

# Keramikschiweißen mit Ultrakurzpulslasern

Daniel Conrad\*, Maria Reichenbacher\*, Marcella Münch\*\*

\*ifw Jena - Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH, Jena, Deutschland

\*\*Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena Deutschland

*Das Fügen von gesinterter technischer Keramik ist eine Herausforderung, insbesondere, wenn die Fügezone die gleichen Eigenschaften wie die Keramik ausweisen soll. Am ifw Jena werden daher Schweißversuche an intransparenten Keramiken mit Ultrakurzpulslasern durchgeführt. Aufgrund der schmalen Schweißnähte ( $< 100 \mu\text{m}$ ) und der kurzen Prozesszeit können Risse sowie Poren vermieden und eine signifikante Erwärmung des Grundkörpers ausgeschlossen werden. Potentiell soll es dadurch ermöglicht werden auch thermisch empfindliche Komponenten in der Keramik versiegeln zu können.*

*Joining sintered technical ceramics is a challenge, especially if the joining zone is to exhibit the same properties as the ceramic. At ifw Jena, welding tests are therefore carried out on intransparent ceramics with ultrashort pulse lasers. Due to the narrow weld seams ( $< 100 \mu\text{m}$ ) and the short process time cracks and pores can be avoided and significant heating of the base body can be excluded. This should potentially make it possible to seal thermally sensitive components in the ceramic.*

## 1. Einleitung

Technische Keramik ist eine Stoffgruppe mit herausragenden Eigenschaften wie hoher Härte, Abriebfestigkeit, chemischer Resistenz, elektrischer Isolation und Durchschlagsfestigkeit. Je nach Werkstoff können diese auch variabel eingestellt sein. Aufgrund der genannten Charakteristika wird technische Keramik in fast allen Technologiebereichen eingesetzt [1, 2]: Keramische Wälzlager können sehr hohe Lasten aufnehmen und zeigen nur minimalen Verschleiß. Implantate für Knochen, Gelenke und Zähne können aus Keramik gefertigt werden und zeigen neben geringem Verschleiß zusätzlich eine gute Bio-Verträglichkeit. Im Hochtemperaturbereich, z. B. in Öfen und Turbinen, können spezielle Keramikwerkstoffe den Einsatztemperaturen von bis zu  $2500^\circ\text{C}$  ohne Verzug oder Ermüdung standhalten. In der Elektrotechnik und Elektronik kommen Keramikbauteile als Isolatoren oder in Kondensatoren zum Einsatz. Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), welches mit einem Marktanteil von 80 % der wichtigste Vertreter der keramischen Werkstoffe ist, kommt beispielsweise in der chemischen Industrie aufgrund seiner Korrosionsresistenz vielfach als Leitungs- und Wandungsmaterial zum Einsatz. Darüber hinaus ermöglichen neuere Keramikmembranen die energieeffiziente Filterung von Flüssigkeiten oder sogar Gasmolekülen [3].

Für die Herstellung keramischer Bauteile aus einer keramischen Rohmasse ist ein energie- und zeitaufwendiger Brennprozess erforderlich um zum einen die hohen Sinteremperaturen zu erreichen und gleichzeitig thermisch induzierte Spannungen gering zu halten. Daher kann es gerade bei komplizierten Bauteilgeometrien mit großen Abmessungen vorteilhaft sein, ein Bauteil aus mehreren kleinen und fertig gebrannten Komponenten zu fügen anstatt komplett zu brennen. Dadurch können

kleinere Ofenanlagen verwendet werden und die Brenndauer sowie die Energiekosten minimiert werden.

Um die einzelnen Komponenten zusammenzufügen werden geeignete Fügeverfahren benötigt, welche den Anforderungen im Einsatz gerecht werden. Etablierte Verfahren sind das Kleben und das Löten. Diese haben jedoch entweder bezüglich ihrer späteren Anwendung oder bezüglich des Fügeprozesses selbst verschiedene Nachteile. So kann es z. B. sein, dass die Fügeverbindungen für bestimmte Anwendungen nicht ausreichend gasdicht oder temperaturbeständig sind. Andererseits können aber auch temperaturempfindliche Komponenten (z. B. Elektronik) verbaut sein, sodass ein ofengebundener Fügeprozess gar nicht mehr möglich ist. In diesen Fällen sind Fügeverfahren mit hohen Temperaturen oder mit Zusatzwerkstoffen wie Klebstoff oder Lot ungeeignet. Stattdessen muss eine stoffschlüssige Fügetechnologie angewendet werden, die mit begrenztem Wärmeeintrag und ohne Zusatzwerkstoffe auskommt und eine Fügeverbindung realisiert, die ähnliche Eigenschaften wie das Grundmaterial aufweist.

