

# Abschlussbericht

## Fraktale Gestaltungsprinzipien zur definierten Einstellung der interlaminaren Festigkeit von Metall-Thermoplast-Verbunden

### 1 Allgemeine Angaben

DFG-Geschäftszeichen:	LA 1274/66-1	SCHU 1484/38-1
Projektnummer:	494736555	
Titel des Projekts:	Fraktale Gestaltungsprinzipien zur definierten Einstellung der interlaminaren Festigkeit von Metall-Thermoplast-Verbunden	
Namen der Antragsteller:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lampke	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Schubert
Dienstanschriften:	Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau	
	Institut für Werkstoffwissen- schaft und Werkstofftechnik Professur Werkstoff- und Oberflächentechnik Erfenschlager Straße 73 09125 Chemnitz	Institut für Werkzeugmaschi- nen und Produktionspro- zesse Professur Mikrofertigungs- technik Reichenhainer Straße 70 09126 Chemnitz
Berichtszeitraum:	01.06.2022 bis 31.12.2024	

## 2 Zusammenfassung / Summary

Im Zusammenhang mit dem Erreichen globaler Ziele, wie der Verringerung der Nutzung fossiler Energieträger sowie des Ausstoßes von Treibhausgasen, spielen Leichtbaukonzepte eine zentrale Rolle. Die Substitution metallischer Bauteile durch Metall-Kunststoff-Verbunde geht mit einer Reduzierung der Masse einher. Entsprechende Verbunde mit Duroplasten sind im Luftfahrtsektor etabliert. Der hohe Herstellungsaufwand steht allerdings einem breiten Einsatzbereich entgegen. Die Substitution durch Thermoplaste stellt einen geeigneten Lösungsansatz dar. Die resultierende Verbundfestigkeit kombiniert form-, stoff- sowie kraftschlüssige Anteile und beruht größtenteils auf mechanischer Verklammerung. Durch eine gezielte Bearbeitung bzw. Mikrostrukturierung des metallischen Verbundpartners sind eine Erhöhung der Verbundfestigkeit und eine Erweiterung des Einsatzspektrums möglich.

Im Projekt werden die Ziele verfolgt, Algorithmen zur Bewertung definiert eingestellter Oberflächenfeingestalten anhand der fraktalen Geometrie zu formulieren sowie die Zusammenhänge zwischen dieser und der interlaminaren Festigkeit unter Berücksichtigung chemischer Ober- bzw. Grenzflächeneigenschaften zu ermitteln. Durch die Oberflächenkonditionierung auf unterschiedlichen Skalierungsebenen sowie die Modifikation mit Organosilanen sollen die Gültigkeitsbereiche der getroffenen Annahmen identifiziert werden. Zur gezielten Steigerung der Verbundfestigkeit soll ein primär umformender Prozess mit Werkzeugen mit geometrisch bestimmten Schneiden zur definierten Einstellung der Oberflächenfeingestalt entwickelt werden.

Die Herstellung definierter Oberflächenfeingestalten erfolgt zunächst mittels Laserbearbeitung. Entsprechend bearbeitete Probekörper werden u. a. zur Bestimmung der Messbedingungen für die Erfassung der mikrogeometrischen Eigenschaften der Mikrostrukturen genutzt, um anschließend die fraktale Dimension bestimmen zu können. Ähnliche Probekörper werden ebenfalls für die Beschichtung mit haftvermittelndem Organosilan verwendet. Auf Basis der Scherfestigkeitsuntersuchungen können eine Steigerung der Verbundfestigkeit mit größer werdender Strukturdichte sowie eine weitere Erhöhung durch die Beschichtung mit Organosilan nachgewiesen werden. Zur Mikrostrukturierung des metallischen Fügepartners wird das Ultrasonic vibration assisted deformational machining (UVADM) entwickelt. Unter Nutzung von FE-Simulationen erfolgt die Auslegung der Werkzeuggeometrie sowie relevanter Bereiche der Bearbeitungsparameter. In den experimentellen Untersuchungen werden die Einflüsse der Werkzeuggeometrie und der Bearbeitungsbedingungen auf die Oberflächeneigenschaften ermittelt. Die Analyse zeigt eine hohe Übereinstimmung mit den Simulationen. Zusammenhänge

zwischen Oberflächenfeingestalt und Festigkeit des Metall-Kunststoff-Verbundes wurden ermittelt. Im Ergebnis der Untersuchungen kann festgehalten werden, dass die fraktale Dimension ein geeignetes Mittel zur quantitativen Bewertung der Zusammenhänge darstellt.

Lightweight design plays a key role in achieving global goals such as reducing fossil fuel consumption and greenhouse gas emissions. The substitution of metal components with metal-polymer composites entails a reduction in mass. Thermoset composites are already well established in the aerospace sector. However, the high manufacturing costs are an obstacle to a wider range of applications. Substitution with thermoplastics is one solution. The resulting interlaminar strength is based on mechanical interlocking and combines form-fit, material-fit and force-fit components. In particular, targeted processing or microstructuring of the metallic composite partner can increase composite strength and extend the range of applications.

