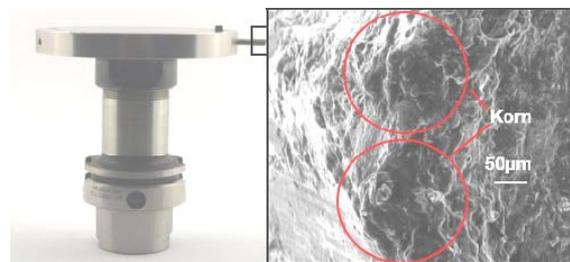


Abbildung 7: Aufbau des Versuchswerkzeugs für den Ritzversuch [28]

Wie in Abbildung 9 gezeigt, wurde das Werkstück durch eine in der Längsachse des Aktuators schwingende Werkstückaufnahme in Bewegung versetzt (Schwingung in Richtung der Werkstückauflage).

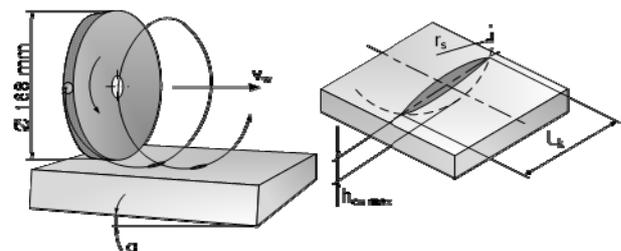


Abbildung 8: Prinzipskizze des Versuchsablaufs [28]

Das Werkzeug rotiert und verfährt in Richtung der Z-Achse der Versuchsmaschine, einem Bearbeitungszentrum Hermle C20U. Bei einer gewählten Frequenz von 11,5 kHz wurde für das dargestellte System eine Amplitude von 8,9 μm erreicht. Die Schwingungsbewegung wurde dabei durch die Werkstückaufnahme unter Einsatz von Piezoaktoren und einer Sonotrode erzeugt. Um die über die Massenkonfiguration von Sonotrode und Werkstück veränderliche Lage des Schwingungsknotens einer Longitudinalschwingung zu kompensieren, wurde das schwingende System über eine Membrane mit dem Gehäuse verbunden.



Abbildung 9: Aufbau des Ritzversuchs [28]

Der Mehrkorn-Ritzversuch wurde ohne Kühlschmierstoff mit dem Werkstückwerkstoff SiSiC durchgeführt. In Tabelle 1 sind die Versuchsparameter angeführt.

Tabelle 1: Versuchsparameter Ritzversuch

Parameter	Ritzversuch
Werkzeugaradius r_s	84 mm
Drehzahl n	250 U/min
Schnittgeschwindigkeit v_c	2,2 m/s
Frequenz	11,5 kHz
Schneidkorn	D126

Wie aus Abbildung 8 ersichtlich, ist das Werkstück mit dem Winkel α angestellt. Hierdurch wird für den Ritzversuch eine veränderliche Zustellung pro Werkzeugumdrehung erreicht. An dem erzeugten Ritzprofil wurde die Eingriffslänge L_K gemessen und $h_{cu,max}$ aus der im Vorfeld erläuterten Gleichung für die maximale Spandicke errechnet. Die entstehende Bearbeitungsspur wurde mit Hilfe eines optischen Messgerätes auf Basis der Fokusvariation (IFM Alicona) vermessen und ein Höhenprofil des Ritzgrundes erstellt. Ein typisches Versuchsergebnis ist in Abbildung 10 dargestellt. Für die dem Versuch zugrunde liegenden Parameter ergibt sich mit einer Frequenz von 11,5 kHz eine Periodenlänge von ca. 190 μm . Bei einer Eingriffslänge $L_K \sim 1,00$ mm folgt aus der obigen Gleichung für h_{max} der Wert von 1,5 μm . Der vorliegende Profilverlauf zeigt, dass die Schwingungsanregung zwischen Werkzeug und Werkstück mit der Periodenlänge von ca. 190 μm in die SiSiC-Probe einkoppelt und sich im Ritzgrund abzeichnet.

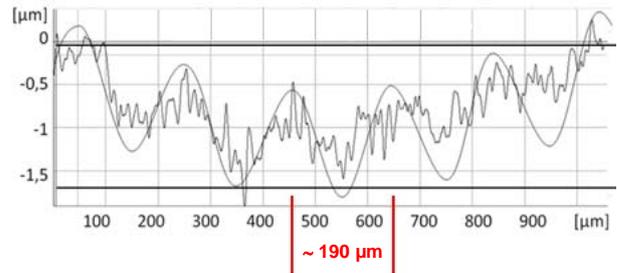


Abbildung 10: Profil des Ritzgrundes

In einem weiteren Versuch mit modifizierter Aufspannung und Werkstückmasse wurde mit einer Frequenz von 19,3 kHz angeregt und die resultierenden Ritz-Spuren durch REM-Aufnahmen verglichen (siehe Abbildung 11).

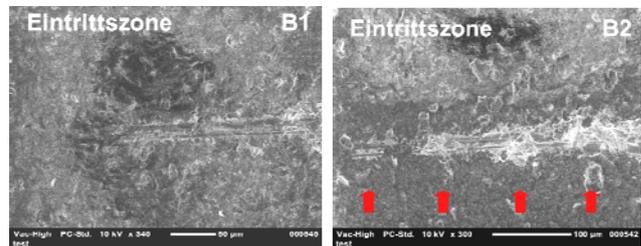


Abbildung 11: Bearbeitung von NBK-7, Oberflächenvergleich ohne (links) und mit Schwingungsanregung (rechts)

Ohne Schwingungsanregung ist der Ritzkanal mit Ausnahme des Anfangsbereichs scharf abgegrenzt und ohne großen Materialabtrag ausgeführt. Wird das System mit der Frequenz von 19,3 kHz angeregt, ist der Werkzeugeingriff mit einer Periodenlänge $T_{19,3\text{kHz}} = 113$ μm erkennbar. Die Schwingungsanregung bewirkt eine signifikante Beeinflussung des Materialabtragverhaltens. Die REM-Abbildung zeigt lokal ausgeprägte Mikrorisse im Werkstückwerkstoff NBK-7.

3.3 Koppelungswirkung zwischen Werkzeug und Werkstück

Wie in Abschnitt 3.2 gezeigt werden konnte, koppelt die Schwingbewegung in den Werkstückwerkstoff ein und bewirkt eine Veränderung des Zerspanungsvorgangs. Die im Ritzversuch eingesetzte Versuchsanordnung basiert auf einem Piezoaktuator mit Sonotrode. Dieser führt eine indirekte Schwingungsanregung am Testwerkstück aus, indem der Aktuatorhub über die Resonanzwirkung auf das Werkstück übertragen wird. Es ist daher davon auszugehen, dass, wie anhand von Abbildung 12 verdeutlicht, für das dynamische Prozessverhalten die Struktureigenschaften des Gesamtsystems von bestimmender Bedeutung sind. Demgemäß wirkt sich der Zerspanungsvorgang selbst auf das dynamische Verhalten aus. Das Gesamtsystem (Abbildung 12 rechts) lässt sich aus dem Zusammenspiel einzelner Teilsysteme beschreiben. Der Aufbau besteht aus der Maschine (Index M), der Werkzeugaufnahme (A), der Werkzeugklem-

mung (T), dem Werkzeugeingriff (E) und der Werkstückaufnahme (V). Das Teilsystem des Werkzeugeingriffs ist mit einer äquivalenten Dämpfung D_E und der Steifigkeit des Kontaktes K_E beschreibbar.

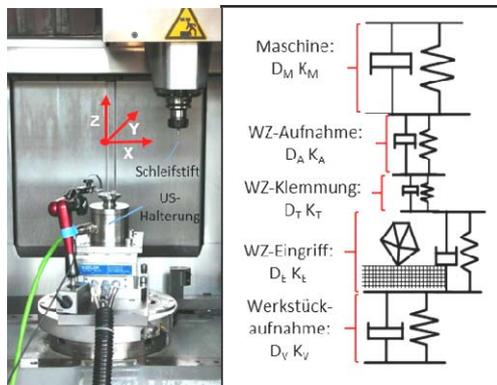


Abbildung 12: Versuchsaufbau (links) und Feder-/Dämpfermodell (rechts) des Gesamtsystems

Um den Einfluss des Zerspanungsprozesses selbst auf die Wirkung der Schwingungsanregung ermitteln zu können, wurden Zerspanungsversuche bei unterschiedlichen Eingriffsbedingungen durchgeführt. Die Versuche dienten der Ermittlung des Schwingungseinflusses auf die Z-Prozesskraft beim Quer-Umfangsschleifen und der Quantifizierung des Schleifstiftverschleißes. Durch den Eingriff des Schleifstiftes kommt es zur mechanischen Einkoppelung an das Werkzeug. Mit der Funktion $D_E = f(Q_W)$ kann die resultierende Dämpfung des Werkzeugeingriffs in Abhängigkeit des Zeitspanvolumens beschrieben werden. Die Dämpfung ist damit von den Eingriffsgrößen a_e und a_p abhängig. Der Resonanzeffekt in der Sonotrode kann durch die Kontaktdämpfung im Eingriff bei zu großen Schnittkräften getilgt werden. Bedingt durch den konstruktiven Aufbau des Aktuators (Sonotrode verbunden mit Gehäuse durch Membrane) kann die Amplitude der Ultraschallschwingung am Werkstück auch geringer als der Hub des Piezoaktuator ausfallen. In der folgenden Tabelle sind die Versuchsparmeter zusammengestellt.

Tabelle 2: Versuchsparmeter der Grundlagenversuche in SiSiC

Versuch	Parameter	a_e [mm]	a_p [mm]
Versuch 1 (Einkopplungsverhalten) ohne KSS, Hermle C20	$n = 8000$ U/min $v_c = 2,2$ m/min, $v_w = 400$ mm/min $A_{US} = 2,8$ μ m $f_{US} = 17,63$ kHz Schleiflänge 30 mm	1,25 - 2,75	0,01 - 0,04
Versuch 2 (Zerspanungsversuch) mit KSS, Hermle C20	$n = 8000$ U/min $v_c = 138$ m/min, $v_w = 400$ mm/min $A_{US} = 0-3$ μ m $f_{US} = 18,3$ kHz, 20,8 kHz Schleiflänge 50 mm	2, 4, 5,5	0,005 - 0,020

Beim Versuch 1 wurden verschiedene Zustellungskombinationen von a_p und a_e ausgeführt. Beim Versuch 2 ist jeweils eine Vollnut geschliffen worden. Es wurden Werkzeuge mit Durchmesser 2 mm, 4 mm und 5,5 mm verwendet. Als Standzeitkriterium wurde beim Versuch 2 die Vorschubkraft herangezogen. Die Ergebnisse des Einkoppelungsversuchs sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Die Amplitude für konstantes $a_e = 2,25$ mm liegt bei einem Anfangswert von $a_p = 0,01$ mm bei ca. $A_{US} = 2,3$ μ m. Wird a_p weiter gesteigert, sinkt die Amplitude stetig auf einen Minimalwert von ca. 0,5 μ m. Eine ähnliche Tendenz zeigt sich bei konstantem $a_p = 0,02$ mm, der minimale Amplitudenwert liegt bei ca. $A_{US} = 0,55$ μ m.