Daher wird am ifw Jena im Rahmen eines F&E-Projektes das Mikroschweißen intransparenter keramischer Werkstoffe mittels Ultrakurzpulslaser untersucht. Ziel ist die Herstellung gasdichter Schweißverbindungen an den vielseitig eingesetzten Keramikwerkstoffen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und Aluminiumnitrid ( $\text{AlN}$ ).

Da keramische Werkstoffe ähnliche mechanische und thermische Eigenschaften (sprödhart, hohe Schmelztemperatur) wie Gläser aufweisen, wird in der Anwendung dieses Fügeprozesses ein großes Potential mit vergleichbaren Vorteilen wie beim UKP-Fügen von Gläsern [4] gesehen. So könnten z. B. thermisch induzierte Spannungen, die von diesen Materialien nur begrenzt toleriert werden, vermieden werden, da der Fügeprozess

mit seiner extrem kurzen Aufschmelz- und Abkühldauer sowie der sehr kleinen Schmelzvolumina die Bauteile kaum erwärmt. Während beim Einsatz von Nanosekundenlasern zum Laserschweißen von Keramik die Bauteile teilweise temperiert werden müssen [5, 6], oder die Fügeverbindungen aufgrund von Mikrorissen nicht gasdicht sind [7], könnten mit dem Einsatz von Ultrakurz-pulsLasern solide Mikronähte erzeugt werden. Im Gegensatz zum Fügen von Gläsern gibt es zu keramischen Materialien jedoch bisher nur sehr wenige Veröffentlichungen, z. B. Penilla et. al. [8]. Daher wird der Prozess am ifw Jena an keramischen Werkstoffen vorrangig grundhaft erforscht.

Zu den erwarteten Vorteilen des Fügeverfahrens zählen der Verzicht auf Zusatzwerkstoffe (Kosteneinsparung, kein Ausgasen), nahezu identische Eigenschaften der Fügezone mit dem Grundmaterial, minimale thermische Belastung der Bauteile, eine kurze Prozessdauer sowie ein geringer Energiebedarf im Vergleich zum Ofenprozess. Außerdem besteht die Möglichkeit, Bauteile zu fügen, die für kleinere Öfen zu groß sind. Auf der anderen Seite sind Anwendungsgrenzen dieses Prozesses hinsichtlich der relativ kleinen Schmelzvolumina und der starken Streuung der Laserstrahlung in der kristallinen Materialstruktur zu erwarten, wodurch nur begrenzte Einschweißtiefen erreicht werden können. Aus demselben Grund wird die Herstellung von Überlappverbindungen nur begrenzt möglich sein und das Verfahren vorrangig für Stumpfstoß-Verbindungen angewendet werden können.

## 2. Experimentelle Untersuchungen

Die bisherigen Untersuchungen wurden schwerpunktmäßig an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Keramik sowie an AlN-Keramik als wichtige Vertreter für die Gruppen der Oxid- und Nitridkeramiken durchgeführt. Darüber hinaus ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Werkstoffe, wie beispielsweise ZrO<sub>2</sub>- oder Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Keramik, geplant.