The aim of the project is the development of algorithms for the evaluation of predefined surface microstructures based on fractal geometry. Furthermore, the correlations between the fractal geometry and the interlaminar strength, considering surface and interfacial chemical properties, should be determined. Surface conditioning at different scaling levels and modification with adhesion-promoting organosilanes are used to identify the ranges of validity of the assumptions made. In order to increase the interlaminar strength, a primarily forming process using tools with geometrically defined cutting edges for the specific adjustment of the surface microstructure based on fractal geometry is developed.

In this project, laser processing is initially used to create defined surface microstructures. Specimens processed in this way are used, among other things, to determine the measurement conditions for recording the geometric properties of the microstructures in order to subsequently calculate the fractal dimension. Similar specimens are also used for organosilane coating. Shear strength tests demonstrate an increase in interlaminar strength with growing microstructure density and a further increase with organosilane coating. Ultrasonic vibration assisted deformational machining (UVADM) is developed to microstructure the metallic joining partner. Tool geometry and relevant ranges of machining parameters are designed based on FE simulations. The influences of tool geometry and the machining conditions on the surface properties are determined in the experimental investigations. The analyses show a high degree of agreement with the simulations. Correlations between surface microstructure and interlaminar strength are determined. The fractal dimension is shown to be a suitable means of evaluating the relationships quantitatively.

### 3 Wissenschaftlicher Arbeits- und Ergebnisbericht

#### 3.1 Wissenschaftliche Fragestellungen und Ziele

Ausgehend vom Stand der Technik und Forschung sowie von eigenen Vorarbeiten und daraus abgeleiteten Hypothesen wurden für das Forschungsprojekt vier zum Teil voneinander abhängige Ziele formuliert. Hierzu zählen die Entwicklung von Algorithmen zur Bewertung definiert eingestellter Oberflächeneigenschaften anhand fraktaler Geometrie, mit der die Oberflächenfeingestalt charakterisiert wird, sowie die Erarbeitung des Verständnisses der Zusammenhänge zwischen fraktaler Geometrie und interlaminaer Festigkeit von Metall-Kunststoff-Verbinden unter Berücksichtigung chemischer Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften. Durch die Oberflächenkonditionierung auf unterschiedlichen Skalierungsebenen sowie die chemische Oberflächenmodifikation mit Organosilan soll der Gültigkeitsbereich der getroffenen Annahmen identifiziert werden. Ein weiteres Projektziel ist die simulationsbasierte Entwicklung eines Prozesses zur definierten Einstellung der Oberflächenfeingestalt durch ein primär umformendes Verfahren unter Nutzung von Werkzeugen mit geometrisch bestimmten Schneiden. Im Projekt wurde als metallischer Partner in allen experimentellen und simulativen Untersuchungen die Aluminiumlegierung EN AW-6082 genutzt.

#### 3.2 Ergebnisse von AP 1: Modellbasiertes Design der Feingestalt

Anhand von Krater- und Nutstrukturen, die durch gepulste Laserablation hergestellt wurden, konnte eine Strategie zur Bestimmung der fraktalen Dimension anhand optischer Licht- (OM) und Laserscanning-Mikroskopie (LSM) sowie von mikro-computertomografischer Analyse ( $\mu$ -CT) in 2D und 3D entwickelt werden [1].

Es wurde ein signifikanter Einfluss der Pixelauflösung während der Erfassung mit unterschiedlichen Methoden festgestellt. Eine Verringerung der Pixeldichte von 22,8 px/ $\mu$ m, die in den lichtmikroskopischen Aufnahmen über Fokuserweiterung erreicht wurde, auf 2,7 px/ $\mu$ m, wie sie bei der verwendeten  $\mu$ -CT-Anlage maximal möglich ist, führte zu einem Verlust von Strukturinformationen und verringerte die berechnete fraktale Dimension ( $D$ ) von 1,0851 auf 1,0471 bei der Struktur L8 (Puls-/Linienabstand: 40  $\mu$ m, Scans: 8). Bei der tieferen Struktur L24 (Puls-/Linienabstand: 40  $\mu$ m, Scans: 24) hingegen waren die beiden Werte für die fraktale Dimension nahezu gleich groß, s. Abbildung 1.