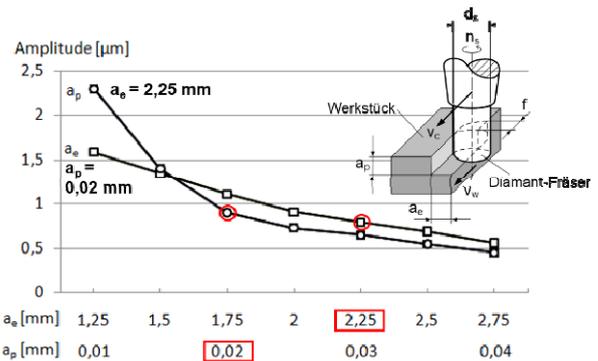


Abbildung 13: Einkopplungsverhalten in Abhängigkeit der Eingriffsgrößen a_e und a_p für SiSiC

Bei den oben dargestellten Amplitudenwerten wurde auch die bei der Zerspanung entstehende Prozesskraft F_Z gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 zusammengefasst. Ohne Schwingungsunterstützung steigt die Prozesskraft F_Z von ca. 29 N bei $a_p = 5$ μ m mit Steigerung von a_p kontinuierlich an. Bei $a_p = 20$ μ m liegt die Kraftkomponente von F_Z bei 50 N.

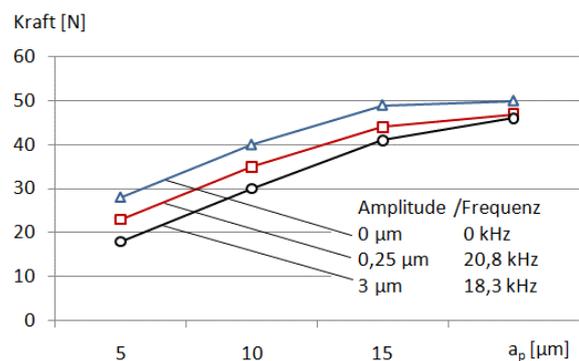


Abbildung 14: Einfluss der Schwingungsanregung auf die Prozesskraft in Z-Achsrichtung bei der Zerspanung in SiSiC

Wird der Schleifprozess mit einer Schwingungsanregung beaufschlagt, sinkt die Prozesskraft vor allem bei kleinen a_p -Werten signifikant. Bei einer Frequenz von 20,8 kHz und der zugeordneten Amplitude von 0,25 μ m wird F_Z um ca. 5 N reduziert. Wird die Amplitude A_{US} auf 3 μ m bei 18,3 kHz erhöht, sinkt die Kraft F_Z um

weitere 5 N und damit im Vergleich zur Zerspanung ohne Schwingungsbeaufschlagung um ca. 35 %. Bei steigendem a_p von 10 μm , 15 μm und 20 μm reduziert sich dieser Effekt sukzessive auf ca. 4 N. Die Auswirkung der Schwingung auf die Kraftkomponente F_z ist bei einer maximalen Zustellung von $a_p = 20 \mu\text{m}$ und der entsprechenden Reduktion der Schwingungsamplitude nur noch in der Größenordnung von 10 % zu bemessen.

Betrachtet man anhand von Abbildung 15 den Werkzeugverschleiß und analysiert das Verschleißvolumen V_s am Werkzeug in Abhängigkeit des zerspannten Werkstoffvolumens V_w wird der Einfluss der Schwingung deutlich. Ohne Schwingungsanregung (blaue Kurve) verschleißt der Schleifstift mit 2mm Durchmesser bei $a_p = 0,20 \mu\text{m}$ deutlich schneller als mit Schwingungsunterstützung (rote Kurve). Der G-Faktor in der Schleifbearbeitung von SiSiC liegt ohne Schwingungsanregung bei ca. 2.100 und steigt mit der Schwingungsanregung signifikant an.

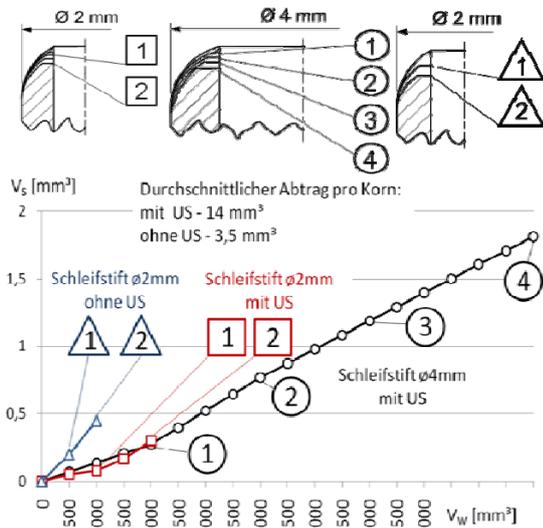


Abbildung 15: Verschleißverhalten in Abhängigkeit der Schwingungseinbringung

Für den Schleifstift mit 4 mm Durchmesser steigt V_s mit größer werdendem V_w kontinuierlich mit linearer Charakteristik an. Mit Schwingungsunterstützung wird ein G-Faktor von über 6.100 erreicht. In Abbildung 15 ist der Werkzeugverschleiß der verschiedenen Schleifstifte dargestellt. Den Verschleißzustand des Schleifkorns zeigen die REM-Aufnahmen in Abbildung 16.

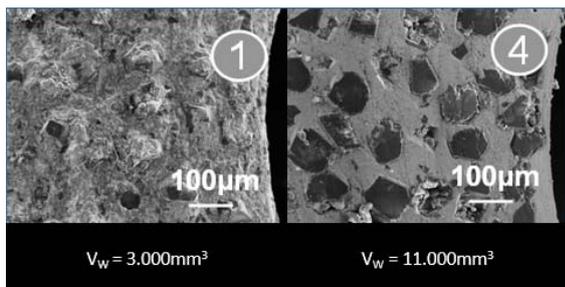


Abbildung 16: REM-Analyse bei $V_w = 3.000 \text{ mm}^3$ (links) und 11.000 mm^3 (rechts)

Ein deutlicher Verschleißunterschied zwischen der Position 1 nach ca. $V_w = 3.000 \text{ mm}^3$ (links) und dem Endzustand in Position 4 nach 11.000 mm^3 im rechten Bildteil geht aus der Abbildung hervor. Der rechnerisch durchschnittliche Materialabtrag pro Korn beträgt ohne Schwingungsunterstützung $3,5 \text{ mm}^3$ und mit Schwingungsunterstützung ca. 14 mm^3 .

Wie die oben dargestellten Versuche zeigen, können bei der Schwingungsunterstützung im Schleifprozess zumindest in der Bearbeitung von sprödharten Werkstoffen Effekte nachgewiesen werden, die einen Zusammenhang zwischen Schwingungsanregung und Beeinflussung des Schleifprozesses herstellen.

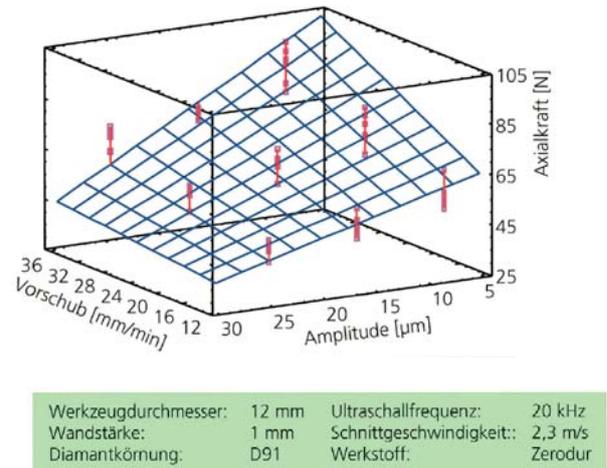


Abbildung 17: Auswirkung der Prozessparameter Vorschub und Amplitude auf die Axialkraft [29]

Der positive Effekt von großen Schwingungsamplituden auf die resultierenden Schnittkräfte in der Schleifbearbeitung von Zerodur wird in [5] bestätigt. Abbildung 17 zeigt, dass große Amplituden zu geringen Axialkräften beim Schleifen mit US-Anregung führen.

4. Schleifmaschinen mit Schwingungsanregung

Grundsätzlich werden beim schwingungsunterstützten Schleifen die Schleifverfahren über die örtliche Einkopplung der Schwingungsanregung unterschieden. Die Schwingungsanregung des Prozesses kann infolge der Interaktion zwischen Werkzeug und Werkstück grundsätzlich auf beiden Systemseiten eingebracht werden. Die folgende Abbildung 18 zeigt die vorliegenden Möglichkeiten der Schwingungsanregung in einer Übersicht.

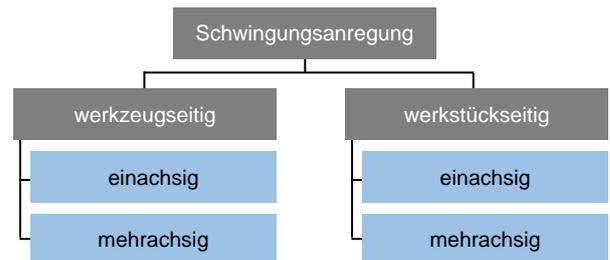


Abbildung 18: Einteilung der Schwingungsanregung

Ein Nachteil bei der Anregung des Werkstückes ist die Inflexibilität bei sich verändernder Werkstückform. In einem solchen Fall muss die Schwingung entsprechend angepasst werden. Zudem ist als Nachteil zu nennen, dass sich bei großvolumigen Werkstücken eine gleichmäßige Anregung des Werkstückes durch den fehlenden homogenen Resonanzeffekt schwierig gestaltet [29].

4.1 Schwingungsanregung am Werkzeug

Bei Schleifmaschinen werden verschiedenste aktive Systeme zur Prozessverbesserung durch hochfrequente Schwingungen eingesetzt. So ist bei Flachsleifmaschinen beispielsweise eine adaptronische Strebe zur Kompensation der statischen und dynamischen Nachgiebigkeit der Maschine in Verwendung [30]. Ein weiteres Beispiel ist eine redundante Achse für Spitzenlos-Sleifmaschinen. Für beide Systeme beruht das Regelkonzept auf dem Prinzip der Erzeugung von Gegenverlagerungen zur vorliegenden Schwingung [6]. Diese Einrichtungen könnten auch zur aktiven Schwingungsanregung eingesetzt werden. Für Rundschleifmaschinen entwickelte Michels zwei Systeme. Zum einen eine werkzeugeitige aktive Schleifspindellagerung und zum anderen auf der Werkzeugeite das System der aktiven Zentrierspitze. Bei beiden Systemen finden Piezoaktoren Verwendung [31]. Die Integration der US-Schwingungen ist für viele gängige Schleifverfahren möglich. Dazu zählt neben dem Flachsleifen auch das Plan- und Quer-Umfangsschleifen [13, 30].

Eine zentrale Möglichkeit der Schwingungsanregung besteht darin, die Anregung über die Hauptspindel einzubringen. Neben der axialen Schwingbewegung sind bei entsprechender Ausführung der Spindellagerung beispielsweise über eine Magnetlagerung auch radiale Schwingungen bzw. eine Kombination aus radialer und axialer Bewegung für eine mehrachsige Schwingung realisierbar. Für die axiale Einbringung einer Schwingung ist der in Abbildung 19 gezeigte prinzipielle Aufbau entwickelt worden.