Tabelle 1: Ausgewählte Materialkennwerte der verwendeten Proben. [9]

Materialkennwerte	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Keramik	AlN-Keramik
Biegefestigkeit [MPa]	280 – 370	300 – 460
Bruchzähigkeit [MPa m <sup>1/2</sup> ]	3,0 – 5,0	2,75 – 6,0
Wärmeleitfähigkeit (20 °C) [W/m K]	15 – 27	80 – 100
Wärmeausdehnungs-koeffizient [1 x 10 <sup>-6</sup> /°C]	7,5 – 9,1	3,3 – 5,5
Einsatztemperatur [°C]	1200 – 1800	800

Zur Identifizierung des materialspezifischen Prozessfensters für einen Schweißprozess wurde das *Hyper-Rapid 25*-Lasersystem der Firma Coherent genutzt. Das Lasersystem besitzt eine Pulsdauer von 7 bis 9 ps und ermöglicht die Variation der Wellenlänge (1064 nm, 532 nm und 355 nm), der Pulsrepetitionsrate (100 kHz – 1000 kHz) und der Pulsenergie (< 200 µJ). Zur Fokussierung wurde ein F-Theta Objektiv mit einer Brennweite von 80 mm verwendet und damit ein Fokusedurchmesser von 16 µm (1/e<sup>2</sup>) erreicht. Zur Strahlablenkung wurde das Glavanometer-Scansystem HurryScan der Scanlab GmbH genutzt.

Um die prinzipiellen Wechselwirkungen der Laserstrahlung mit den verschiedenen Keramiken zu untersuchen und Parameterbereiche zur Erzeugung einer Schmelzphase zu identifizieren, wurden zunächst Punktschweißversuche durchgeführt. Dabei trifft ein definierter Laser-Pulszug auf die Werkstückoberfläche, ohne dass eine Relativbewegung ausgeführt wird. Neben der Pulsenergie und der Pulsdauer wurden hier vor allem die Auswirkung des zeitlichen Einflusses über die Repetitionsrate sowie die Anzahl der Laserpulse hinsichtlich der Entstehung einer Schmelzphase untersucht. Treffen genügend Pulse in zeitlich kurzen Abständen auf das Material, kommt es zur Wärmeakkumulation und zur Ausbildung einer schmelzflüssigen Phase, welche für den späteren Fügeprozess gewünscht ist. Das dafür notwendige Prozessfenster wird durch verschiedene andere Wechselwirkungsprozesse begrenzt. So kommt es bei der UKP-Bearbeitung im Falle hoher Pulsenergien und niedriger Pulsfolgefrequenzen zunächst zur „kalten Ablation“, welche sich durch einen präzisen Materialabtrag ohne Aufschmelzen auszeichnet. Wird hingegen zu viel Wärme in einem Punkt konzentriert, kommt es zum Verdampfen und damit zu einem ungleichmäßigen Schmelzaustrieb. Durch schrittweise Steigerung der Pulsenergie bei verschiedenen Parameterkombinationen wurden in den Untersuchungen die Schwellen für das Einsetzen dieser Prozesse für Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- und AlN-Keramik ermittelt und im ‚optimalen‘ Parameterbereich Schmelzlinien erzeugt, deren Größe in der Dimension des Laserspots liegt. Durch Variation weiterer Prozessparameter, wie Pulsanzahl, Pulsdauer, Pulsrepetitionsrate und Fokusslage wurden geeignete Parameterbereiche identifiziert. Anschließend wurden ausgewählte Parameterkombinationen auf Linienschweißversuche übertragen und der Einfluss der Scangeschwindigkeit auf die entstehende Schmelzzone untersucht sowie erste Stumpfstoßschweißungen realisiert.

Die so erzeugten Schmelzlinien wurden anschließend vermessen und bewertet. Bewertungskriterien waren dabei u. a. der Durchmesser und die Tiefe des Schweißpunktes, seine Form an der Oberfläche sowie das Auftreten von Rissen und Poren. Zum Einsatz kam hierzu u. a. ein Laserscanning-Mikroskop (LSM) der Firma Keyence (VK-X100), um die Rauheit der Fügeflächen sowie das Oberflächenprofil der Schmelzlinien zu bestimmen. Mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM)

wurde zudem die Oberfläche der Schmelzzonen auf Mikrorisse und Poren untersucht und die Geometrie sowie die Struktur der Fügeverbindungen im Querschnitt (Anschliff) begutachtet.