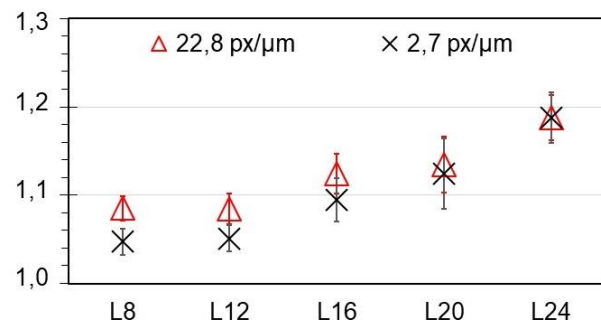


Abbildung 1: Fraktale Dimension  $D$  am Querschliff in Abhängigkeit von der Auflösung

Die Abhängigkeit von der Pixelauflösung ist jedoch nicht einheitlich und daher können die Ergebnisse für die fraktale Dimension nur dann sinnvoll verglichen werden, wenn sie von Erfassungstechnologien mit gleicher Auflösung stammen. Des Weiteren wurde eine Übertragbarkeit der 2D-Kennwerte auf den 3D-Fall nachgewiesen durch  $D_{3D} = D_{2D} + 1$ . Aufgrund des sehr hohen Aufwands von  $\mu$ -CT-Messungen, der begrenzten Auflösung und des limitierten Erfassungsbereichs, wird für 3D-Messungen die Nutzung des LSMs favorisiert. Allerdings sind dabei das charakteristische Rauschen und Limitierungen bei schmalen Profilelementen oder Hinterschneidungen zu berücksichtigen. Die Verwendung von Median-Signalfiltern kann bei hohen Strukturdichten (z. B. L24) zur Korrektur verwendet werden, wobei ähnliche Werte wie bei den  $\mu$ -CT-Messungen erreicht werden. Für weniger komplexe Feingestalten, z. B. L8, war der Unterschied zwischen ungefilterten LSM-Werten und  $\mu$ -CT-Ergebnissen marginal und die Verwendung des Medianfilters führte zum Informationsverlust, was sich in Werten der fraktalen Dimension nahe 2,0 äußerte. Angesichts dessen wird die höchste Zuverlässigkeit in der Bestimmung der fraktalen Dimension unter Berücksichtigung sämtlicher Hinterschnitte und bei vertretbarem Aufwand anhand von Querschliffaufnahmen erreicht, wenn eine repräsentative Anzahl von zehn oder mehr Bildern vorliegt. Neben den Erfassungsmethoden wurde auch das Vorgehen zur rechnerischen Ermittlung der fraktalen Dimension variiert. Anhand von  $\mu$ -CT-Daten wurde eine Übereinstimmung mit 2D-Ergebnissen bei gleicher Auflösung mithilfe des Box-Counting-Algorithmus erreicht. Im Gegensatz dazu führte die Slit-Island-Methode als etabliertes Verfahren für theoretische Volumina mit fraktalen Eigenschaften zu keinem Mehrwert für technische Oberflächenfeingestalten aufgrund signifikanter Abweichungen bei der Bestimmung der fraktalen Dimension. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in [1] publiziert.

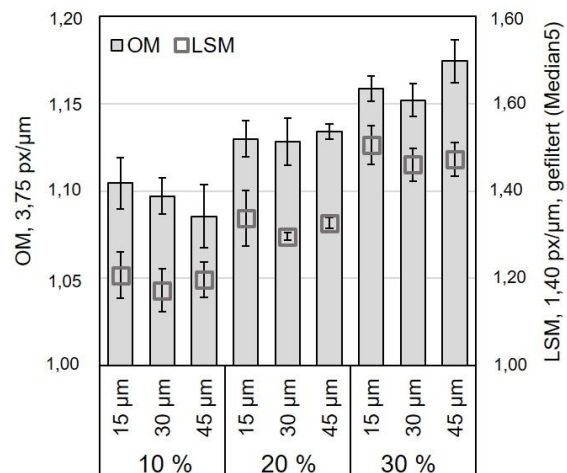


Abbildung 2: Fraktale Dimension an Nutstrukturen in unterschiedlicher Skalierung für gegebene Nutbreiten

In der mathematischen Theorie gilt für selbstähnliche Feingestalten das Prinzip der Skalenunabhängigkeit mit konstanter fraktaler Dimension. Um die Abhängigkeit funktionaler Eigenschaften von der Skalierung auch für technische Oberflächenfeingestalten zu untersuchen, indem geometrische Strukturparameter im Mikrometerbereich proportional zueinander variiert werden, wurden Nutstrukturen mit verschiedenen absoluten Dimensionen (Nuttiefe  $d$ , -breite  $w$ , -abstand  $o$ ), aber annähernd gleichbleibenden Aspektverhältnissen erzeugt, vgl. Abbildung 2. Hinsichtlich der fraktalen Dimension

wurden gleichbleibende Werte bei selben Aspektverhältnissen ( $w/d \approx \text{konst.}$ ) und Strukturierungsdichten (10 %, 20 %, 30 % Materialabtrag der Gesamtfläche) trotz veränderter, absoluter Abmessungen der Nutbreite von 15  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  und 45  $\mu\text{m}$  festgestellt. Darauf aufbauend wurden simulativ Nutstrukturen in virtuellen Querschliffen in MATLAB erzeugt und die fraktale Dimension dieser bestimmt. Die ermittelten Kennwerte wurden anschließend in einem Skalarfeld bzw. in Höhenlinienkarten wiedergegeben, Abbildung 3. Eine Regressionsoptimierung wurde durchgeführt, um ein quantitatives Modell zu entwickeln, das die fraktale Dimension als Funktion der vorgegebenen Strukturparameter ( $d$ ,  $w$ ,  $o$ ) unmittelbar und in guter Näherung ( $R^2 > 0,94$ ) ermittelt:

$$D_{\text{MC,R}} = f(d, w, o) = \frac{0,002 d^3 \mu\text{m}^{-3} + 4841,300}{1 + 707,740 o \mu\text{m}^{-1} + 6,301 w^2 \mu\text{m}^{-2} + 55606,000} + 1,082$$

