

Innovative Integrationsmöglichkeit für die ultraschallunterstützte Fräsbearbeitung**Konzept eines adaptiven Ultraschallsystems
für die Fräsbearbeitung**

E. Uhlmann, M. Polte, T. Hocke, J. Tschöpel

ZUSAMMENFASSUNG Die ultraschallunterstützte Zerspanung bietet das Potenzial, die Prozessgrenzen bei der Zerspanung spröder Werkstoffe erheblich zu verschieben. Kommerziell erhältliche Ultraschallsysteme sind jedoch aufgrund ihres Funktionsprinzips hinsichtlich der darstellbaren Parameter stark limitiert. Das vorgestellte Konzept zeigt eine Lösung dieser technologischen Herausforderung und bietet somit eine Möglichkeit, die ultraschallunterstützte Zerspanung in eine breitere industrielle Anwendung zu bringen.

STICHWÖRTER

Fertigungstechnik, Forschung, Werkzeugmaschinen

**Innovative integration solution
for ultrasonic-assisted milling – Concept
of an adaptive ultrasonic system
for vibration-assisted milling**

ABSTRACT Ultrasonic-assisted machining offers the potential to significantly shift the process limits in the machining of brittle materials. However, commercially available ultrasonic systems are severely limited in terms of the parameters that can be achieved due to their functional principle. The concept presented shows a solution to this technological challenge and thus offers an opportunity to bring ultrasonic-assisted machining into a broader industrial application

1 Einleitung

Hartspröde Werkstoffe spielen eine zentrale Rolle in zahlreichen Industriebereichen und finden aufgrund ihrer außergewöhnlichen physikalischen sowie chemischen Eigenschaften breite Anwendung. Insbesondere technische Keramiken zeichnen sich hierbei durch ihre hohe maximale Einsatztemperatur ϑ_{\max} , ihre geringe elektrische Leitfähigkeit k sowie ihre Beständigkeit in abrasiven Umgebungen aus. Diese Eigenschaften eröffnen vielseitige Einsatzmöglichkeiten, beispielsweise in der Elektronik, Medizintechnik sowie in der Luft- und Raumfahrt. In der Medizintechnik wird der Einsatz derartiger Werkstoffe vor allem durch ihre Biokompatibilität und Abriebfestigkeit geprägt, wie es bei künstlichen Zahnimplantaten oder Endoprothesen für Knie- und Hüftgelenke von höchster Wichtigkeit ist [1]. Weitere Anwendungsfelder finden sich in der Elektronikbranche, wo keramische Werkstoffe als multifunktionale Komponenten in leistungselektronischen Baugruppen eingesetzt werden. Hier leisten sie als Kühl-, Isolier- und Strukturmaterial einen wichtigen Beitrag zur Funktionsintegration und zur Miniaturisierung elektrischer Systeme, wie beispielsweise in Kamera- oder Messsystemen [2]. In der Luft- und Raumfahrt werden keramische Verbundwerkstoffe insbesondere in thermisch hochanspruchsvollen Umgebungen – beispielsweise in Strahltriebwerken – eingesetzt, innerhalb welcher dennoch hohe mechanischen Lasten betriebssicher aufgenommen werden müssen [3]. Alle dargelegten Beispiele anwendungen erfordern dabei eine hochpräzise Bearbeitung, beziehungsweise Nachbearbeitung der Komponenten aus technischen Keramiken, sodass eine Einhaltung der herstellerseitigen Anforderungen bezüglich der Formgenauigkeit G_F und des arithmetischen Mittenerauwertes R_a garantiert werden kann. Hierbei kommen maßgeblich subtraktive Fertigungsverfahren in Form von Frä-