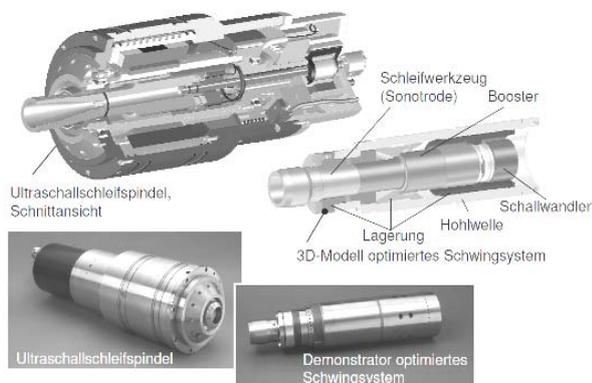


Abbildung 19: 3D-Prinzipmodell eines Schwingensystems in einer Motorspindel [30]

Das Schwingensystem besteht aus einer Spindelleinheit mit einem piezoelektrischen Schallwandler, einem Booster, der Sonotrode, der Hohlwelle und der benötigten

Lagerung der Komponenten des rotierenden Systems. Die Schwingungen werden über die Sonotrode an das Schleifwerkzeug weitergegeben. Sämtliche Bauteile des Schwingensystems sind für dieselbe Eigenfrequenz ausgelegt, um einen bestmöglichen Resonanzeffekt zu erzielen. Bei dem angestrebten Eigenmode handelt es sich um eine Longitudinal-Schwingung, bei der sich eine stehende Longitudinalwelle (Schwingung in Z-Richtung) mit fixen Knotenpunkten der Schwingung ausprägt. In diesen Knotenpunkten erfolgt die Anbindung an die Spindellagerung [32]. Eine Spindelleinheit, die in einer ähnlichen Lösung realisiert wurde, ist in Abbildung 20 gezeigt. Die Maschine der Firma DAMA verwendet fixe Frequenzen bei 20 kHz oder 35 kHz.

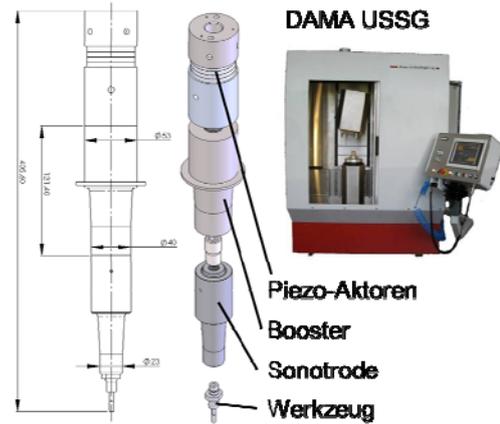


Abbildung 20: Ultraschallanregung über einen in der Hauptspindel integrierten Aktuator [33]

Als alternative Lösung zur Schwingungsanregung im Spindelrotor gilt die Schwingungsanregung über eine aktive Werkzeugaufnahme (siehe Abbildung 21 und Abbildung 22).

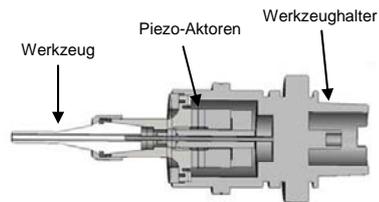


Abbildung 21: Ultraschallanregung über einen im Werkzeugsystem integrierten Aktuator [28]

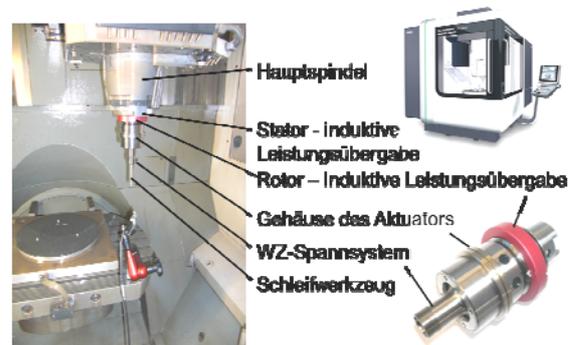


Abbildung 22: Ultraschallanregung über einen im Werkzeugsystem integrierten Aktuator [28]

Der Aktuator ist dabei in der Werkzeugaufnahme integriert. Das Grundprinzip entspricht jenem der Aktuator-Integration in der Hauptspindel. Es werden scheibenförmige Piezoaktoren zur Anregung der Schwingung in einer Sonotrode eingesetzt. Abbildung 21 zeigt eine Schnittdarstellung der Werkzeugaufnahme. Die dargestellte Anregungseinrichtung, die in einer Werkzeugaufnahme des Typs HSK-63 integriert ist, wird beispielsweise in der Maschine Gildemeister Ultrasonic 70 linear mit einer induktiven Leistungsübertragung eingesetzt (siehe Abbildung 22).

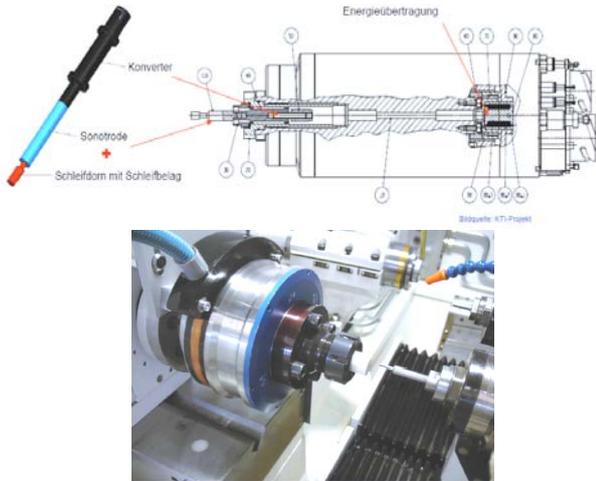


Abbildung 23: Ultraschallunterstützte Bearbeitung - Anregung an der Hauptspindel [34, 35]

Eine einachsige Schwingung liegt auch einem Konzept der Firma Studer zur Schwingungsanregung in der Rundschleifbearbeitung zugrunde. Hierbei wurde eine Hauptspindel der Firma Fischer mit einer Sonotrode ausgestattet. Abbildung 23 zeigt die Spindellösung und deren Integration in der Maschine. Diese Spindel bietet einen Drehzahlbereich bis zu 60.000 U/min und eine Schwingungsanregung bis zu 70 kHz.

Die Möglichkeit zu einer mehrachsigen Schwingungsanregung resultiert aus dem Einsatz einer magnetgelagerten Spindel. Der Rotor der Spindel schwebt dabei frei im Raum und wird von radialen und axialen magnetischen Lagerkräften gehalten. Durch die Steuerung der einzelnen Magnetlager lässt sich der Rotor innerhalb der mechanischen Fanglager in jeweils drei Raumrichtungen bewegen. Abbildung 24 zeigt schematisch die möglichen Freiheitsgrade (Verlagerungen) und Funktionen des Rotors (der Spindelachse), die bei konventionell gelagerten Spindeln in dieser Art nicht zu realisieren sind. Die speziellen Möglichkeiten, die durch einen magnetgelagerten Rotor eröffnet werden, umfassen eine axiale und eine radiale Oszillation bzw. ein Taumeln. Weiters ist eine kombinierte axiale und radiale Oszillation möglich, womit eine bis zu dreiaxige Schwingbewegung auf das Werkzeug übertragen werden kann. Die mehrachsige Schwingungsüberlagerung führt auch zu einer ständigen Änderung der Eingriffsrichtung des Schneidkorns.

Bei der axialen Oszillation der Spindelachse können

Amplitude und Frequenz im physikalisch möglichen Bereich variiert werden. Die maximale Amplitude ist bedingt durch die zu bewegende Masse von der Frequenz abhängig (siehe Abbildung 26).

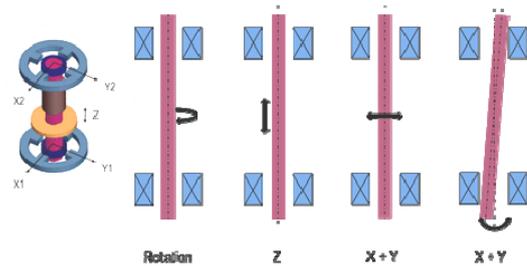


Abbildung 24: Mögliche Verlagerungen der Spindelachse bei magnetgelagerten Spindeln [22]

In Abbildung 25 ist eine CNC-Fräsmaschine der Fa. Müga GmbH gezeigt, welche mit einer Spindel dieser Bauart ausgestattet wurde. Das hierbei eingesetzte System des Typs LeviSpin 700 der Fa. Levitec GmbH hat eine Leistung von 15 kW und eine maximale Drehzahl von 42.000 U/min. Die relativ große Spindel kann bis zu einer Frequenz von 700 Hz oszillieren.



Abbildung 25: Bearbeitungsmaschine mit Arbeitsraum und integrierter magnetgelagerter Spindel [22]

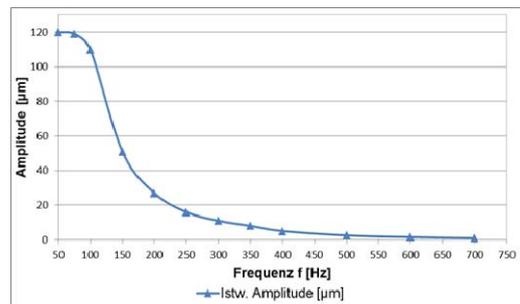


Abbildung 26: Zusammenhang von Amplitude und Frequenz - Magnetlagerspindel LeviSpin 700 [22]

Demnach stellt sich eine maximale Amplitude von 120 µm bei 75 Hz ein. Bei 700 Hz wird noch eine Amplitude von 0,9 µm erreicht. Als Werkzeug kommen übliche Schleifstifte zum Einsatz und es können Innenflächen, Bohrungen sowie Außenflächen bzw. Radien bearbeitet werden. Für die höheren Schnittgeschwindig-

keiten wurde in [22] ein spezielles CBN-Schleifwerkzeug mit CFK-Körper konzipiert.

4.2 Schwingungsanregung am Werkstück

Alternativ zur Anregung über das Werkzeug kann eine Schwingungseinleitung auch auf der Werkstückseite erfolgen. Wie die Abbildung 18 zeigt, kann die Schwingungsanregung entweder einachsiger oder mehrachsiger ausgeführt werden. In der Abbildung 27 ist ein Versuchsaufbau mit einer in der Werkstückaufnahme integrierten Aktuatorik zur einachsigen Anregung mit Ultraschallschwingungen gezeigt.

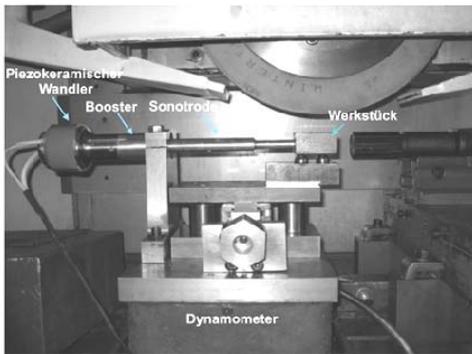


Abbildung 27: Versuchsaufbau für das Ultraschallschleifen (aus [14])

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Ultraschallgenerator, der hochfrequente elektrische Impulse zur Ansteuerung von Piezo-Aktoren generiert. Durch den piezoelektrischen Effekt im Aktuator werden mechanische Schwingungen mit einer Frequenz von 21 kHz generiert. Die Schwingungsanregung wird zuerst durch den Booster und dann durch die Sonotrode verstärkt und auf das Werkstück übertragen. Hieraus resultiert eine Schwingung des Werkstücks bei einer Amplitude von 10 µm bis 25 µm und einer Frequenz von etwa 21 kHz. Bei den in [36] beschriebenen Versuchen zum ultraschallunterstützten Schleifen wurde ein Ultraschallgenerator Mastersonic MSG.1200.IX mit 1200 W Leistung und mit Frequenzstufen von 17 kHz bis 47 kHz eingesetzt. Die Schwingungseinleitung kann in Vorschubrichtung und auch senkrecht dazu erfolgen. Chen, Tang und Zhou zeigen in [36] eine ähnliche Versuchseinrichtung.