### 3.3 Ergebnisse von AP 2: Geometrische und chemische Oberflächenmodifikation beim metallischen Fügepartner

Für die experimentellen Untersuchungen wurden mittels Laserstrahlabtragen pinförmige Mikrostrukturen durch die Einstellung eines definierten Pulsabstands realisiert (Abbildung 4 links). Hierbei lag der Ansatz zugrunde, die nur mit spezifischen Geometrieparametern realisierbaren Cone-Like Protrusions (CLP) durch eine Methode zur deterministischen Strukturierung zu ergänzen, da hiermit eine größere Geometrieflexibilität in Bezug auf die resultierenden Strukturelemente erreicht werden kann. Für die Mikrostrukturierung wurden Pulsabstände von 12,5  $\mu\text{m}$  und 40,0  $\mu\text{m}$ , unterschiedliche Fokuseinstellungen (Fokuslage 0 mm und +0,5 mm) sowie verschiedene Anzahlen der Überfahrten gewählt, um regelmäßig angeordnete Pin-Strukturen auf unterschiedlichen Größenskalen und mit unterschiedlichen Aspektverhältnissen zu erzeugen.

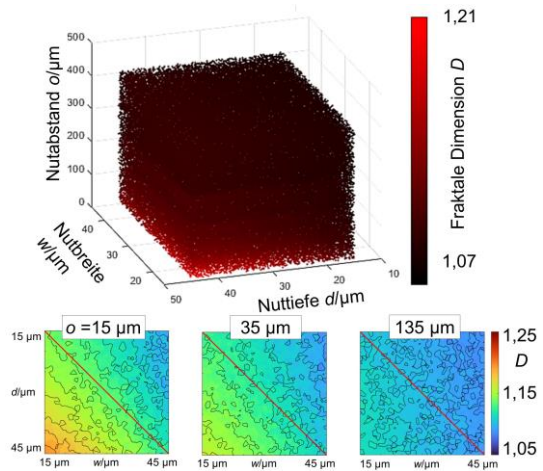


Abbildung 3: Fraktale Dimension aus Monte-Carlo-Simulation im Skalarfeld und Höhenlinienkarten für definierte Abstände

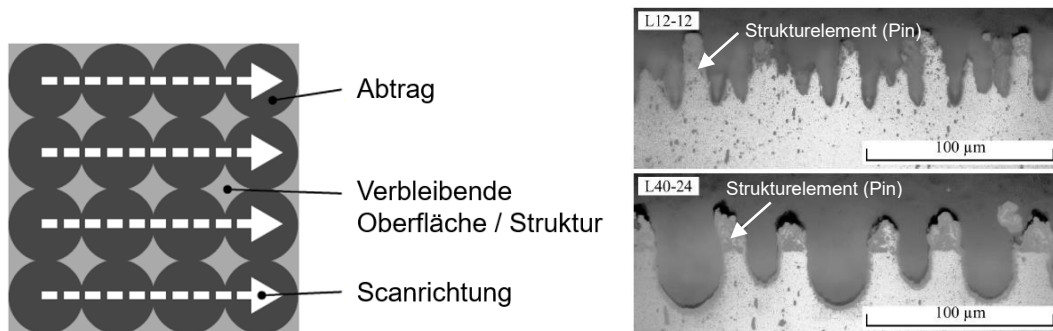


Abbildung 4: Erzeugung von Mikrostrukturen mittels Laserstrahlabtrag: Scanstrategie für die deterministische Strukturherzeugung (links), Querschliffe der realisierten Oberflächen (rechts)

Abbildung 4 rechts verdeutlicht exemplarisch die erreichten Unterschiede hinsichtlich Geometrie und Anordnung der einzelnen Strukturelemente an ausgewählten Querschliffen. Die Untersuchungen zur funktionalen Charakterisierung in Bezug auf die erreichbare Verbundfestigkeit wurden anhand von Rohrzugversuchen sowie Rohrtorsionsversuchen durchgeführt. Es zeigt sich unter anderem, dass die Scherfestigkeit mit der geometrischen Gestalt der Mikrostrukturen, insbesondere der Höhe der Pin-Strukturen, korreliert (Abbildung 5), wobei Scherfestigkeiten bis zu 29,1 MPa bei deterministischer Strukturierung, vgl. Variante L12-12 (Puls-/Linienabstand: 12 µm, Scans: 12), Abbildung 4 rechts, und bis zu 32,5 MPa im Vergleichsfall der CLP-Strukturierung nachgewiesen werden konnten [2].