### 3. Ergebnisse

Bevor mit den eigentlichen Untersuchungen zum Schmelzen bzw. Schweißen der Keramikwerkstoffe mittels UKP-Laser begonnen wurde, wurden die Versuchsmaterialien charakterisiert. Dies ist notwendig, um einen etwaigen Einfluss von Eigenschaften, wie etwa der Materialdicke, der Materialzusammensetzung oder auch der Oberflächengestalt (Rauheit, Gefügestruktur) auf den Schweißprozess bzw. das erzielte Schweißergebnis nachweisen zu können. Die zur Verfügung stehenden  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramiksubstrate haben Materialdicken zwischen 0,6 mm und 3 mm, eine Reinheit von ca. 99 %, sowie eine stärker variierende Rauheit von  $R_a = 0,4 - 1 \mu\text{m}$ .

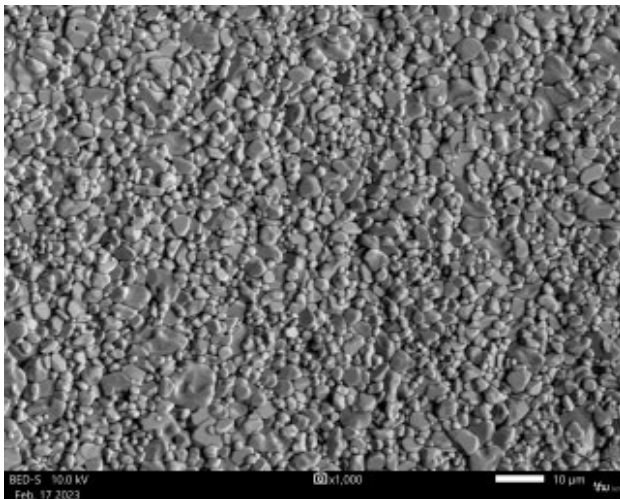


Abbildung 1: REM-Aufnahme einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramikprobe.

Ziel der experimentellen Untersuchungen war es, zunächst für die Werkstoffe  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - und AlN-Keramik Parameterbereiche zu identifizieren, bei denen das Material in die schmelzflüssige Phase übergeht und als konkav oder konvex geformte Schmelzlinse erstarrt. Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich auf die Untersuchungen mittels ps-Laser (Pulsdauer: 9 ps, Wellenlänge: 1064 nm) In den Experimenten wurden folgende Prozessparameter variiert:

- Pulsanzahl: 10 – 600.000
- Repetitionsrate: 100 – 1000 kHz
- Pulsenergie: 9 – 18,1  $\mu\text{J}$

Die erzielten Oberflächenveränderungen sind im Wesentlichen durch eine Mischung aus Ablation und Schmelzaufwurf charakterisiert. Geometrische Kenngrößen des Oberflächenprofils, wie die Tiefe des entstandenen Kraters oder die Höhe und der Durchmesser des Schmelzaufwurfes wurden mittels LSM bestimmt und in Bezug auf die Prozessparameter bewertet.

Die Auswertung der Versuche zeigte, dass es mit steigender Anzahl an Laserpulsen, welche auf die Materialoberfläche einwirken, zunehmend zur Akkumulation der Energie und folglich zur Ausbildung eines Kraters mit ringförmigem Schmelzaufwurf kommt (Abbildungen 2 und 3). Form und Größe des Schmelzrings variieren dabei sehr stark. Die Vergrößerung des Krater- bzw. Schmelzring-Durchmessers verhält sich bei der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik zunächst proportional ( $< 6000$  Pulse) zur Pulsanzahl bzw. der Lasereinwirkdauer. Bei weiterer Erhöhung der Pulsanzahl (bis 600.000 Pulse) bleiben die Durchmesser dann weitestgehend konstant.

Im Vergleich sind die Oberflächenveränderungen hinsichtlich Durchmesser und Tiefe an der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramikprobe ausgeprägter als im Falle von AlN. Diesbezüglich zeigen die Versuchsergebnisse auch, dass die AlN-Keramik erst bei höheren Pulsanzahlen Schmelze bildet. Eine Ursache für das unterschiedliche Schmelzverhalten der beiden Materialien könnte die deutlich bessere Wärmeleitung der AlN-Keramik ( $\geq 80 \text{ W/mK}$ ) gegenüber der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik ( $\geq 15 \text{ W/mK}$ ) sein [9]. Während die akkumulierte Wärme in der AlN-Keramik besser in die umgebenden Materialbereiche abgeleitet werden kann, kommt es bei der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik eher zu einem Wärmestau und folglich bereits früher zum Erreichen der Schmelztemperatur.