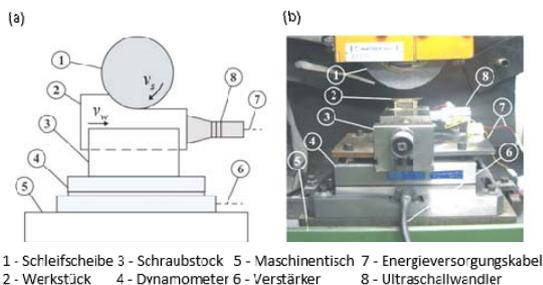


Abbildung 28: Versuchsaufbau für das Tiefschleifen von Inconel 738 LC [37]

Eine Vorrichtung mit einem Piezo-Schallwandler und einer Blocksonotrode mit Halterungsfüßen zeigt [38]. Bei der Blocksonotrode handelt es sich um eine Plattform mit zahlreichen Bohrungen. Durch diese Gestaltung entsteht ein Multi-Resonanzverhalten in der Blocksonotrode.

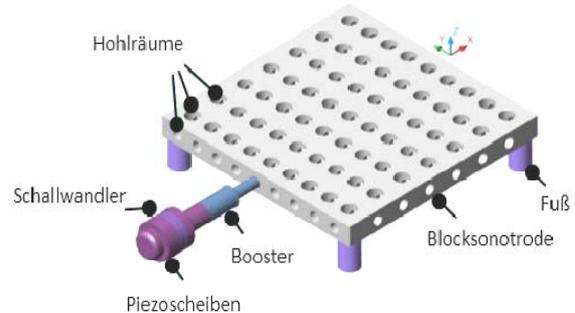


Abbildung 29: Prinzip-Skizze zur werkstückseitigen Ultraschallanregung [38]

An der in Abbildung 29 gezeigten Vorrichtung stellt sich eine Schwingung ein, die durch den Wandler eine Verstärkung im Booster und der Sonotrode erfährt. Die Blocksonotrode überträgt die Schwingung auf das an ihr aufgebrauchte Werkstück (vorzugsweise Longitudinalschwingungen). Um den Schwingungsverlust möglichst gering zu halten, sollten die einzelnen Bestandteile der im Kraftfluss befindlichen Komponenten die gleiche Resonanzfrequenz aufweisen. Das Erreichen einer Longitudinalschwingung bei der gewünschten Resonanzfrequenz bedingt eine dimensionale Gestaltung, bei der die Länge des Schallwandlers und des Boosters der halben Länge der Blocksonotrode entspricht.

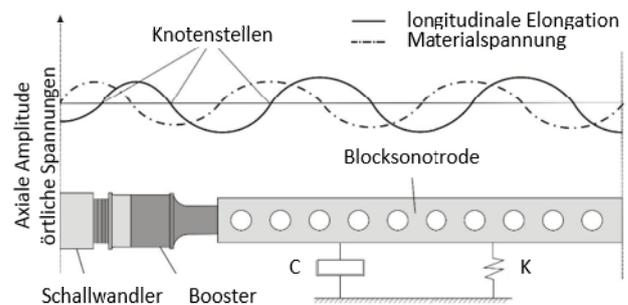


Abbildung 30: Schwingungskette mit Spannungs- und Amplitudenverlauf [38]

Die Blocksonotrode kann als Feder-Dämpfersystem mit der Federsteifigkeit K und der Dämpfung C betrachtet werden (siehe Abbildung 30).

Neben der Schwingungsanregung in Vorschubrichtung erfolgt mit der in Abbildung 30 gezeigten Versuchseinrichtung die Anregung quer zur Vorschubrichtung [36]. Auch bei diesem Aufbau erfolgt die Anregung über einen Piezoaktuator mit einem Booster und einer Sonotrode. Die erreichte Frequenz am Testwerkstück liegt bei 20 kHz und einer Amplitude von bis zu 10 µm.

In der Abbildung 31 ist eine Implementierung an einer Versuchsmaschine für das Flachschleifen Hangzhou Dese M7132H dargestellt.

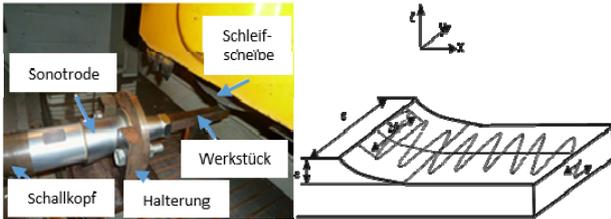


Abbildung 31: Versuchseinrichtung für das ultraschallunterstützte Schleifen mit einer Anregung quer zur Vorschubrichtung [36]

Weiterführend zur einachsigen Anregung sind auch Systeme für die zweiachsige Schwingungseinleitung bekannt. Abbildung 32 zeigt eine experimentelle Anordnung für eine kombinierte Schwingbewegung in zwei Achsrichtungen. Hieraus resultiert beispielsweise eine elliptische Bewegung (EUAG). Für das Erreichen hoher Frequenzen wird auch hier ein Piezoaktuator eingesetzt. Eine elliptische Bewegung wird erreicht, indem zwei alternierende Spannungen auf die Piezos aufgeschaltet werden, welche die gleiche Frequenz f bei einer definierten Phasenverschiebung aufweisen. Diese Frequenz wird in [39] nahe an der Resonanzfrequenz der ersten Longitudinal-Schwingungsform und der zweiten Biegeschwingungsform gewählt. Die resultierende kinematische Bewegung der Werkstückaufnahme erfolgt in der Y-/Z-Ebene.

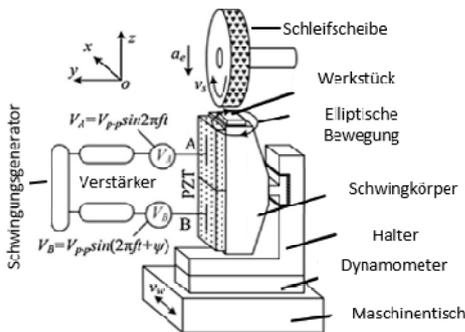


Abbildung 32: Versuchseinrichtung für das Ultraschall-unterstützte Schleifen mit einer Anregung in der Y- und Z-Achse [39]

In [40] wird ein in Abbildung 33 dargestellter Ultraschall-Vibrationsschuh für eine zweiachsige Schwingbewegung vorgestellt. Es können damit Werkstücke auf einer Flachschleifmaschine spitzenlos geschliffen werden, indem eine Vorrichtung auf der Basis eines piezoaktivierten Stellsystems am Maschinentisch aufgebaut wird. Der Aktuator besteht aus einem Edelstahlgrundkörper mit zwei Bimorph-Piezo-Translatoren. Eine Wechselspannung, mit der jeweils phasenverschoben die beiden Piezos angesteuert werden, versetzt die Werkstückauflage in Längs- und Biegeschwingungen. Abhän-

gig von Phasenverschiebung und Größenordnung der Frequenz führt die Frontfläche des Schuhs eine elliptische Bewegung aus. Der Werkstückvortrieb wird durch die elliptische Bewegung bestimmt. Die Zustellung kann durch die Tischbewegung realisiert werden. Das Werkstück wird quasi-tangential zur Schleifscheibe geführt und durchläuft dabei unterschiedliche geometrische Schleifspalteinrichtungen.

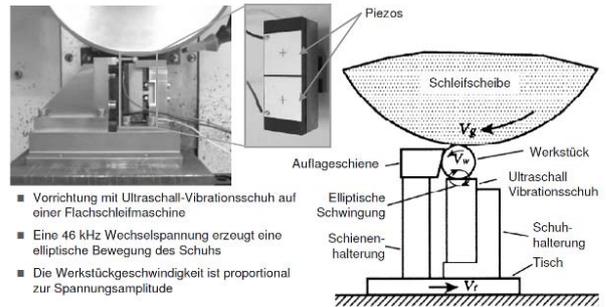


Abbildung 33: Adaptronische Vibrations-einrichtung zum Spitzenlos-Schleifen auf konventionellen Flachschleifmaschinen [40]

Ein Systemaufbau, der im Vergleich zu den genannten technischen Lösungen deutlich unterschiedlich ausgeführt ist und ein Schwingungssystem für tiefe Frequenzen und größere Amplituden darstellt, wird in [28] vorgestellt. Diese Vorrichtung ist für die Schleifbearbeitung mit mehrachsiger Schwingungsanregung konzipiert und besteht aus einem Grundkörper mit den Außenabmessungen von 460 mm x 460 mm x 120 mm, in welchem die Aktoren und die Kinematik integriert sind. Das Gesamtsystem kann durch die kompakte Ausführung auf dem Maschinentisch einer Bearbeitungsmaschine aufgesetzt werden. Auf der Gehäuseoberseite ist eine Plattform angeordnet, die in der Längs- und Querachse bewegt werden kann (z.B. in Richtung der X- und Y-Achse der Maschine angeordnet). Die zyklischen Bewegungen der Schwingplattform werden je Schwingrichtung über zwei Piezo-Stacks mit jeweils vier, parallel angeordneten Piezo-Aktoren erzeugt. In Summe kommen 32 Piezo-Aktoren zum Einsatz, mit denen neben der Bewegung der Plattform auch die Schwingbewegung einer Kompensationsmasse realisiert wird.

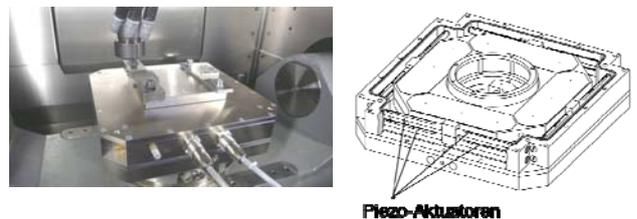


Abbildung 34: Plattform zur Anregung mit Schwingungen in einer oder zwei Achsen [28]

Die Schwingbewegung der Kompensationsmasse gleicht dabei Effekte aus der Massenträgheit des Werkstückes und der Werkstückplattform aus. Dieser Kom-

pendationsmechanismus arbeitet in einem geschlossenen Regelkreis mit einem mehrachsigen Schwingungssensor und regelt damit die erforderlichen Beschleunigungen der Kompensationsachsen aus. Durch die serielle Anordnung von jeweils zwei Piezo-Stacks je Bewegungsachse können verhältnismäßig große Hübe erzielt werden. Die Amplitude liegt bei bis zu $25 \mu\text{m}$ und der Frequenzbereich reicht bis zu 400 Hz.

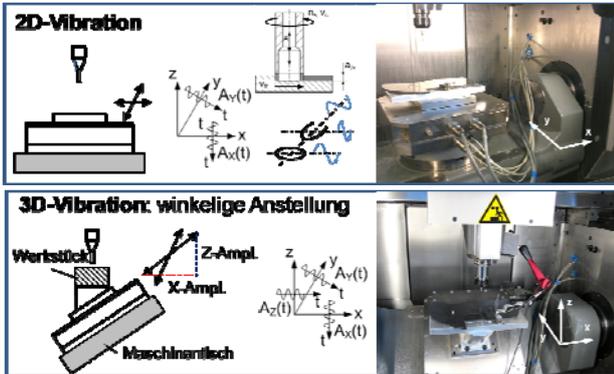


Abbildung 35: Plattform zur Anregung mit ein- bis dreiachsigen Schwingungen im niedrigen Frequenzbereich [28]

Wird diese Vorrichtung auf dem Maschinentisch aufgebaut, eröffnet dies also eine Schwingungsanregung eines Testwerkstückes in zwei Achsen der Bearbeitungsmaschine. Dabei können die Frequenzen wie auch die Phasenverschiebung beliebig gestellt werden. Beispielsweise resultiert aus einer Verdoppelung der Frequenz einer Achse (in Relation zur Frequenz der zweiten Achse) eine U-förmige Schwingbewegung. Stellt man, wie im unteren Teilbild der Abbildung 35 dargestellt, die Schwingungseinrichtung unter einem definierten Winkel an, kann in Bezug auf das Koordinatensystem der Schleifmaschine auch eine dreidimensionale Schwingbewegung realisiert werden. Speziell beim Quer-Umfangsschleifen bietet diese Schwingungsanregung wesentliche Vorteile, zumal der Werkzeug-Werkstück-Kontakt prozessspezifisch modifiziert werden kann (geometrisch und zeitlich).