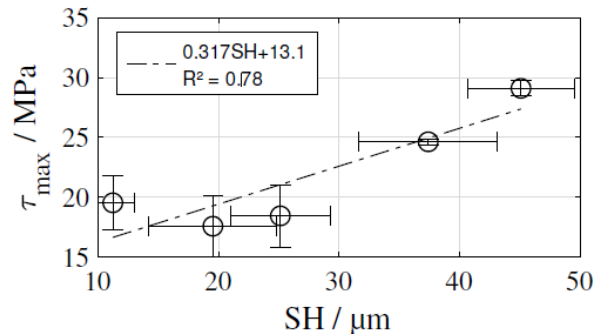


Abbildung 5: Torsionsscherfestigkeit in Abhängigkeit von der Strukturhöhe SH

Für die weiterführende Untersuchung der Oberflächenfeingestalt in Kombination mit chemischer Oberflächenmodifikation wurden mit dem genannten Lasersystem gekreuzte Nutstrukturen mit Strukturdichten von 10 % bis 30 % hergestellt. In Scherzugversuchen konnte mit zunehmender Strukturdichte ein Anstieg der Verbundfestigkeit auf bis zu 16,4 MPa (30 % Strukturdichte) im Vergleich zu entfetteten Referenzproben mit 3,5 MPa ohne Mikrostrukturierung festgestellt werden. Bei chemischer Oberflächenmodifikation durch erstens eine Heißwasserbehandlung zur Böhmitisierung und zweitens mithilfe des Organo-Silan-Haftvermittlers N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilan konnten Verbundfestigkeiten bei unstrukturierten Oberflächen von erstens 4,5 MPa bzw. zweitens 6,2 MPa erreicht werden. Darüber hinaus existierte eine synergistische Wechselwirkung zwischen der Geometrie der Laserstrukturen und der angepassten Oberflächenchemie infolge der Silanbeschichtung, die eine inhärente Steigerung der Verbundfestigkeit bis 32,0 MPa (bei 30 % Strukturdichte) bewirkte. Die Korrelation zwischen Oberflächenfeingestalt ( $D$ ) und Festigkeit ( $\tau$ ) konnte in guter Näherung

( $\|r(x)\|^2 < 2,3$ ) durch einen linearen Zusammenhang unabhängig vom chemischen Zustand bestätigt werden [3].

### 3.4 Ergebnisse von AP 3: Integrierte Fertigungstechnologie

Im AP 3 wurden Finite-Elemente-Simulationen des UVADM-Prozesses mit ABAQUS durchgeführt, um die Mikrostrukturausbildung unter Berücksichtigung des temperatur- und dehnratenabhängigen Werkstoffverhaltens, der Werkzeuggeometrie (Winkel des Keils, Kantenradius) und der relevanten Bearbeitungsparameter (Schnittiefe, Schnittgeschwindigkeit) zu analysieren. Dabei bestimmt die Schnitttiefe in Kombination mit der Ultraschallschwingungsüberlagerung auch, ob ein diskontinuierlicher Prozess (Werkzeug nur zeitweise im Eingriff) oder ein kontinuierlicher Prozess (Werkzeug verbleibt im Eingriff) vorliegt.

Die Modellgeometrie des Werkzeugs wurde auf den für die Fertigung der Mikrostrukturen relevanten Schneidenbereich beschränkt (Abbildung 6). Das Werkstück wurde ausschnittsweise als Quader ( $100 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m} \times 45 \mu\text{m}$ ) modelliert. Aufgrund der symmetrischen Gestalt der Modellgeometrie wurde eine Symmetrieebene entlang der Schnittrichtung definiert.

Zur Abbildung des temperatur- und dehnratenabhängigen Werkstoffverhaltens wurde das Johnson-Cook-Plastizitätsmodell verwendet. Zusätzlich wurde das Johnson-Cook-Versagensmodell genutzt, um das Versagen des Werkstoffs bei Überschreiten der Festigkeitsgrenze abzubilden. Das Werkzeug wurde als starrer Körper ohne Verformung angenommen. Zwischen Werkzeug und Werkstück wurde mechanischer Kontakt (Penalty-Methode) definiert. Da sich die Kontaktflächen und Kontaktknotenpaare durch den Trennvorgang sowie die plastische Verformung stetig ändern, musste der Kontakt so definiert werden, dass eine iterative Neubildung der Kontaktknotenpaare erfolgt. Zusätzlich wurde die Erwärmung des Werkstückmaterials durch Reibung berücksichtigt (Reibkoeffizient konstant,  $\mu = 0,3$ ).