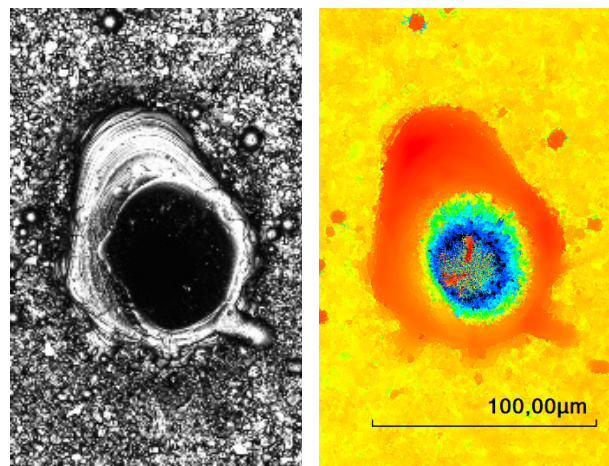


Abbildung 2: LSM-Aufnahme einer Schmelzlinse in  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik; rechts: Höhenabstufung in Falschfarben dargestellt (Repetitionsrate 1000 kHz, Pulsanzahl 300.000 bei max. nutzbarer Pulsenergie 18,1  $\mu\text{J}$ ).

Bei hoher Pulsanzahl ( $> 100.000$ ) und entsprechend langer Lasereinwirkdauer konnten Krater erzeugt werden, deren Tiefe das 2 – 3-fache des Kraterdurchmessers beträgt. Dieser Effekt könnte vorteilhaft sein, um ähnlich wie beim „klassischen“ Laserschweißen mittels Keyhole eine größere Einschweißtiefe bzw. einen großen Verbindungsquerschnitt zwischen den Fügepartnern zu erzielen. Ob dieser Effekt beim Schweißen mittels UKP-Laser ebenfalls genutzt werden kann, müssen jedoch die zukünftigen Schweißversuche erst noch zeigen.



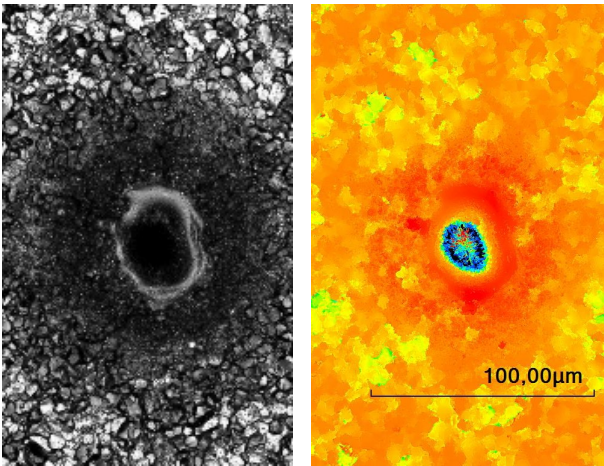


Abbildung 3: LSM-Aufnahme einer Schmelzlinse in AlN-Keramik; rechts: Höhenabstufung in Falschfarben dargestellt (Repetitionsrate 1000 kHz, Pulsanzahl 300.000 bei max. nutzbarer Pulsenergie 18,1 µJ).

Neben der Pulsanzahl hat auch die Repetitionsrate einen wesentlichen Einfluss auf die Schmelzbildung. In den Parameteruntersuchungen wurden für beide Materialien Pulsfrequenzen von 100 kHz, 600 kHz und 1000 kHz eingestellt. Die übrigen Prozessparameter wurden konstant gehalten. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass bei einer relativ geringen Repetitionsrate von 100 kHz selbst bei hohen Pulsanzahlen bzw. längerer Einstrahldauer keine Schmelze in den Versuchsmaterialien erzeugt werden kann. Erst bei Repetitionsraten von 600 kHz und 1000 kHz trat ausreichend Schmelze auf. Dieser Effekt der sogenannten „Puls-zu-Puls-Wärmeakkumulation“ ist begründet in der zunehmenden Erwärmung des Werkstücks im Bereich der Lasereinwirkzone, da die eingebrachte Energie in den kürzeren Zeitabständen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Laserpulsen nicht vollständig in die umgebenden Materialbereiche abgeleitet werden kann. Die Versuchsergebnisse zeigen weiterhin, dass mit steigender Repetitionsrate der Durchmesser der Schmelze sowie die Abtragtiefe zunehmen. In den nachfolgenden Abbildungen 4 und 5 sind die erzielten Durchmesser der Schmelzlinse in Abhängigkeit von der Pulsanzahl und der Repetitionsrate dargestellt.