5. Ergebnisse experimenteller Untersuchungen

Wie anhand von Kapitel 4 dargestellt, steht grundsätzlich eine Reihe von unterschiedlichen Vorrichtungen für die Schwingungsanregung in Schleifprozessen zur Verfügung. Als Hauptanforderung an diese Systeme ist die Gewährleistung eines zuverlässigen Dauerbetriebs zu nennen. Heute werden fast ausschließlich zwei Verfahren zur Erzeugung der Schwingungsbewegungen eingesetzt, nämlich die Anregung mittels magnetostriktiven oder piezoelektrischen Aktoren [40, 41, 43].

In [36] werden experimentelle Untersuchungen des Einflusses von Ultraschall-Schwingungen auf die Oberflächenrauheit in der Schleifbearbeitung von C45 beschrieben. In diesen Versuchen kommt eine Schleifscheibe mit Aluminium-Oxid-Schleifkorn 99A120K8V

zum Einsatz. Die Werkstücke umfassen eine Größenordnung von $25 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. Die Schleifbedingungen definieren sich über eine Drehzahl $n = 1.440 \text{ U/min}$, eine Schnittgeschwindigkeit von $v_s = 9,1 \text{ m/s}$ und eine Schnitttiefe von $a_c = 0,02 \text{ mm}$. Die Schleifscheibe wird jeweils mit derselben Drehzahl abgerichtet, wobei eine Abrichtzustellung von $a_{ed} = 0,01 \text{ mm}$, ein Überlappungsverhältnis $D_u = 2$ und eine Gesamttiefe der Abrichtung $a_{ed,gesamt} = 0,1 \text{ mm}$ realisiert wurden. Als Kühlschmierstoff wurde eine Emulsion Castrol Syntilo 2000 verwendet und der Volumenstrom mit 120 l/min gewählt. Im Rahmen der Untersuchungen erfolgte ein Vergleich der konventionellen mit der ultraschallunterstützten Schleifbearbeitung, wobei insbesondere der Einfluss der Schwingungsamplitude auf die Oberflächengüte im Fokus der Untersuchung stand. Die Ultraschallschwingung wurde in Querrichtung zum Vorschub ausgerichtet und eine Frequenz von $f = 20 \text{ kHz}$ mit einer Amplitude von $A = 4 \mu\text{m}$ bis $6 \mu\text{m}$ zur Anwendung gebracht. Abbildung 36 zeigt den Zusammenhang zwischen der Schwingungsamplitude und der resultierenden Oberflächenrauheit. Auf der Abszisse sind dabei die nummerierten Versuchsdurchläufe aufgetragen. Die Amplitude $A = 0 \mu\text{m}$ stellt die Ergebnisse für das konventionelle Schleifen dar. Aus den Versuchen geht hervor, dass mit einer Steigerung der Amplitude der Mittenrauwert R_a signifikant reduziert werden kann.

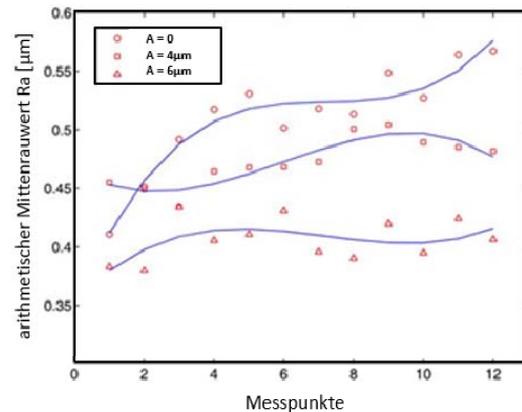


Abbildung 36: Zusammenhang zwischen Oberflächen-Rauheit R_a und Schwingungsamplitude [36]

Wie die Abbildung zeigt, liegt die durchschnittliche Größenordnung der R_a - Werte derselben Versuchsgruppe bei $0,497 \mu\text{m}$, $0,491 \mu\text{m}$ und $0,406 \mu\text{m}$ für Amplituden A von $0 \mu\text{m}$, $4 \mu\text{m}$ und $6 \mu\text{m}$. Damit liegen die Rauheiten bei der Ultraschallbearbeitung mit einer Amplitude von $6 \mu\text{m}$ rund 20 % unter den Werten einer konventionellen Schleifbearbeitung. Eine detaillierte messtechnische Analyse der Oberfläche zeigt, dass bei konventioneller Bearbeitung Effekte der Aufbauschneidenbildung eine gröbere Oberflächenstruktur ergeben. Die vorliegende Riefenstruktur ist dabei tiefer und enger zusammenliegend. Der beschriebene Zusammenhang konnte auch in anderen Untersuchungen, beispielsweise in [44], nachgewiesen werden. Ähnliche Ergebnisse werden auch

in [45, 46] berichtet.

In [22] werden Zerspanungsversuche mit einer magnetgelagerten Spindel durchgeführt. Bei der axialen Oszillation der Spindelachse werden Amplitude und Frequenz (Maximalamplitude für die jeweilige Frequenz) variiert, wobei für die Schleiftests hauptsächlich Hartmetall der Sorte HM P25 als Versuchswerkstoff ausgewählt wurde. Zudem wurden Vergleichsuntersuchungen mit 42CrMo4 realisiert.

Tabelle 3: Parameter zur Schleifbearbeitung von Hartmetall HM P25 mit Ultraschallanregung [22]

Spindel	LeviSpin 700
Verfahren	Umfangsschleifen (Gegenlauf)
Drehzahl	n = 10.000, 20.000, 30.000 U/min
Schnittgeschwindigkeit	$v_c = 5,2 \text{ m/s} - 10,4 \text{ m/s} - 15,7 \text{ m/s}$
Eingriff	$a_e = 0,05 \text{ mm}$
Werkstückgeschwindigkeit	$v_{ft} = 52 \text{ mm/min}$
Schleifstift	D91, Ø 10 galv. gebunden
Werkstück	HM (P25)
Kühlschmierstoff	Emulsion 5%ig

Das Hartmetall wurde als Block gespannt und mit einem Diamantschleifstift entlang der Werkstückkante mit einer Zustellung von 0,05 mm und einer Vorschubgeschwindigkeit von 52 mm/min geschliffen. Die übrigen Versuchsparameter können Tabelle 3 entnommen werden. In den folgenden Abbildungen sind die Schleifkräfte in Abhängigkeit der Oszillationsfrequenz der Spindel für die jeweiligen Versuchswerkstoffe dargestellt. Eine Frequenz von 0 Hz bedeutet hierbei, dass die Spindel wie eine konventionelle (z.B. wälzgelagerte) Spindel operiert und keine Oszillation durchführt.

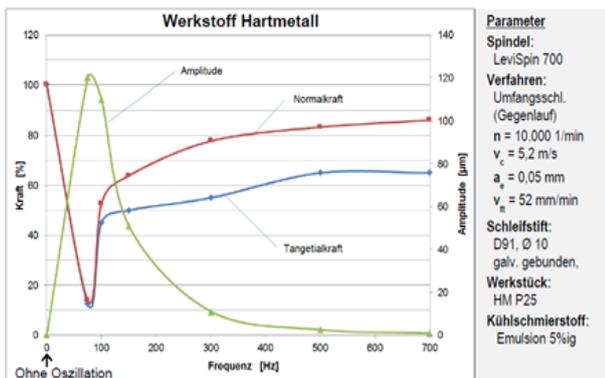


Abbildung 37: Änderung der Schleifkräfte in Abhängigkeit von der Frequenz der axialen Oszillation für Hartmetall HM P25 [22]

Bei steigender Oszillationsfrequenz sinken die Schleifkräfte zunächst und es ist zu erkennen, dass diese bei einer Frequenz von ca. 80 Hz um teils bis zu über 80 % abfallen. Diese niedrigen Kräfte sind ein Beleg für einen günstigeren Spanbildungsprozess.

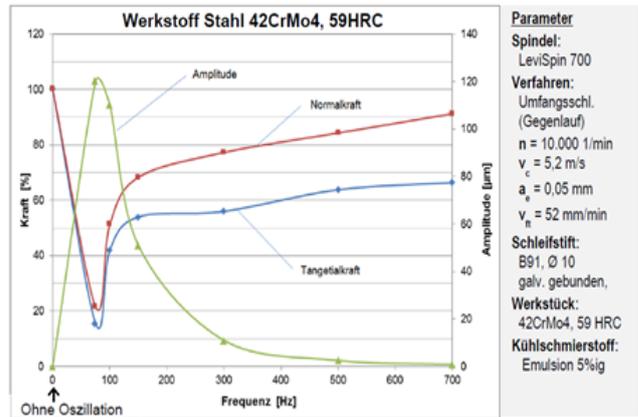


Abbildung 38: Änderung der Schleifkräfte in Abhängigkeit von der Frequenz der axialen Oszillation für 42CrMo4 [22]

Vergleichbare Ergebnisse konnten auch für 42CrMo4 erzielt werden, wobei sich die Prozessveränderungen für den Stahlwerkstoff in ähnlicher Größenordnung darstellen. Abbildung 38 zeigt damit ein vergleichbares Resultat für den Werkstoff 42CrMo4. Hier sinken die Schleifkräfte wiederum um ca. 80 % bei einer Frequenz von ca. 80 Hz. Im Parameterbereich, in welchem die Prozesskräfte signifikant abfallen, wurden für die untersuchten Werkstoffe auch sinkende Rauheitswerte ermittelt. Die Größenordnung der Rauheitsreduktion zeigt sich dabei für 42CrMo4 und Hartmetall in ähnlichen Dimensionen wie die festgestellte Kraftreduktion. In Abbildung 39 ist der Verlauf der Oberflächenrauheit am Beispiel des Werkstoffs Hartmetall dargestellt.

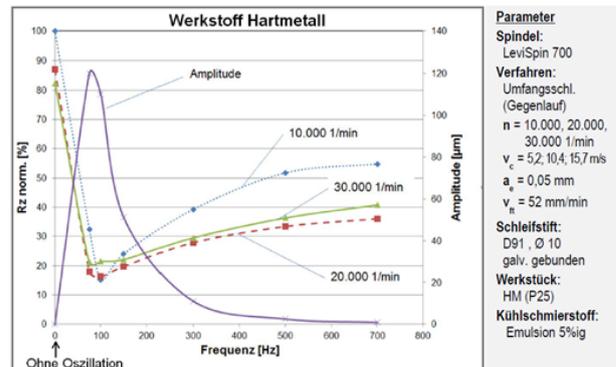


Abbildung 39: Änderung der gemittelten Rautiefe R_z in Abhängigkeit von der Frequenz [22]

Die messtechnische Auswertung der Oberflächengüte zeigt, dass beim konventionellen Schleifen ohne Oszillation parallele Schleifriefen erzeugt werden. Bei der Schwingungsbeaufschlagung werden diese geraden Schleifspuren „verwischt“. Die Schleifbahnen bewegen sich dabei nicht nur in Vorschubrichtung, sondern zeigen auch zeitlich variable Bewegungskomponenten senkrecht zum Vorschub [8, 9].