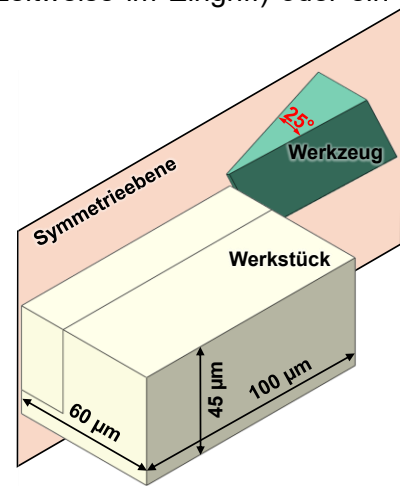


Abbildung 6: Symmetrische Modellgeometrie zur Simulation des UVADM (Winkel des Werkzeugkeils im Experiment  $50^\circ$ ; Winkel des Werkzeugkeils in der Simulation unter Nutzung von Symmetrie  $25^\circ$ )

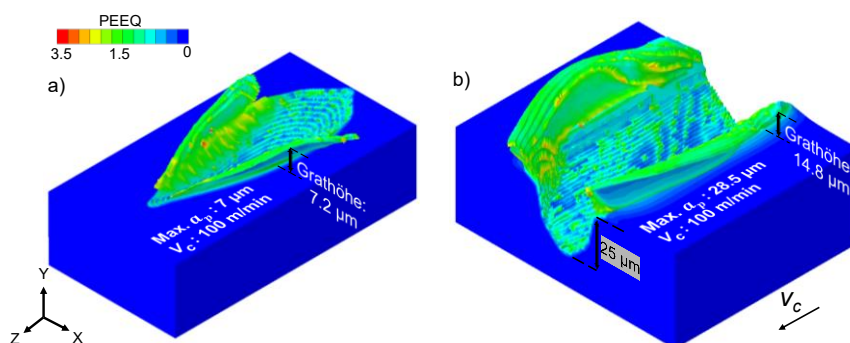


Abbildung 7: Simulationsergebnis (plastische Dehnung – PEEQ) nach einer Schwingungsperiode während des UVADM: a) diskontinuierlicher Eingriff (max. Schnitttiefe  $7 \mu\text{m}$ ), b) kontinuierlicher Eingriff (max. Schnitttiefe  $28,5 \mu\text{m}$ ; Trockenbearbeitung, Schnittgeschwindigkeit  $100 \text{ m/min}$ , Winkel des Keils  $50^\circ$ , Frequenz  $20,42 \text{ kHz}$ )

In Abbildung 7 sind exemplarische Simulationsergebnisse dargestellt. Abbildung 7 a) und Abbildung 7 b) zeigen jeweils eine bearbeitete Werkstückgeometrie nach einer Schwingungsperiode. Die Falschfarbendarstellung repräsentiert dabei die plastische Dehnung. Durch die diskontinuierliche Bearbeitung entsteht ein einzelner, in Schnittrichtung ausgeprägter Grat als funktionale Mikrostruktur. Es ist in Abbildung 7 a) zu erkennen, dass die Simulation unter den angenommenen Randbedingungen eine gezielte Gratbildung (Grathöhe  $7,2\ \mu\text{m}$  bezogen auf die initiale Oberfläche) vorhersagen kann [4]. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 7 b) die simulierte Mikrostruktur bei kontinuierlicher Bearbeitung (Furchprozess). Durch die Ultraschallschwingung in Verbindung mit einer anfänglichen Schnitttiefe von  $25\ \mu\text{m}$  ergibt sich eine maximale Grathöhe von ca.  $17\ \mu\text{m}$  [5]. Neben der zeitlichen und räumlichen Ausprägung der Mikrostrukturen wurden die resultierenden Geometrien hinsichtlich der ausgebildeten Hinterschneidungen bewertet. Als Maß hierfür wurde die durch die Hinterschneidung definierte Fläche in der X-Y-Ebene bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass diese mit steigender Schnitttiefe, Schnittgeschwindigkeit und Winkel des Keils zunimmt. Darüber hinaus zeigten die Simulationsergebnisse, dass eine Ultraschallschwingungsüberlagerung bei kontinuierlichem Werkzeugeingriff zu einer geringfügigen Vergrößerung der Hinterschnittfläche führt. Hervorgerufen wird dieser Effekt durch eine stärkere Verformung der Grate durch die zusätzliche eingebrachte kinetische Energie infolge der Ultraschallschwingungsüberlagerung.

Die Ergebnisse der Simulationen bildeten die Basis für die experimentellen Untersuchungen. Der Aufbau des Werkzeugsystems umfasste die Auswahl und die Charakterisierung der einzelnen Komponenten (Generator, Wandler, Sonotrode). Die Einsätze aus MKD waren auf Wendeschneidplatten aufgelötet. Als Schnittstelle zwischen Werkzeug und Schwingssystem wurden Werkzeughalterungen aus Titan ausgelegt und gefertigt. Die unterschiedlichen Halter ermöglichten die Anpassung des Freiwinkels in diskreten Stufen ( $5^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $45^\circ$ ). Zur Prozesscharakterisierung wurde das Werkzeugsystem auf einem Dynamometer befestigt. Der Gesamtaufbau ist in Abbildung 8 dargestellt [4].