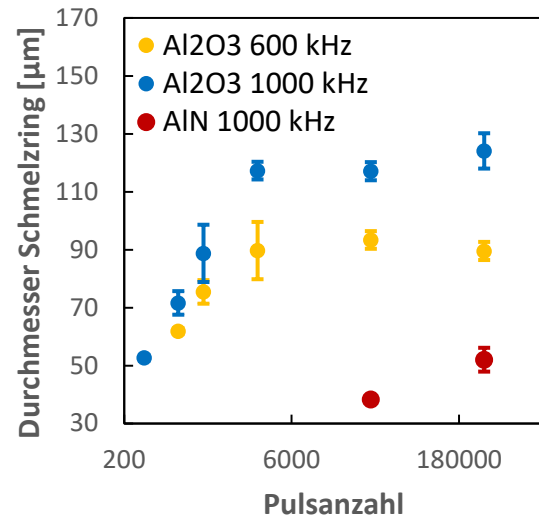


Abbildung 4: Max. Schmelzringdurchmesser von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- bzw. AlN-Keramik bei verschiedenen Repetitionsraten und max. nutzbarer Pulsenergie.

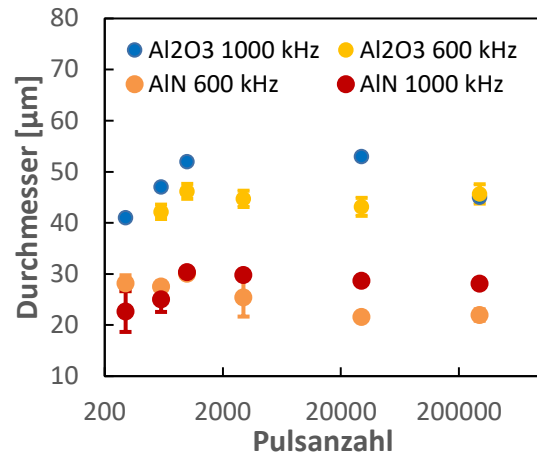


Abbildung 5: Max. Durchmesser des Abtrags von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- bzw. AlN-Keramik bei verschiedenen Repetitionsraten und max. nutzbarer Pulsenergie.

Ausgehend von den Ergebnissen der punktförmigen Schmelzversuche werden in den laufenden Untersuchungen Blindschweißnähte erzeugt. Dabei kommen mit der Vorschubgeschwindigkeit und der Pulsüberlappung zwei weitere miteinander verknüpfte Prozessparameter hinzu, deren Einfluss auf das Schmelzergebnis derzeit näher untersucht wird.

Erste Ergebnisse der Parameteruntersuchung an Blindschweißnähten in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Keramik zeigen, dass der Schmelzprozess von einzelnen Punkten auf linienförmige Konturen übertragbar ist. Die Schweißgeschwindigkeit wurde zwischen 10 mm/s und 60 mm/s variiert. In Abbildung 6 sind die erzeugten Schmelzspuren dargestellt. Die Versuche zeigen, dass bei relativ geringen Geschwindigkeiten (< 20 mm/s) Material ablatiert wird, was eine leichte Grabenbildung zur Folge hat, aber auch viel Material erschmolzen wird, wodurch eine relativ breite Schmelzspur entsteht. In der Schmelzspur sowie in deren Umgebung können z. T. größere Schmelzperlen