In [49] wird die ultraschallunterstützte Zerspanung der Legierung Ti6Al4V unter Anwendung der in Tabelle 4 gelisteten Versuchsparameter beschrieben.

Tabelle 4: Versuchsparameter zur Schleifbearbeitung von Ti6Al4V mit Ultraschallanregung [49]

Schleifgeschwindigkeit	15 m/s - 25 m/s
Spanungsdicke	5 µm – 10 µm - 15 µm
Werkstückgeschwindigkeit	0,24 und 0,3 m/s
Schleifscheibe	Tyrolit 89A60K5AV217 (175×15×51 mm)
Abriechtwerkzeug	Diamant-Abriecher
Kühlschmierstoff KSS	Alkaline und Trockenschnitt
Werkstück	Ti6Al4V (Ø 50 × 14 mm)
Ultraschall-Frequenz	20400±200 Hz
Ultraschallrichtung	in Vorschubrichtung

Die Ergebnisse zeigen auch hier, wie anhand von Abbildung 40 dargestellt, eine signifikante Beeinflussung des Prozesses in Form einer Reduktion der Prozesskräfte und einer positiven Beeinflussung der Oberflächengüte. Die alternierende Kontaktsituation bei der ultraschallunterstützten Bearbeitung führt zudem zu einer geringeren Wärmebelastung in der Zerspanungszone. Dieser positive Effekt kann dabei für eine Prozessmodifikation herangezogen werden. Beispielsweise wird in [49] der Werkstoff Ti6Al4V auch ohne Kühlschmierstoffeinsatz in einer Trockenbearbeitung geschliffen.

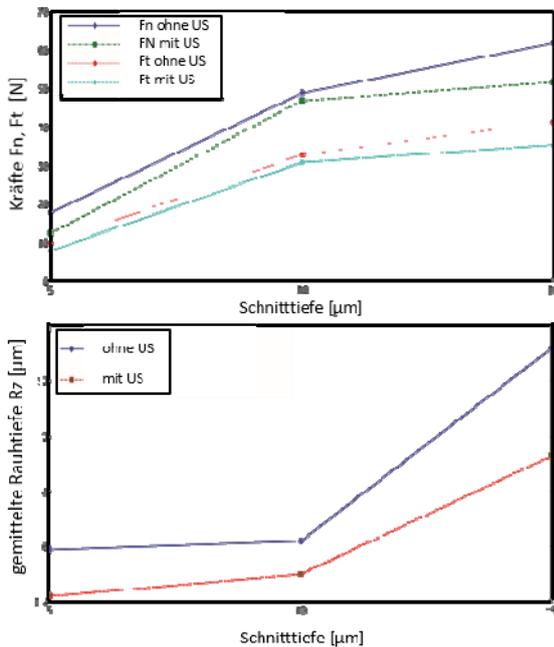


Abbildung 40: Schleifkräfte und Oberflächenrauhigkeit, UAG und konventionelles Schleifen, $v_s = 25$ m/s, $v_w = 0,3$ m/s, KSS - Volumenstrom $Q = 2$ l/min [49]

In [50] wird die Schleifbearbeitung von 100Cr6 mit einer Härte von 60HRC beschrieben. Am Beispiel der werkstückseitigen US-Einleitung auf Basis einer Blocksonotrode nach [29] wird der Schwingungseinfluss auf das Schleifergebnis unter Einsatz von keramisch

gebundenen CBN-Scheiben zusammenfasst. Die wesentlichen Bearbeitungsparameter der durchgeführten Untersuchungen sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Bearbeitungsparameter für das CBN – Schleifen von 100Cr6 [38]

Schleifscheibe	Keramisch gebundene CBN-Schleifscheibe B 126 C125
Werkstück	100Cr6, 60HRC, 100 mm · 60 mm · 30 mm
Schleifbedingungen	Vorschubgeschwindigkeit $v_{ft} = 500$ mm/min - 2000 mm/min Schnittgeschwindigkeit $v_c = 60$ -120 m/s Zustellung $a_c = 0,03 - 0,05$ mm
Kühlschmierstoff	Lösung (5%) 100 l/min
Abriechtbedingungen	Abriechtgeschwindigkeitsquotient $q_d = 0,5$ Abriechtgeschwindigkeit $v_{cd} = 60$ m/s Abriechtzustellung $a_{cd} = 5 \times 3$ µm Überdeckung $D_u = 6$
Abriechtwerkzeug	Diamantrolle $R_{sp} = 0,20$ mm
Richtung der Schallausbreitung	parallel zum Vorschub
US-Bedingungen	$f_{US} = 22$ kHz, $A_{US} = 10$ µm

Bei den Zerspanungstests wurde eine CNC-Flachschleifmaschine des Typs Elb Micro-Cut AC8 mit einem Ultraschallgenerator Mastersonic MMM eingesetzt und in Frequenzstufen von 17 bis 47 kHz betrieben. Der Generator erzeugt also ein amplitudenmoduliertes Ausgangssignal bei einer variablen Frequenz. Bei den durchgeführten Versuchen wurde das UUS mit dem konventionellen Schleifen verglichen. Durch das konventionelle Schleifen entstehen hohe Temperaturen, die zu Schädigungen an der Werkstückoberfläche führen können. Gefüge- und Phasenänderungen oder Risse bedingt durch thermische Eigenspannung können beispielsweise dabei auftreten. Auch im Zuge der vorliegenden Untersuchung sind, wie in Abbildung 41 dargestellt, für das konventionelle Schleifen (Nut I) deutliche Schleifrisse und Brandmarken zu erkennen. Durch den Einsatz der Ultraschallunterstützung bei gleichen Prozessparametern weist das geschliffene Werkstück keine sichtbaren thermischen Schädigungen auf (Nut II).

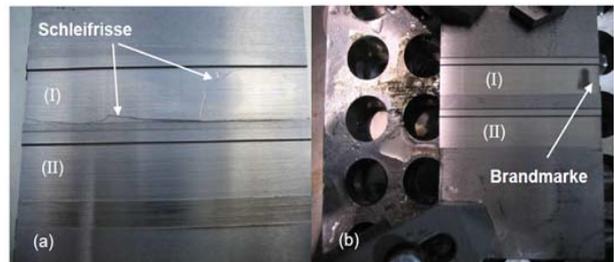


Abbildung 41: Schleifrisse (a) und Brandmarke (b) beim konventionellen Schleifen der Nut (I), keine thermische Schädigung beim UUS der Nut (II) [38]

Die experimentellen Untersuchungen zeigen somit, dass beim Flachschleifen von 100Cr6 infolge einer Ultraschallunterstützung eine signifikante Prozessverbesserung erzielt werden kann. Die Ultraschallschwingungen

führen bei unterschiedlichen Schleifzustellungen zudem auch hier, wie in Abbildung 42 dargestellt, zu einer Reduzierung der Schleifkräfte.

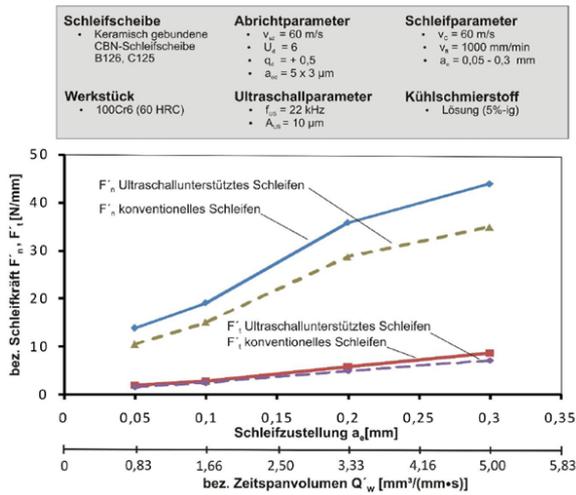


Abbildung 42: Bezogene normale Schleifkräfte in Abhängigkeit von der Zustellung a_e [38]

Die vorliegenden Verbesserungen werden in [38] auf den veränderten Schneidkorneingriff zurückgeführt. Aus der Ultraschallschwingung resultiert ein Prozess mit Wechselwirkung zwischen den Schleifkörnern und dem Werkstück. Je größer die Schwingungsamplitude ist, desto höher ist die kinetische Energie, mit welcher die Körner auf der Werkstückoberfläche eingreifen. Infolge dieses Zusammenhangs werden durch einen Anstieg der Schwingungsamplitude die maximale Schnitttiefe und der Eingriffswinkel erhöht, während die Kontaktlänge und die Kontaktzeit reduziert werden. Abbildung 43 zeigt das während eines Langzeitversuches gemessene Verschleißverhalten der Schleifscheibe.

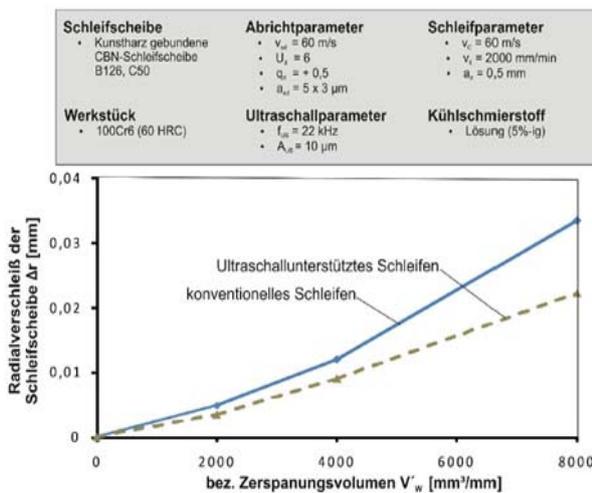


Abbildung 43: Reduzierung des Radialverschleißes der Schleifscheibe durch das UUS [38]

Im Zuge des Vergleichs der UUS mit dem konventionellen Schleifprozess ist zu erkennen, dass der Ver-

schleiß der Schleifscheibe unter Anwendung von Ultraschall deutlich geringer ausfällt als beim konventionellen Verfahren. Der Vorteil von UUS zeigt sich auch darin, dass durch die Schwingungen des Werkstückes die Kontaktzeit mit dem Werkzeug reduziert wird und der Kühlschmierstoff effizienter an die Schleifzone gelangt. Folglich werden die Reibung, die Schleifkräfte und letztlich die Schleiftemperaturen verringert. Die Schleifversuche zeigen weiters, dass die Verschleißwerte beim konventionellen Schleifen im Vergleich zum UUS erst nach einer bestimmten Zeit voneinander abweichen. Ab einem Zerspanungsvolumen von $4000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ steigt der radiale Schleifscheibenverschleiß beim konventionellen Schleifen stark an, wohingegen beim UUS die Zunahme nahezu konstant bleibt. Die Rauheitswerte der bearbeiteten Oberflächen fallen beim UUS um 20 % bis 30 % geringer aus als beim vergleichbaren konventionellen Schleifprozess. Die betrachteten Schnittgeschwindigkeiten v_c lagen dabei bei 60 m/s und 120 m/s, wobei bei $v_c = 120$ m/s eine feinere Oberflächenrauheit erreicht werden konnte. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die Ultraschallschwingungen eine schlagartige Belastung der Körner auf der Werkstückoberfläche verursachen und hierdurch das Brechen von instantanen, die Oberflächenqualität negativ beeinflussenden Aufschweißungen im Mikrobereich begünstigen.