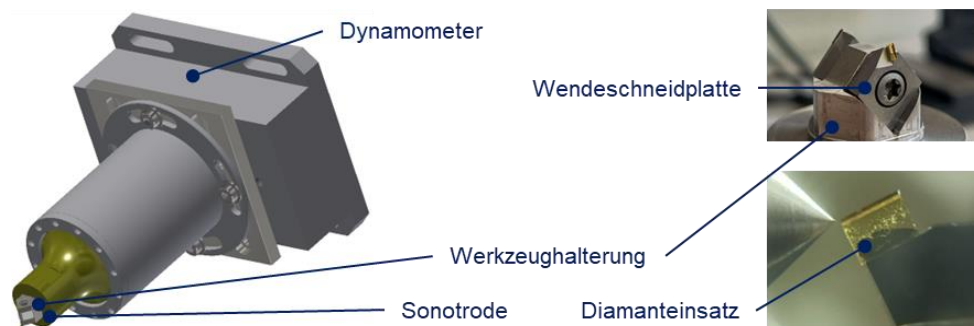


Abbildung 8: In den UVADM Versuchen verwendetes Werkzeugsystem

Um eine möglichst hohe Schwingungsamplitude zu erreichen, wurde die Resonanzfrequenz bestimmt. Anschließend erfolgte die Ermittlung der Zusammenhänge zwischen elektrischer Leistung und resultierender Schwingungsamplitude. Dabei konnten Amplituden von bis zu ca. 4  $\mu\text{m}$  (peak-to-peak 8  $\mu\text{m}$ ) ermittelt werden.

Erste experimentelle Untersuchungen wurden entsprechend der Simulationen mit kontinuierlich veränderlicher Schnitttiefe im Bereich der Peak-to-peak-Schwingungsamplitude durchgeführt. Das bedeutet, die Schnitttiefe variierte für jede Einzelschwingung im Bereich zwischen 0  $\mu\text{m}$  und 7  $\mu\text{m}$ . Weiterhin wurden Werkzeuge mit unterschiedlichen Winkeln des Keils / Dachwinkeln (siehe [4]) ( $30^\circ$ ,  $50^\circ$  und  $80^\circ$ ) eingesetzt. Neben der Werkzeuggeometrie wurden ebenfalls die Schnittgeschwindigkeit (100 m/min, 200 m/min) sowie der Vorschub (0,05 mm, 0,1 mm) in zwei Stufen betrachtet. Beispielhafte Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt.

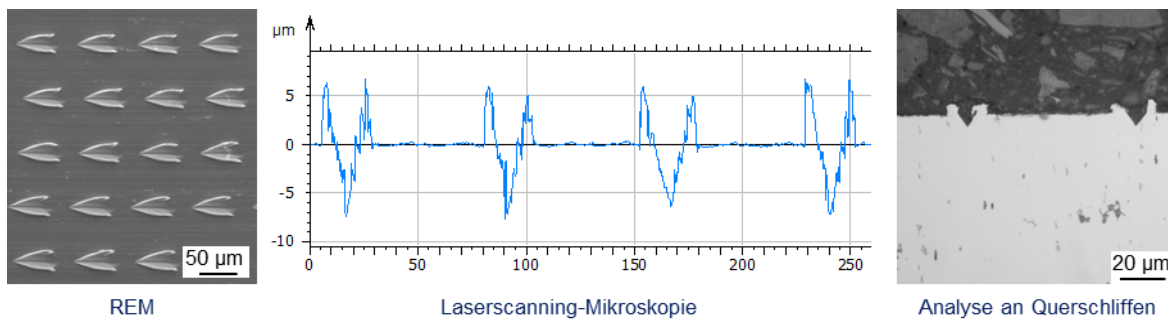


Abbildung 9: Analyse der Oberflächenausbildung beim UVADM an einem ausgewählten Beispiel (Winkel des Keils:  $50^\circ$ ,  $v_c = 100 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm}$ )

Der Vergleich zeigt einen hohen Grad an Übereinstimmung zwischen den Simulationen und den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen. Dies wird unter anderem durch die ähnlichen maximalen Grathöhen deutlich. Anhand der Analyse an Querschliffen werden allerdings Unterschiede hinsichtlich der Ausbildung der Hinterschneidungen ersichtlich. Im Projektverlauf wurden weitere Untersuchungen mit größeren Schnitttiefen (10  $\mu\text{m}$ , 25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ ) durchgeführt [5]. Um den Einfluss der Ultraschallschwingungsüberlagerung auf das Bearbeitungsergebnis zu ermitteln, erfolgten die Untersuchungen sowohl mit als auch ohne Schwingungsüberlagerung. In diesem Zusammenhang war eine größere Grathöhe im Ergebnis der Bearbeitung mit Ultraschallschwingungsüberlagerung zu erkennen. Weiterhin tritt teilweise ein Ablösen des Grats von der Oberfläche auf. Dieser Effekt entsteht bei der Bearbeitung mit Ultraschallschwingungsüberlagerung weniger häufig. Zusätzlich ergaben sich in Abhängigkeit von Werkzeuggeometrie, Schnitttiefe und Vorschub Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Vorschubbahnen, welche in den Simulationen nicht betrachtet wurden. Dies wurde dadurch ersichtlich, dass die Strukturelemente entgegen der Vorschubrichtung orientiert sind.