beobachtet werden, was für den Auswurf größerer Materialbestandteile spricht. Bei höheren Geschwindigkeiten ( $> 40 \text{ mm/s}$ ) tritt ebenfalls Schmelze auf, jedoch ist die Schmelzspur hier schmaler und wird regelmäßig von kleinen, aber tiefen Kratern unterbrochen. Vermutlich wurde auch hier ein Teil des Materials ablatiert oder zumindest verlagert. Die optimalen Prozessbedingungen zur Erzeugung einer kontinuierlichen, gleichmäßigen Schmelzspur finden sich offenbar nur in einem schmalen Prozessfenster ( $25 \text{ mm/s} - 35 \text{ mm/s}$ ) und müssen in weiteren feinstufigen Parameteruntersuchungen ermittelt werden. Die ersten Experimente hierzu zeigten bereits, dass die Entstehung von Schmelze erst ab einer bestimmten Pulsenergie bzw. Laserfluenz möglich ist. Während bei einer Laserfluenz von  $4,5 \text{ J/cm}^2$  noch überwiegend Ablation zu beobachten war, konnte mit  $9 \text{ J/cm}^2$  bereits überwiegend Schmelze erzeugt werden. Dieser Effekt hängt mit der oben bereits erläuterten Wärmeakkumulation zusammen, die entweder oberhalb einer bestimmten Laserfluenz oder unterhalb eines bestimmten zeitlichen Pulsabstands auftritt. Die je Laserpuls eingebrachte und im Material in Wärme umgewandelte Energie kann in diesen Fällen nicht mehr vollständig in die Umgebung abgeleitet werden. Dadurch kommt es im Bereich der Lasereinwirkzone zur Wärmeakkumulation und Erwärmung bis zur Schmelze des Materials. Ist die eingetragene Energie dagegen relativ gering, wird das Material lediglich ablatiert, reicht aber nicht aus, um das Material stärker zu erwärmen. Die Schwelle, ab der Wärmeakkumulation und folglich Schmelze auftritt, hängt neben dem Material noch von weiteren Faktoren ab und muss noch genauer ermittelt werden.

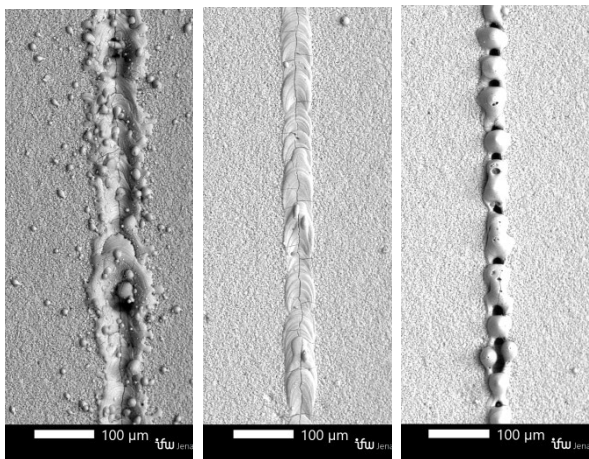


Abbildung 6: Blindschweißnähte in  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik mit Scangeschwindigkeiten von 10, 30 und  $50 \text{ mm/s}$  (v.l.n.r.); (Repetitionsrate  $1000 \text{ kHz}$ , Pulsenergie  $18,1 \mu\text{J}$ )

Im Rahmen der Untersuchungen an Blindschweißnähten wurden auch erste Fügeversuche durchgeführt. Durch Anwendung ausgewählter Prozessparameter konnte der Schmelzprozess von den Blindschweißnähten erfolgreich auf „echte“ Schweißnähte zum Überbrü-

cken des Fügspalts übertragen werden. In Abbildung 7 ist im oberen Bild mittig die Schweißnaht in der Draufsicht dargestellt. Das untere Bild zeigt in der linken und rechten Bildhälfte jeweils die aufgebrochenen Querschnittsflächen der beiden Fügepartner mit dem farblich gut sichtbaren Übergang von Schweißnaht (Tiefe:  $300 \mu\text{m} - 350 \mu\text{m}$ ) zum Grundmaterial.