In [51] wird eine zweidimensionale Ultraschallanregung (2D-UAG) verwendet, wobei die Ultraschallschwingung simultan in tangentialer und vertikaler Richtung zur Schleifscheibe eingeleitet wird. Im Zuge der Versuche konnte gezeigt werden, dass in Folge dieser Anregung das Zerspanungsvolumen gegenüber der konventionellen Schleifbearbeitung um den Faktor 8 gesteigert und die Normalkräfte bei konstanten Spannungsdicken um ca. 50 % reduziert werden können. In [52] werden Zerspanungsversuche mit zweiachsiger Ultraschallanregung für die Zerspanung von nano-ZrO₂-Keramik durchgeführt. Die Oberflächengüte konnte dabei verbessert werden und die Zerspanung erfolgt offensichtlich mehr im plastischen Bereich. Liang et al. beschreiben in [48, 53, 54] eine 2D-UAG-Technologie mit elliptischer Schwingungsanregung (EUAG).

Eine Untersuchung des Verschleißverhaltens eines kunststoffgebundenen Diamant-Schleifwerkzeuges mit zweidimensionaler, elliptischer Ultraschallanregung auf einem Einkristall-Saphir ist in [39] zusammengefasst. Die Versuchsparameter zeigt die Aufstellung in Tabelle 6. Hierbei wird zwischen einer Schwingungsanregung, die parallel zur Hauptspindelachse erfolgt (AUAG genannt) und einer vertikal zur Zerspanungsfläche erfolgenden Anregung (VUAG) unterschieden. Diese kann entweder am Werkstück oder an der Schleifscheibe eingebracht werden. Die EUAG-Schleifbearbeitung mit kunstharzgebundenen Diamant-Schleifscheiben zeigt im Vergleich zu den Ergebnissen einer konventionellen Schleifbearbeitung eine Reduktion der Schleifkräfte in der Größenordnung von 30% (siehe Abbildung 44) und eine um etwa 20% verbesserte Oberflächenrauheit, wie wiederum in Abbildung 45 dargestellt ist.

Tabelle 6: Parameter zur zweiachsigen Ultraschallanregung in der Schleifbearbeitung von Saphir

Parameter	
Schleifscheibe	Kunsthartzbindung, SDC800N75BG 180D-3X-15T-31.75H Durchmesser 180 mm Scheibenbreite 15 mm
Werkstückwerkstoff	Saphir Substrat (a-plane)
Kühlschmierstoff	Trockenbearbeitung
Eingangsspannung	$V_{p-p} = 50 \text{ V}$
Frequenz	$f = 21,95 \text{ kHz}$
Phasenverschiebung ($^\circ$)	$\varphi = 90^\circ$
Schwingungsamplitude	$A_B = 0,22 \mu\text{m}$, $A_L = 0,25 \mu\text{m}$
Schnittgeschwindigkeit	$v_s = 20 \text{ m/s}$
Werkstückgeschwindigkeit	$v_w = 200 \text{ mm/min}$
Spannungsdicke	$a_c = 2 \mu\text{m}$
Spannungsbreite	$b = 5 \text{ mm}$

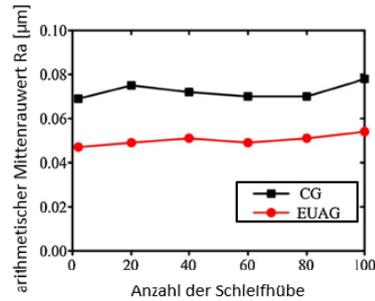
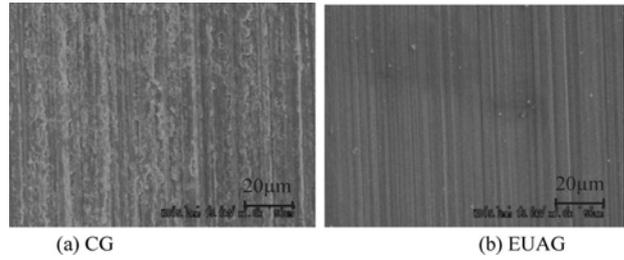


Abbildung 45: REM-Aufnahmen eines monokristallinen Saphir-Testteils nach 100 Überschleifungen, a) konventionelle Schleifbearbeitung, b) mit elliptischer Ultraschallbearbeitung, c) Ra - Werte [39]

In den Versuchen wurden die in Tabelle 7 zusammengefassten Prozessparameter verwendet, um eine Vollnutbearbeitung durchzuführen. Die Eingriffsparameter wurden mit $a_c = 3 \text{ mm}$ und $a_p = 0,02 \text{ mm}$ gewählt.

Tabelle 7: Parameter zur dreiachsigen Ultraschallanregung in der Schleifbearbeitung von SiSiC [39]

Parameter	
Schleifstifte	Durchmesser 3 mm Körnung D107 Kornkonzentration C200
Werkstückwerkstoff	Saphir-Substrat (a-plane)
Schnittgeschwindigkeit	$v_s = 75,5 \text{ m/s}$
Werkstückgeschwindigkeit	$v_w = 360 \text{ mm/min}$
Kühlschmierstoff	Emulsion, 60 bar

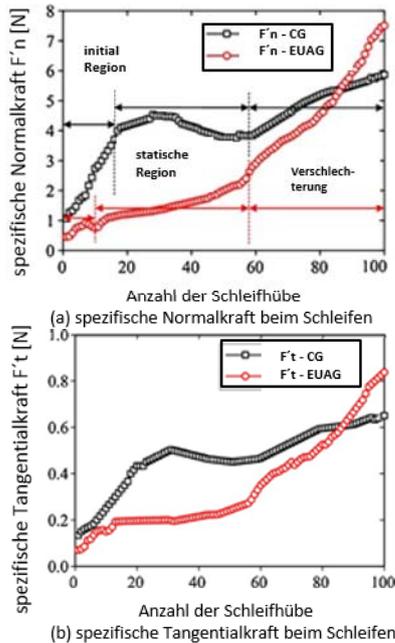


Abbildung 44: Veränderung der Schleifkräfte, a) spezifische Normalkraft, b) spezifische Tangentialkraft [39]

Eine besondere Herausforderung stellt die Schleifbearbeitung von keramischen Werkstoffen dar. Der Einfluss einer dreiachsigen Schwingungsunterstützung sei hier am Beispiel der Schleifbearbeitung von SiSiC dargestellt. Für die nachfolgenden Versuche wurden Schleifstifte mit einer Diamantkorngröße D107 nach FEPA-Norm (Fédération Européenne des fabricants de produits abrasifs) und einer Kornkonzentration von C200 benutzt [11]. Pro Kubikzentimeter Belagsvolumen liegen für C200 8,8 Karat (kt) Diamant vor. Daraus ergibt sich ein Diamantvolumenanteil von 50 % bei einer Dichte von $3,52 \text{ g/cm}^3$.

Abbildung 46 zeigt schematisch den verwendeten Versuchsaufbau sowie die Ergebnisse der Zerspanungstests. Wie aus der Darstellung ersichtlich wird, wurde eine zweiachsige Schwingeinrichtung, die in Abbildung 35 ausführlich beschrieben ist, unter einem Winkel von 45° in der Versuchsmaschine angeordnet. Daraus resultiert, dass sich die Schwingungsbewegung einer Achse der Vorrichtung auf zwei Raumachsen der Maschine aufteilt. Zusammen mit der zweiten Schwingbewegung der Vorrichtung, die orthogonal auf die erste Achse angeordnet ist und somit mit einer Maschinenachse direkt zusammenfällt, resultiert eine Schwingungsanregung in den drei Maschinenhauptachsen. Die auf diese Achsen zuzuordnenden Amplituden sind ebenfalls der Abbildung 46 zu entnehmen.

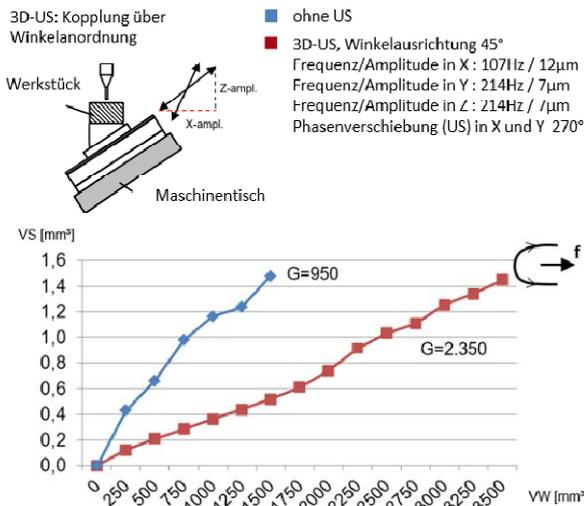


Abbildung 46: Einfluss einer dreiaxigen Schwingungsanregung auf den Werkzeugverschleiß [39]

Im Zuge des Versuchs wurden an der Schwingungseinrichtung mit der Größenordnung von 107 Hz und 214 Hz zwei unterschiedliche Frequenzen eingestellt, wodurch eine U-förmige Schwingungsform resultierte. Die Vorschubrichtung wurde in der Orientierung der U-förmigen Schwingung gewählt. Anhand der Analyse des Verschleißfortschrittes an den Diamant-Schleifstiften zeigte sich, dass bei der mehrachsigen schwingungsunterstützten Bearbeitung eine Verbesserung des Verschleißverhaltens um Faktor 2,5 festgestellt werden konnte.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Schleifbearbeitung stellt ein zentrales Bearbeitungsverfahren in Wertschöpfungsketten zur Herstellung sowohl von Industrie- als auch von Konsumgütern dar. Aus unterschiedlichen anwendungsorientierten Fragestellungen zur Leistungssteigerung resultiert der Zugang, durch den Einsatz einer Schwingungsanregung an der Wirkstelle zwischen Werkzeug und Werkstück eine Verbesserung des Zerspanungsvorgangs zu erreichen. Durch einen Mehrkornritzversuch konnte gezeigt werden, dass eine Schwingungsunterstützung in den Zerspanungsvorgang selbst von sprödharten Werkstoffen eingekoppelt werden kann. Die durch die Schwingungsüberlagerung erreichte Beeinflussung des Zerspanungsvorgangs äußert sich in einem alternierenden Eingriff bzw. Kontakt des Werkzeuges mit dem Werkstück. Daraus resultiert generell eine Reduktion der Prozesskräfte, wobei eine Abhängigkeit von der Frequenz und vor allem von der Amplitude der Schwingung in unterschiedlichen Versuchen nachgewiesen werden konnte. Dieser Effekt tritt in der Bearbeitung von metallischen und sprödharten Werkstoffen auf. Neben der Reduktion von Prozesskräften zeigen Versuche auch die positive Beeinflussung der resultierenden Oberflächengüte und vor allem auch des Verschleißes an den Werkzeugen. Diese Effekte können

für die Effizienzsteigerung in der Schleifbearbeitung zielgerichtet genutzt werden. Einerseits liegt die Kostenreduktion durch die Verschleißoptimierung an den Werkzeugen im Fokus, andererseits kann eine Erhöhung des Zeitspanvolumens durch die Ausnutzung der geringeren Prozesskräfte bei gleichem Verschleiß erreicht werden.

Wie experimentelle Untersuchungen zeigen, ist der Einkoppelmechanismus der Schwingung zwischen Werkzeug und Werkstück von großem Einfluss auf das Prozessverhalten. Bei der indirekten Schwingungsanregung in Form einer Nutzung von Resonanzeffekten am Werkstück oder aber auch am Werkzeug kann der Werkzeug-Werkstück-Kontakt zu einer signifikanten Dämpfung der Schwingungsamplitude führen. Dies ist bei der Wahl der Prozessparameter aber auch bei der Art der Schwingungsanregung zu berücksichtigen.