und Schleifprozessen zum Einsatz. Konventionelle spanende Verfahren stoßen dabei allerdings jedoch oft an ihre Grenzen, da sie aufgrund eines hohen Werkzeugverschleißes, einer dadurch begrenzten Wirtschaftlichkeit und Herausforderungen bei der Erreichung von Formgenauigkeit G_F und arithmetischen Mittenerauwert R_a gekennzeichnet sind. Die Ursache hierfür liegt im nachteiligen Zerspanverhalten technischer Keramikwerkstoffe begründet, welches durch einen spröden Trennmechanismus beschrieben werden kann. Der trennende Effekt kommt hierbei primär durch Bruchvorgänge zustande. Dieses spröde Zerspanverhalten führt zum Auftreten einer großen Menge freier Partikel in der Zerspanzone, welche sich im Ergebnis stark negativ auf das Verschleißverhalten des Werkzeuges auswirken. Weiterhin kann es aufgrund undefinierter Ausbruchvorgänge in der Zerspanzone besonders an Randbereichen des Werkstückes zu teils erheblichen Ausbrüchen kommen, welche die Funktionalität des Bauteiles beeinträchtigen können.

Die ultraschallunterstützte Zerspanung stellt eine Technologie dar, welche zur Lösung der aufgezeigten Herausforderungen genutzt werden kann. Das grundlegende Wirkprinzip basiert hierbei auf der Überlagerung einer hochfrequenten Schwingbewegung auf die Werkzeugbewegung. Diese hochfrequente Werkzeugbewegung führt unter der Wahl passender Prozessparameter zu einer periodischen Kontaktunterbrechung der Werkzeugschneide mit dem Werkstück. Hieraus resultieren maßgeblich zwei Vorteile für die Zerspanung. Der erste Vorteil betrifft die Reduzierung der Temperatur ϑ_z in der Zerspanungszone, wodurch dem Auftreten chemischer Verschleißerscheinungen am Werkzeug begegnet werden kann. Der zweite Vorteil infolge der Ultraschallüberlagerung betrifft die verbesserte Entstehung von Mikrorissen in der Zerspanzone, aufgrund des periodischen Eintretens der Werkzeugschneide in das Werkstück. Im Ergebnis werden die auftretenden

