

Rubrik:

Fertigungstechnik, Laser, Mikroumformung

Haupttitel:

Laserunterstütztes Mikroumformen

Laser-assisted micro forming

Untertitel:

Werkzeugstrukturierung und -anwendung zum laserunterstützten Mikroumformen

Tool structuring and –application for the laser-assisted micro forming

Autor:

Dipl.-Ing. Mahdi Terzi<sup>1</sup>, Dipl.-Phys. Katja Samm<sup>2</sup>, Prof. Dr.-Ing. Jens Wulfsberg<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorium Fertigungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, Deutschland

<sup>2</sup>Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, 30419 Hannover, Deutschland

Danksagung:

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung dieses Forschungsprojektes im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1138 „Modellierung von Größeneinflüssen bei Fertigungsprozessen“ bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Inhalt:

Das laserunterstützte Mikroumformen ist ein Verfahren, welches für die Herstellung komplexer metallischer Werkstücke im Submillimeterbereich Anwendung finden soll. Einhergehend mit der Miniaturisierung des Umformverfahrens werden zum einen Größeneffekte bei der Strukturierung von transparenten Werkzeugen, sowie beim Umformprozess selbst untersucht. Die Laserunterstützung des Mikroumformprozesses mit Saphirwerkzeugen zur gezielten lokalen Werkstückerwärmung stellt hierbei einen bedeutenden Ansatz zur Kompensation von Größeneffekten dar.

The laser-assisted micro forming is a process aiming to produce complex metallic workpieces in submillimeter range. Size effects considering the structuring of transparent tools as well as the forming itself coming along with the down scaling of the process are investigated. The laser assistance of the micro forming process with sapphire tools is an approach to compensate these size effects by local workpiece heating.

Einleitung

Durch die immer größer werdende Nachfrage nach metallischen Bauteilen bzw. Strukturen kleinster Dimensionen (bis zu 100 µm), werden angepasste Fertigungstechnologien mit Berücksichtigung von Genauigkeits-, Zuverlässigkeits-, Produktivitäts- sowie Wirtschaftlichkeitsanforderungen benötigt. Das laserunterstützte Mikroumformen ist eine Fertigungstechnologie, die diesen Anforderungen gerecht wird. Es besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf, da ein Skalieren des Umformprozesses vom Makro- in den Mikrobereich aufgrund auftretender Größeneffekte nicht ohne Weiteres möglich ist. Im Rahmen des Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) „Modellierung von Größeneinflüssen bei Fertigungsprozessen“ wird am Laboratorium für Fertigungstechnik (LaFT) der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg in Zusammenarbeit mit dem Laserzentrum Hannover e.V. (LZH) das Thema „Phänomenologische Erfassung und quantitative Analyse von Größeneffekten bei der Miniaturisierung von laserunterstützten Massivumformprozessen mit FE Methoden“ bearbeitet. Das LZH beschäftigt sich mit Größeneffekten bei der Strukturierung von transparenten Umformwerkzeugen, das LaFT mit Größeneffekten beim Umformprozess selbst (Bild 1).