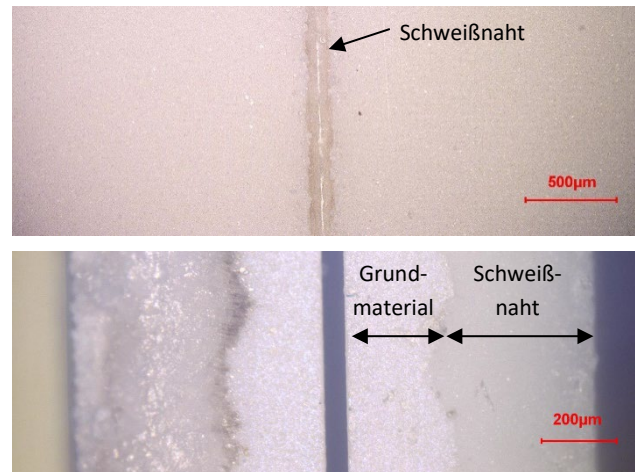


Abbildung 7: Erste Versuchsergebnisse zum Fügen von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik mittels UKP-Laserschweißprozess (oben: Draufsicht auf die Schweißnaht, unten: Bruchbild der Schweißnaht entlang der Fügezone).

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Prozessuntersuchungen konnten die in der Literatur veröffentlichten Ergebnisse zum lokalen Schmelzen keramischer Werkstoffe mittels UKP-Laserstrahlung bestätigt und erweitert werden. Für die Werkstoffe  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - sowie  $\text{AlN}$ -Keramik wurden geeignete Laserparameter zur Erzeugung von Schmelzlinien identifiziert. Inwieweit diese dazu geeignet sind, rissfreie, gasdichte Schweißverbindungen mit ausreichender Festigkeit zu realisieren, müssen die weiteren Untersuchungen im laufenden Forschungsprojekt zeigen.

In den laufenden Parameteruntersuchungen an Blindschweißnähten sollen die Einflüsse von Repetitionsrate, Pulsüberlappung und Schweißgeschwindigkeit noch detaillierter untersucht werden. Hierbei sind auch Experimente mittels Burstmodus vorgesehen. Des Weiteren sollen aber auch Möglichkeiten zur Vergrößerung der Schmelzspurbreite und -tiefe durch Fokusanpassung und Wobble-Bewegung untersucht werden.

Im Anschluss soll der Prozess auf zwei im Stumpfstoß zu schweißende Fügepartner übertragen werden. Dabei sollen neben den laserspezifischen Parametern dann auch die Schweißspaltbreite und -form untersucht werden. Ziel ist die Vergrößerung der Einschweißtiefe, um schließlich den Querschnitt und damit die Festigkeit der Schweißverbindung zu erhöhen.

## Danksagung

Das Forschungsvorhaben wird unter der Kennnummer 49MF220074 durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren bedanken sich hierfür im Namen des ifw Jena.



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

## Kontakt

ifw Jena - Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH

Ernst-Ruska-Ring 3, 07745 Jena

Daniel Conrad

dconrad@ifw-jena.de

## Literaturverzeichnis

- [1] J. Kriegesmann: DKG – Technische Keramische Werkstoffe., HvB-Verlag, Ellerau 2005, ISBN 978-3-938595-00-8
- [2] W. Kollenberg: Technische Keramik – Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik., Vulkan-Verlag, Essen 2004, ISBN 3-8027-2927-7
- [3] M. Schulze: „Keramik trennt Wasserstoff und Sauerstoff“, VDI Nachrichten vom 24.01.2014, abgerufen am 11.05.2022 unter <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/werkstoffe/keramik-trennt-wasserstoff-und-sauerstoff/>
- [4] Cvecek, Kristian, et. al. „A review on glass welding by ultra-short laser pulses.“, International Journal of Extreme Manufacturing 1.4 (2019): 042001
- [5] Exner, H., et al. "Further progress in laser welding of ceramics.", International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Vol. 1993. No. 1. Laser Institute of America, 1993.
- [6] C. Riviere, M. Robin, G. Fantozzi : Comparison between two techniques in laser welding of ceramics; 01.01.1994; HAL archives-ouvertes; HAL Id: jpa-00252692
- [7] Marcus Winkler: "Untersuchungen zum Mikro-Laserfügen von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", Bachelorarbeit an der Fakultät Ingenieurwissenschaften der Hochschule Mittweida, September 2016, Erstprüfer: Prof. Horst Exner
- [8] Penilla, E. H., et. al. "Ultrafast laser welding of ceramics.", Science 365.6455 (2019): 803-808
- [9] <https://www.coorstek.com/de/werkstoffe/ingenieurkeramikwerkstoffe> (abgerufen am 11.10.2023)