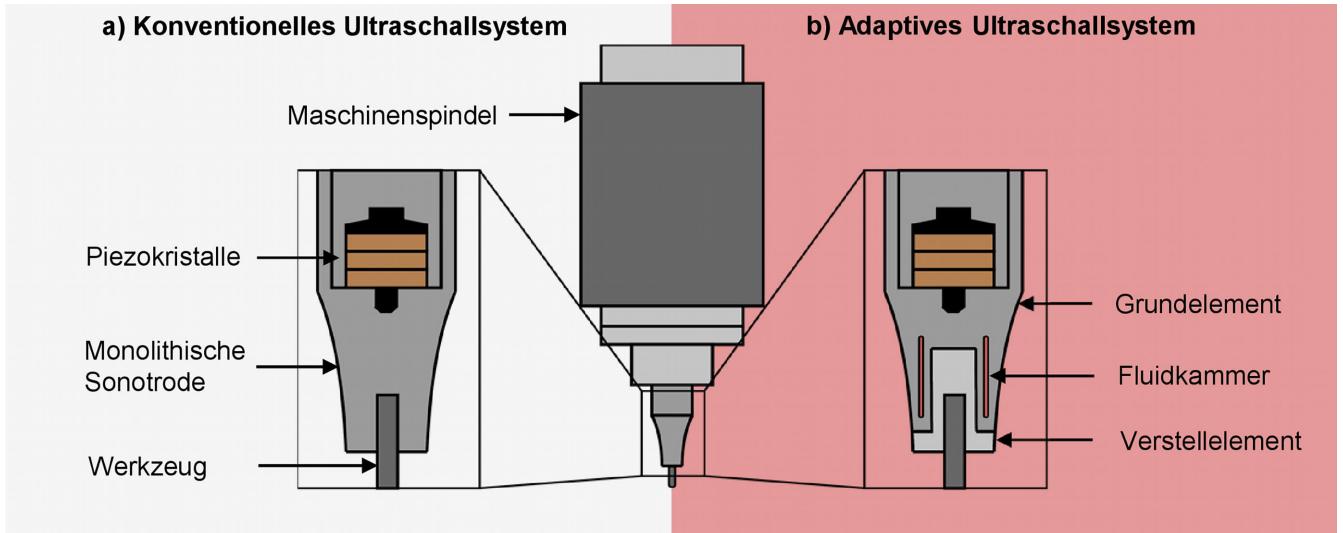


Bild 1. Vergleich eines marktüblichen Systems zur ultraschallunterstützten Fräsbearbeitung (a) und eines adaptiven Ultraschallsystems (b).
Grafik: Eigene Darstellung

Prozesskräfte F_p sowie die Neigung zu undefinierten Ausbrüchen an Kantenstrukturen des Werkstückes reduziert. Folglich wird eine Fertigung filigraner Bauteilstrukturen ermöglicht. Diese positiven Effekte treten grundsätzlich bei allen Werkstoffen mit spröder Zerspanungscharakteristik auf, zu denen beispielsweise keramische Werkstoffe sowie Graphitwerkstoffe zählen. Die Prozessparameter zur Erreichung applikationsspezifischer Bearbeitungsergebnisse sind jedoch werkstoffabhängig und somit für jeden Werkstoff experimentell zu ermitteln.

Die grundlegende Funktionalität der ultraschallunterstützten Zerspanung konnte bereits in zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen am Beispiel von Frä-, Dreh- oder Schleifprozessen dargestellt werden [4; 5; 6; 7]. Es konnte gezeigt werden, dass die beschriebenen ultraschallassoziierten Effekte maßgeblich dann auftreten, wenn es zu einer Kontaktunterbrechung zwischen der Werkzeugschneide und dem Werkstück kommt. Dieser diskontinuierliche Schnitt setzt dabei jedoch eine präzise Abstimmung der Parameter des Fräsvorganges – Schnittgeschwindigkeit v_c und Zahnvorschub f_z – mit den Ultraschallparametern – Resonanzfrequenz ω und Amplitude A_{us} – voraus. Die genannten Prozessparameter stellen demnach die wesentlichen Parameter für die ultraschallunterstützte Fräsbearbeitung dar. Die Prozessparameter Schnitttiefe a_p und seitliche Zustellung a_e stellen analog zu konventionellen Fräsvorgessen ebenfalls wichtige Prozessparameter zur Erzeugung hoher Bearbeitungsqualitäten dar.

2 Herausforderungen im Stand der Technik

Für die Implementierung der Ultraschallunterstützung in eine CNC-Fräsmaschine ist ein dediziertes System zur Erzeugung der mechanischen Schwingungen im Ultraschallfrequenzbereich $f_{us} > 20 \text{ kHz}$ notwendig. Kernelement dieses Systems ist die Sonotrode, welche die mechanischen Schwingungen verstärkt und zum Werkzeug überträgt. Der grundsätzliche Aufbau eines solchen Systems ist in Bild 1 a gezeigt. Sonotroden besitzen ein durch ihre Masse- und Steifigkeitsverhältnisse definiertes Eigenschwingverhalten in Form der Schwingungsmodus und der Resonanzfrequenz ω . Die Schwingcharakteristik dieses resonanten

Ultraschallsystems ist dementsprechend ebenfalls von den Massen- und Steifigkeitsverhältnissen der verwendeten Fräswerkzeuge abhängig. Da Werkzeuge mit unterschiedlichen Geometrien (zum Beispiel Länge L_w , Durchmesser D_w , Schneidenlänge L , Freischliffdurchmesser D_{Fr}) variierende Massen- und Steifigkeitsverhältnisse aufweisen, verändert sich die Resonanzfrequenz ω des Gesamtsystems, sobald ein Werkzeug gegen ein abweichendes Werkzeug ausgetauscht wird. Dies führt dazu, dass die auf das System abgestimmten Ultraschallparameter wie Resonanzfrequenz ω und Amplitude A_{us} nicht mehr den optimalen und angestrebten Werten entsprechen. Abweichungen dieser Parameter von den optimalen Werten haben erhebliche Konsequenzen für die Prozessstabilität, Werkzeugstandzeit und Qualität der erzeugten Werkstückoberfläche.