### 3.5 Ergebnisse von AP 4: Funktionale Bewertung

Verbundproben wurden für unterschiedliche Strukturierungsvarianten mithilfe von isostatischem Heißpressen hergestellt und umfassend charakterisiert. Die Ergebnisse des Vergleichs verschiedener Analysemethoden (OM, LSM,  $\mu$ -CT) wurden in Abschnitt 3.2 beschrieben. Anhand der Nutstrukturen wurde die direkte Korrelation zwischen fraktaler Dimension und Verbundfestigkeit bestätigt, wobei sowohl die Unabhängigkeit vom chemischen Oberflächenzustand als auch die Skalunenabhängigkeit der fraktalen Dimension nachgewiesen wurden. Die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen von UVADM-strukturierten Rohrproben zeigten u. a. eine Erhöhung der Verbundfestigkeit mit sinkendem Vorschub und somit höherer Strukturichte. Es konnte ebenfalls festgestellt werden, dass die Schnitttiefe einen signifikanten Einfluss besitzt, wobei im betrachteten Bereich eine maximale Verbundfestigkeit für Schnitttiefen zwischen 25  $\mu$ m und 50  $\mu$ m ermittelt werden konnte. Eine Verringerung des Dachwinkels des Werkzeugs von 50° auf 30° sowie eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit von 100 m/min auf 200 m/min gingen tendenziell mit einer geringfügigen Zunahme der Scherzugfestigkeit einher. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnten die höchsten ertragbaren Scherspannungen (33 MPa) des Verbundes für die Bearbeitung mit einer Schnittgeschwindigkeit von 100 m/min, einer Schnitttiefe von 25  $\mu$ m und einem Vorschub von 0,15 mm unter Nutzung von Werkzeugen mit einem Dachwinkel von 50° erreicht werden.

## **4 Veröffentlichte Projektergebnisse**

### **4.1 Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung**

- [1] Hanisch, N.; Steinert, P.; Saborowski, E.; Liborius, H.; Lindner, T.; Bandaru, N. K.; Schubert, A.; Lampke, T.: Comparison of 2D and 3D measurement methods for evaluating laser structured aluminum surfaces using fractal dimension. In: *Procedia CIRP*, 2024, Band 123, S. 286–291, DOI: 10.1016/j.procir.2024.05.051
- [2] Saborowski, E.; Steinert, P.; Lindner, T.; Schubert, A.; Lampke, T.: Pin-Shaped Surface Structures Generated by Laser Single Pulse Drilling for High-Strength Interfaces in Thermally Joined Polymer–Metal Hybrids. In: *Materials*, 2023, Band 16(2), 687, DOI: 10.3390/ma16020687
- [3] Hanisch, N.; Dittes, A.; Steinert, P.; Liborius, H.; Lindner, T.; Schubert, A.; Lampke, T.: Quantitative design criterion for mechanical interface functionalization regarding adhesion strength in chemically pre-treated polymer-metal hybrids using fractal dimension. In: *The Journal of Adhesion*, 2025, Band 101, S. 795–813, DOI: 10.1080/00218464.2024.2395431
- [4] Bandaru, N. K.; Liborius, H.; Steinert, P.; Hanisch, N.; Nestler, A.; Lampke, T.; Schubert, A.: Surface microstructuring by Ultrasonic Vibration Assisted Deformational Machining (UVADM) – Simulation and experimental results. In: *Procedia CIRP*, 2024, Band 123, S. 280–285, DOI: 10.1016/j.procir.2024.05.050
- [5] Rezaei, M. H.; Schaarschmidt, I.; Liborius, H.; Hanisch, N.; Steinert, P.; Lampke, T.; Schubert, A.: Surface microstructuring by targeted burr formation using Ultrasonic Vibration Assisted Deformational Machining (UVADM) for improving polymer-metal bonding: In: *Procedia CIRP*, 2025, Band 133, S. 549–554, DOI: 10.1016/j.procir.2025.02.094

## 4.2 Weitere Publikationen und öffentlich gemachte Ergebnisse

Vortrag: Steinert, P., CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), Bremen, 16.05.2024, Surface microstructuring by Ultrasonic Vibration Assisted Deformational Machining (UVADM) – Simulation and experimental results

Vortrag: Hanisch, N., CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), Bremen, 17.05.2024, Comparison of 2D and 3D measurement methods for evaluating laser structured aluminum surfaces using fractal dimension

Posterbeitrag: Hanisch, N., 4th Coatings and Interfaces Online Conference (CIC), 21.-23.05.2025, Considering Scaling Aspects in Interface Design for Adhesion-Promoting Laser Structures in Polymer-Metal-Hybrids

Vortrag: Rezaei, M., CIRP Conference on Modeling of Machining Operations, Mons, Belgien, 22.–23.05.2025, Surface microstructuring by targeted burr formation using Ultrasonic Vibration Assisted Deformational Machining (UVADM) for improving polymer-metal bonding