Für die industrielle Implementierung stehen mittlerweile einige Ultraschall-Anregungssysteme zur Verfügung. Forschungsergebnisse zeigen, dass sowohl geringe Frequenzen bei großen Amplituden wie auch hohe Frequenzen mit geringen Amplituden eine günstige Prozessbeeinflussung bewirken.

7. Referenzen

- [1] Vanparis M., "Ultrasonic Assisted Grinding of Ceramic Components", Diss. KU Leuven, 2012
- [2] Colwell, L. V., „The effects of High-Frequency-Vibrations in Grinding. Paper No. 55 – SA-12. Ibid., 78 No.4, pp. 837-859, 1956.
- [3] Bönisch C. W., „Wege zur Prozessoptimierung beim Ultraschallschwinglappen keramischer Werkstoffe“, Diss. RWTH Aachen, 1992.
- [4] Haas R., „Technologie zur Leistungssteigerung beim Ultraschallschwinglappen“, Diss. RWTH Aachen, 1991.
- [5] Denkena B., Hahmann D., „Ultraschallschleifen dünnwandiger Bauteile“, *wt Werkstattstechnik online*, Jahrgang 97, H.11/12, pp. 862-867, 2007.
- [6] Markov A. I., „Ultrasonic Machining of Intractable Materials“, Iliffe Books Ltd., 1966.
- [7] Youssef H., „Herstellgenauigkeit beim Stoßlappen mit Ultraschallfrequenz.“ Diss. TH Braunschweig, 1967.
- [8] Mataushek J., „Einführung in die Ultraschalltechnik“, VEB Verlag, Berlin, 1956.
- [9] Vetter T., „Ultraschallschwinger – Möglichkeiten und Auswirkungen einer Erhöhung der Präzision im Schwingerbau“ Inst. für Fertigungstechnik, TU Hannover, 1969.
- [10] Rayleigh L., „Theorie of Sounds I and II“, Macmillan, London, 1955.
- [11] Website: <http://www.effgen.eu/index.php/de/>
- [12] Schug, R., „Steifigkeitssteigerung von Ultraschallschleifspindeln zur Bearbeitung sprödharter Materialien“, Dissertation RWTH Aachen, Germany, 2008.
- [13] Tawakoli T., Azarhoushang B., „Integration der

- ultraschallunterstützten Zerspanung mit Blocksonotrode“, 8. Seminar Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung, Stuttgart, 2010.
- [14] Tawakoli T., Rasifard A., Azarhoushang B., „Vorteilhafter Einsatz der Ultraschallunterstützung beim Abrichten und Schleifen“ *dihw* 1, H. 3, pp. 40-43, 2009.
- [15] Kazantsev, V. F.: Characteristic features of the plastic deformation of a material subjected to impact ultrasonic effects, *Akustika Ul'trazvuk. Tekh.*, No. 15, pp. 45-47, 1979.
- [16] Markov, A. I.: Ultrasonic treatment of materials (in russian), Mashinostroenie, Moscow, 1980.
- [17] Nerubai, M. S.: Effect of ultrasonic vibrations on the mechanical properties of difficult-to-deform materials, *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 29, Number 4 / April, pp. 254-258, 1987.
- [18] Panin, A. V., Klimenov, V. A., Pochivalov, Y. I., Son, A. A. and Kazachenok, M. S.: The effect of ultrasonic treatment on mechanical behavior of titanium and steel specimens, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 41, pp. 163-172, 2004.
- [19] Severdenko, V. P., Klubovich, V. V. and Stepanenko, A. V.: Pressure working of metals with ultrasound (in Russian), *Nauka i Tekhnika*, Minsk, 1973.
- [20] Zhao, B., Wu, Y., Liu, C. S., Gao, A. H. and Zhu, X. S.: The study on ductile removal mechanisms of ultrasonic vibration grinding nano-ZrO₂ ceramics, *Key Engineering Materials*, Vols. 304-305, pp. 171-175, 2006.
- [21] Zhao, B., Wu, Y., Jiao, F., Gao, G. F. and Zhu, X. S.: Experimental research on surface integrity of ceramic nanocomposites in two-dimensional ultrasonic vibration grinding, *Key Engineering Materials*, Vol. 329, pp. 445-450, 2007.
- [22] Tawakoli T., Lohner R. D., „Schleifen von Hartmetall und Keramik mit magnetgelagerten Spindeln“, 10. Seminar Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung, Stuttgart, pp. 4a.1-11, 2014.
- [23] Bleicher F., Bernreiter J., "Hybridbearbeitung von SiC - Optimierung der spanenden Bearbeitung durch Ultraschallanregung"; in „Zerspanen im modernen Produktionsprozess“, Dortmund, 2010.
- [24] Vicario, I., Gonzalo, O., Bengoetxea, I., A feasibility study for rotary ultrasonic machining of aluminium oxide ceramics. *Proceedings of the 2nd International Meeting of Abrasion*, Chalons en Champagne, France, 2006.
- [25] Daus N.A., *Ultraschallunterstütztes Quer-Seiten-Schleifen*, Diss., TU Berlin, 2004.
- [26] Ishikawa K., Suwabe H., Nishide T., Uneda M., A study on combined vibration drilling by ultrasonic and low-frequency vibrations for hard and brittle materials, *Precision Engineering*, Volume 22, pp. 196-205, 1998.
- [27] Klocke F., Bressler B., Weber A., *Ultraschallunterstütztes Schleifen*, *wt Werkstattstechnik online*, Volume 94, pp. 258-262, 2004.
- [28] Bleicher, F., Bernreiter, J., 2012, „Interaktion Maschine – Prozess durch Mechatronik“, *Ressourceneffiziente Technologien für den Powertrain*, International Chemnitz Manufacturing Colloquium ICMC 2012, Verlag Wissenschaftliche Scripten, ISBN: 978-3-942267-40-3, pp. 195-211, 2012.
- [29] Klocke F., Bressler B., Weber A., „Ultraschallunterstütztes Schleifen - Chancen und Grenzen der Technologie am Beispiel der Zerspanung von Glas und Glaskeramik“, *wt Werkstattstechnik online*, Jahrgang 94, H. 6, pp. 258-262, 2004.
- [30] Brecher C., Guralnik A., Hannig S., Klein W., „Adaptronik in Schleifmaschinen: Prozessregelung über hochdynamische Aktor-Einheiten“, *ECG 2010*, RWTH Aachen, 2010.
- [31] Michels, F., „Stabilisierung des Schleifprozesses mit aktiven Systemen“, *Dissertation RWTH Aachen*, 1998.
- [32] Brecher, D., Klocke, F., Schug, R., Weber, R., „Ultraschalleinsatz – Produktionssteigerung bei der Zerspanung von Glas und Keramik“, *Industrie Diamanten Rundschau IDR*, Reihe 39. Jahrgang, 3. Auflage, pp. 244-250, 2005.
- [33] Bleicher, F., „Zerspanung von keramischen Werkstoffen mit mehrachsiger Schwingungsunterstützung“, *DGM - Moderne Werkstoffe spanend bearbeiten*, 2011.
- [34] N.N., KTI-Projekt „Ultraschall“, KTI-Projekt-Nr. 10999.1, PFIW-IW, Studer, IWF ETH-Zürich, 2014.
- [35] Fiebelkorn, F., *Neueste Schleif- und Abrichttechnologien für den Einsatz hochharter Schleifmittel*, *Grinding Symposium Fa. Studer*, 2014.
- [36] Chen, H., Tang, J., Zhou, W., „An experimental study of the effects of ultrasonic vibration on grinding surface roughness of C45 carbon steel“, *Int J Adv Manuf Technol*, DOI 10.1007/s00170-013-4824-1, pp. 2095-2098, 2013.
- [37] Abdullah, A., Farhadi, A., Pak, A., „Ultrasonic-Assisted Dry Creep-Feed Up-Grinding of Superalloy Inconel738LC“, *Experimental Mechanics*, pp. 843-853, 2012.
- [38] Tawakoli T., Azarhoushang B., „Integration der ultraschallunterstützten Zerspanung mit Blocksonotrode“, *Vortragsband zum 8. Seminar Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung*, Stuttgart, Vulkan-Verlag, pp. 4b1/14, 2010.
- [39] Lianga, Z., Wanga, X., Wub, Y., Xiea, L., Liua, Z., Zhaoa, W., „An investigation on wear mechanism of resin-bonded diamond wheel in Elliptical Ultrasonic Assisted Grinding of monocrystal sapphire“, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 212, Issue 4, pp. 868-876, 2012.
- [40] Wu, Y., Kondo, T., Kato, M., „A new centerless grinding technique using a surface grinder“, *Journal of Materials Processing Technology*, H. 162-163, pp. 709-717, 2005.

- [41] Carlsburg, H., „Hartbearbeitung keramischer Verbundwerkstoffe“, Dissertation Technische Universität Berlin, 1993.
- [42] Qu, W., Wang, K., Miller, M.H., Huang, Y., Chandra, A., “Using vibration-assisted grinding to reduce subsurface damage”, *Precision Engineering Journal* 24, pp. 329–37, 2000.
- [43] Tawakoli, T., Azarhoushang, B., "Influence of ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 48, Issue 14, pp. 1585-1591, 2008.
- [44] Gao G.F., Zhao B., Xiang D.H., Kong Q.H., “Research on the surface characteristics in ultrasonic grinding nano-zirconia ceramics”, *J. Mater Process Technology* 209, pp. 32-37, 2009.
- [45] Denkena, B., Friemuth, T., Reichstein, M., „Potentials of different process kinematics in micro grinding”, *Ann. CIRP* 52, pp. 463–466, 2003.
- [46] Mult, H., Spur, G., Holl, S., „Ultrasonic assisted grinding of ceramics”, *J. Mater. Process. Technol.* 62, pp. 287–293, 1996.
- [47] Burghardt B., Großmann M., “Keramische Werkstoffe und technische Einsatzmöglichkeiten,“ *Anorganische Chemie-Didaktik der Chemie*, Universität Bayreuth, 2013.
- [48] Liang, Z., Wu, Y., Wang, X., Zhao, W., „A new two-dimensional ultrasonic assisted grinding (2D-UAG) method and its fundamental performance in monocrystal silicon machining”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 50 (8), pp. 728-736, 2010.
- [49] Nik, M. G., Movahhedy, M. R., Akbari, J.,” Ultrasonic-Assisted Grinding of Ti6Al4V Alloy”, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting, *Procedia CIRP* 1, pp. 353-358, 2012.
- [50] Tawakoli, T., Azarhoushang, B., Rabiey, M., "Effects of ultrasonic vibration on grinding of 100Cr6", *Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems*, Vol. 1, No. 4, 2008.
- [51] Suzuki, K., Uematsu, T., Makizaki, T., Iwai, M., “Ultrasonic grinding utilizing a stator of an ultrasonic motor”, *Proceedings of JSME Conference Manufacturing and Machine Tool*, Mishima, Japan, pp. 183-184, 2000.
- [52] Yan, Y., Zhao, B., Liu, J., “Ultraprecision surface finishing of nano-ZrO₂ ceramics using two-dimensional ultrasonic assisted grinding”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 43 (5–6), pp. 462-467, 2009.
- [53] Liang, Z., Wang, X., Wu, Y., Zhao, W., “A feasibility study on elliptical ultrasonic assisted grinding of sapphire substrate”, *Int. J. Abras. Technology*, 3 (3), pp. 190-202, 2010.
- [54] Liang, Z., Wu, Y., Wang, X., Zhao, W., „Two-dimensional ultrasonically assisted grinding technique of monocrystal silicon”, *Proceedings of the 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, Osaka, Japan, pp. 535-540, 2009.