Aktuelle Ultraschallsysteme sind folglich auf spezifische Werkzeuge optimiert und besitzen somit eine festgelegte Resonanzfrequenz ω , welche sich nicht definiert verändern lässt. Kommerziell verfügbare Ultraschallsysteme sind mit einer integrierten Messfunktion ausgestattet, die eine Detektion dieses festgelegten Resonanzbereiches ermöglicht. Hierdurch kann der Resonanzbereich jedoch nicht verändert werden. Eine zielgerichtete Einstellung der beiden Ultraschallparameter Resonanzfrequenz ω und Amplitude A_{us} ist in aktuell verfügbaren Ultraschallsystemen zur Fräsbearbeitung demnach nicht möglich. In industriellen Anwendungen, die häufig den Einsatz verschiedener Werkzeuge erfordern – beispielsweise bei der Fertigung komplexer Bauteile oder der Durchführung unterschiedlicher Bearbeitungsschritte wie Schruppen und Schlichten – müsste für jedes Werkzeug ein individuelles Ultraschallsystem bereitgestellt werden. Dies führt nicht nur zu erhöhten Kosten durch die Notwendigkeit mehrerer spezialisierter Systeme, sondern auch zu längeren Rüstzeiten in der Fertigung. Weiterhin erfordern Werkstoffe mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften angepasste und materialoptimierte Ultraschallparameter. Da dies ebenfalls nicht durch ein konventionelles Ultraschallsystem umgesetzt werden kann, ergibt sich hier eine eingeschränkte Flexibilität des Systems im fertigungstechnischen Kontext.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die fehlende Möglichkeit, die Schwingcharakteristik des Ultraschallsystems unabhängig von der Werkzeuggeometrie zu definieren, eine zentrale Herausforderung im Stand der Technik darstellt. Eine technologische Lösung, die eine flexible Anpassung der Resonanzfrequenz ω ermöglicht, ist daher essenziell, um die ultraschallunterstützte Zerspanung in der Breite der industriellen Fertigung zu etablieren.

3 Innovatives Konzept für die ultraschallunterstützte Zerspanung

3.1 Wirkprinzip

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird ein Konzept erläutert, welches Potenziale für die Lösung der dargestellten Herausforderungen bietet. Dieses Konzept adressiert die Entwicklung eines Ultraschallzerspansystems, welches in der Lage ist, sein Eigenschwingverhalten und damit seine Resonanzfrequenz ω ohne den Austausch einzelner Komponenten stufenlos variieren zu können. Das Funktionsprinzip des Ultraschallsystems mit einstellbarer Resonanzfrequenz ω basiert dabei auf der Möglichkeit, die geometrischen Eigenschaften der Sonotrode während des Betriebs präzise anzupassen. Der innovative Kern dieses Konzepts liegt dabei in der Entwicklung einer zweiteiligen Sonotrode, bei welcher die Positionierung beider Sonotrodenteile im Bereich $\Delta l_s = 20 \text{ mm}$ variiert werden kann. Dadurch kann die Länge l_{vib} des sich in Schwingung befindlichen Teils des Systems angepasst werden, wodurch das Eigenschwingverhalten in Form der Resonanzfrequenz ω zielgerichtet eingestellt werden kann. Die Amplitude A_{us} kann hingegen durch die Anpassung des elektrischen Stromes I , welcher die Piezokristalle in Oszillation versetzt, definiert werden. Im Ergebnis ergibt sich die Möglichkeit, beide Ultraschallparameter – Resonanzfrequenz ω und Amplitude A_{us} – weitestgehend unabhängig voneinander einzustellen zu können.

Diese Verstolloperation kann dabei ohne eine Demontage oder einen Austausch einzelner Komponenten durchgeführt werden. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, für abweichende Werkzeuggeometrien – beispielsweise durch unterschiedliche Auskraglängen infolge eines Werkzeugwechsels – eine konstante Resonanzfrequenz ω sicherzustellen. Weiterhin können unterschiedliche Ultraschall-Prozesstechnologien bei gleichbleibenden Werkzeugen abgebildet werden. Beispielsweise ist es möglich, Schrubb- und Schlichtoperationen mit einem Werkzeug darzustellen, indem die Ultraschallparameter Resonanzfrequenz ω und Amplitude A_{us} angepasst werden.

3.2 Komponenten des Systems

Die Umsetzung des beschriebenen Konzeptes erfordert zwei Hauptbaugruppen, deren Aufbau nachfolgend näher erläutert wird. Das bereits eingeführte Sonotrodensystem bildet das Herzstück des entwickelten Konzepts. Die grundlegende Struktur des Sonotrodenmoduls, welches als Werkzeughalter ausgeführt ist und folglich analog eines konventionellen Werkzeughalters in die Maschinenspindel eingewechselt werden kann, ist in Bild 1 b gezeigt. Das Kernelement des zweiteiligen Sonotrodenmoduls ist dabei die Schnittstelle zwischen beiden Komponenten. Die Anforderungen an diese betreffen die Steifigkeit k_{rad} in radialer Richtung des Moduls sowie die Grenzflächendämpfung ζ . Der radia- len Steifigkeit k_{rad} kommt dabei eine wichtige Bedeutung zu, da

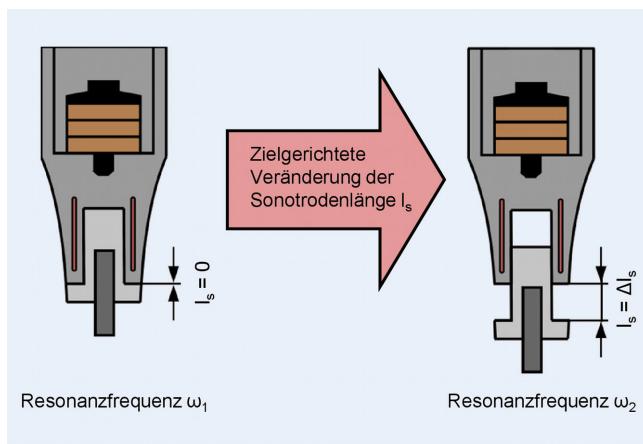


Bild 2. Schematische Darstellung der stufenlosen Einstellung einer definierten Sonotrodenlänge l_s . Graifik: Eigene Darstellung

diese die Prozessstabilität des Gesamtsystems hinsichtlich der erreichbaren Drehzahl n maßgeblich limitiert.

Die zweite kritische Anforderung betrifft die Grenzflächendämpfung ζ , deren Wert die Effizienz der Übertragung der mechanischen Schwingung definiert. Sollte die Grenzflächendämpfung ζ zu großen Werte annehmen, würde die Amplitude A_{us} am Fräswerkzeug stark reduziert werden, woraus eine erhebliche Verminderung der Effizienz E_{sys} des Gesamtsystems resultieren würde. Der hierfür genutzte Lösungsansatz basiert auf der Nutzung einer fluidgefüllten Innenstruktur, welche durch das Aufbringen eines hydraulischen Druckes eine Spannwirkung zwischen beiden Sonotrodenteilen erzeugt. Vergleichbar ist diese Funktionalität mit einem Hydrodehnspannfutter.

Da der Prozess des Einstellens der Sonotrodenlänge l_s ein hohes Maß an Präzision voraussetzt, kann dies nicht in manueller Form erfolgen. Zu diesem Zweck wird als zweite wichtige Hauptbaugruppe ein dediziertes Verstellmodul entwickelt, welches im Randbereich des Arbeitsraumes der Werkzeugmaschine positioniert wird. Dieses Modul ist in der Lage, die Sonotrodenlänge l_s präzise einzustellen, die resultierende Schwingungscharakteristik messtechnisch zu erfassen und somit die Verstolloperation zu verifizieren. Hierfür wird ein laserbasiertes Messsystem in das Verstellmodul integriert. Dieses Konzept bietet den Vorteil, dass die zum Einstellen der Resonanzfrequenz ω notwendige elektronische Hardware nicht in den rotierenden Werkzeughalter integriert werden muss. Dementsprechend kann die Konstruktion des adaptiven Ultraschallwerkzeughalters erheblich einfacher gestaltet werden, wodurch sich große Vorteile bezüglich einer verbesserten Wuchtgüte G und einer entsprechend gesteigerten biegekritischen Drehzahl n_{krit} ergeben. Weiterhin können aufgrund des vereinfachten konstruktiven Aufbaus des Ultraschallwerkzeughalters dessen Herstellungskosten deutlich reduziert werden.

Die durchzuführenden Schritte zum Einstellen einer neuen Resonanzfrequenz ω werden nachfolgend genauer ausgeführt. Hierzu kann – nachdem die Maschinenspindel gestoppt wurde – der Werkzeughalter zum Verstellmodul verfahren und über diesen positioniert werden. Anschließend kann das Werkzeug in z-Richtung in das Verstellmodul eingefahren werden, sodass eine Messung der aktuell vorliegenden Amplitude A_{us} an der Werkzeugspitze ermöglicht wird. Dann wird durch Einkoppeln des unteren Teils der adaptiven Sonotrode eine formschlüssige Verbindung zwischen Sonotrode und Verstellmodul realisiert. Nachfol-

gend wird der hydraulische Druck innerhalb der fluidgefüllten Kammer reduziert, sodass die Klemmwirkung zwischen beiden Sonotrodenkomponenten aufgehoben wird. Nun wird mithilfe der Maschinenspindel eine Verstellung der Sonotrodenlänge l_s um einen definierten Betrag Δl_s durchgeführt. Dies kann je nach Ausführung der adaptiven Sonotrode mithilfe einer linearen oder rotatorischen Bewegung ausgeführt werden. Nachdem in umgekehrter Reihenfolge der hydraulische Druck wiederhergestellt und die Kopplung zwischen Verstellmodul und Sonotrode gelöst wurde, kann die resultierende Schwingungscharakteristik erfasst werden. Anschließend kann der Fräsvorgang mit den optimierten Ultraschallparametern fortgesetzt werden. Die ideale Sonotrodenlänge l_s für das Erzielen einer gewünschten Resonanzfrequenz ω kann dabei durch vorgelegte Simulationen ermittelt werden. Der Rüstungsaufwand zum Verstellen der Sonotrodenlänge l_s kann demnach effizient mit signifikanter Zeiteinsparung umgesetzt werden.

4 Fazit und Ausblick

Das gezeigte Konzept bietet somit die Möglichkeit, die Ultraschallparameter Resonanzfrequenz ω und Amplitude A_{us} unabhängig voneinander einzustellen, ohne die Notwendigkeit den Ultraschallwerkzeughalter oder Teile dessen wechseln zu müssen. Hierdurch wird es ermöglicht, für jede Bearbeitungsoperation optimale Ultraschallparameter einzustellen, welche auf den Werkstoff, die Werkzeuggeometrie und die Fräsvparameter angepasst sind. Dementsprechend können die beschriebenen Vorteile der ultraschallunterstützten Zerspanung in einem sehr großen Prozessfenster genutzt werden. Folglich resultiert ein erheblich gesteigertes Maß an Flexibilität beim Einsatz ultraschallunterstützter Systeme zur Fräsbearbeitung. Besonders Industriezweige, in denen die spanende Fertigung komplexer Komponenten aus hartspröden Werkstoffen einen wichtigen Teil der Wertschöpfung darstellt, können wesentlich von dieser Entwicklung profitieren. Derartige Anwendungsfälle treten insbesondere in Hightech-Industrien, wie beispielsweise der Elektronik, Medizintechnik und Luft- und Raumfahrt auf. Das Gesamtsystem stellt demnach einen Fortschritt dar, da es eine flexible und wirtschaftliche Nutzung der ultraschallunterstützten Zerspanung ermöglicht. Da sich die vorgestellte Technologie zum aktuellen Zeitpunkt im Konzeptstatus befindet, sind weitergehende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig, um diese in die industrielle Anwendung bei der Zerspanung hartspröder Werkstoffe zu überführen. Diese betreffen vornehmlich Forschungsarbeiten mit dem Ziel der Ermittlung von Parameterempfehlungen für die Nutzung des Systems mit unterschiedlichen Werkstoffen sowie Werkzeuggeometrien. Die Validierung der Systemfunktionalität wird mithilfe von Fräsversuchen realisiert, bei denen der Einfluss der Kontaktunterbrechung zwischen Werkzeugschneide und Werkstoff auf die resultierende Prozesskräfte F_p untersucht wird. Die Prozessbereiche, in denen es zu einer Kontaktunterbrechung kommt, werden dabei vorhergehend rechnerisch ermittelt und anschließend experimentell verifiziert. Als Zielgrößen für die Bewertung des Einflusses der Ultraschallunterstützung dienen hierbei die entstehenden

Prozesskräfte F_p sowie die Ausbrüche an Kantenstrukturen des Werkstückes. Die Versuchsergebnisse werden abschließend genutzt, um eine Korrelation zwischen den Ultraschallparametern – Resonanzfrequenz ω und Amplitude A_{us} – sowie den relevanten Zerspanungsparametern Schnittgeschwindigkeit v_c und Zahnvorschub f_z mit den Bearbeitungsergebnissen herzustellen und auf dieser Basis optimale Rahmenbedingungen für den Einsatz des Ultraschallsystems zu identifizieren.

LITERATUR

- [1] Jambhulkar, N.; Santosh, J.; Raut, A.; Bhoneja, B.: A review on surface modification of dental implants among various implant materials. *Materials Today: Proceedings* 72 (2023), S. 3209 – 3215
- [2] CeramTec: Keramische Kübler in der E-Mobilität. Plochingen. Firmenschrift. 2021
- [3] Composites United e.V.: Positionspapier Ceramic Composites 2021. Augsburg. Firmenschrift. 2021. Internet: https://composites-united.com/wp-content/uploads/2022/04/Ceramic_Composites_Positionspapier_Web.pdf. Zugriff am: 20.01.2025
- [4] Bulla, B.: Ultrapräzisionszerspanung von Nanokorn-Hartmetall mit monokristallinen Diamantwerkzeugen. Aachen, RWTH Aachen, Diss. Aachen: Apprimus, 2013
- [5] Nath, C.; Rahman, M.: Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008), S. 965 – 974
- [6] Rinck, P.; Gueray, A.; Kleinwort, R.; Zaeh, M.: Experimental investigations on longitudinal-torsional vibration-assisted milling of Ti-6Al-4V. *The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2020) 108, S. 3607 – 3618
- [7] Yang, Z.; Zhu, I.; Zhang, G.; Ni, C.; Lin, B.: Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials. *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture* (2020) 156, S. 103 – 138



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

Foto: Fraunhofer IPK

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin
www.ipk.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Mitchell Polte

Toni Hocke, M.Sc.

Julius Tschoepel, M.Eng.
julius.tschoepel@iwf.tu-berlin.de
Tel. 030 / 314 77087

Technische Universität Berlin
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF
Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin
www.tu.berlin/iwf

LIZENZ



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