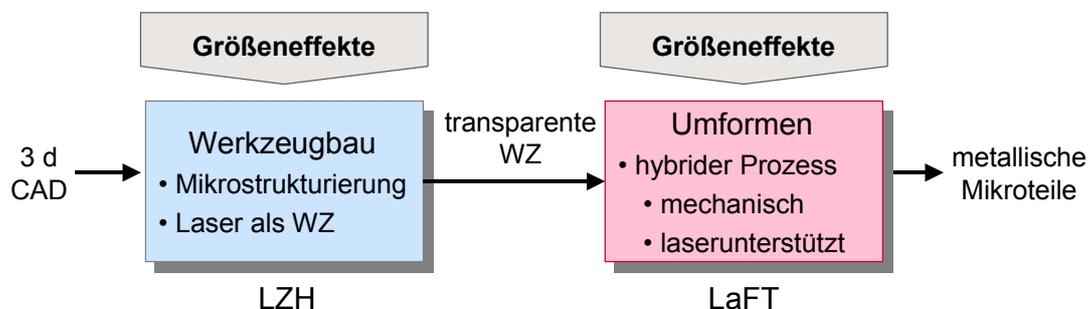


Bild 1: Prozesskette zum laserunterstützten Mikroumformen

Größeneffekte bei der Werkzeugstrukturierung

Das Ziel des hier vorgestellten Projekts bei der Werkzeugstrukturierung ist die Identifizierung und Quantifizierung von Größeneffekten und Prozessgrenzen, welche bei der Miniaturisierung der

herzustellenden Werkzeug-Mikrostruktur auftreten. Zu den bislang identifizierten Größeneffekten gehören unter anderem eine abnehmende Formgenauigkeit der Struktur, eine relative Zunahme der Schädigung des Saphirstempels durch wenige  $\mu\text{m}$  tiefe Mikrorisse aufgrund von thermischen Spannungen, sowie eine Abnahme der Qualität der Stempelstruktur aufgrund von Ablagerungen. Diese Größeneffekte wirken sich wie folgt nachteilig auf das Umformergebnis aus: Die Formgenauigkeit beeinflusst die Genauigkeit der umgeformten Struktur, Mikrorisse führen zu einer Schwächung der Stabilität des Stempels und damit zu einer Verkürzung seiner Lebensdauer und Ablagerungen verringern durch Abschattung der beim Umformen einzukoppelnden Strahlung die Erwärmung des Werkstücks, so dass die Formfüllung verschlechtert wird. Um ein optimales Umformergebnis zu erreichen, soll der bei einer Miniaturisierung der Stempelstrukturen auftretenden Verschlechterungen entgegengewirkt werden. Daher besteht ein weiterer wichtiger Arbeitspunkt in diesem Projekt in der Entwicklung von Strategien zur Kompensation der Größeneffekte, wie z.B. der Einsatz von Prozessgasen zur Kühlung, die Bearbeitung mit Hilfe von Rotationsmasken zur Verbesserung der Formgenauigkeit oder eine Minimierung der Energiedichten zur Reduzierung der thermischen Beanspruchung [1,2]. Der nun folgende Absatz behandelt ausschließlich die maximale Bohrtiefe als Prozessgrenze.

#### Prozessgrenze: Tiefe und Modellbildung

Um die Prozessgrenzen beim Bohren mit Excimerlaserstrahlung zu definieren, wurden Untersuchungen zu den maximal erreichbaren Tiefen gemacht. Diese Experimente wurden mit einem KrF-Excimerlaser der Wellenlänge 248 nm und Pulsweiten von 20 – 30 ns durchgeführt. Dabei wurde die Strahlung nicht wie bei den meisten anderen Lasertypen fokussiert, sondern es wurde abbildend gearbeitet, wobei das Bild einer Maske mit einem Abbildungsverhältnis von 1:20 auf die Probenoberfläche projiziert wurde. Die Kurven in Bild 2 zeigen die erreichten Tiefen von runden Bohrungen mit den Durchmessern 400  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  und 100  $\mu\text{m}$  in Abhängigkeit der Anzahl der Einzelpulse bei einer Fluenz von 4,6 J/cm<sup>2</sup>. Alle drei Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf mit einem zunächst linearen Anstieg und einem anschließenden Übergang in den Sättigungsbereich, bis die maximale Tiefe erreicht wird. Je kleiner der Abtragsdurchmesser ist, desto kleiner ist auch die erreichbare Tiefe. Bei Bohrungen mit einer niedrigeren Energiedichte verschiebt sich die Prozessgrenze nach unten. Die Entwicklung der Kurvenverläufe gleicht der im Bild 2, jedoch wird das Limit in der Bohrtiefe bei einer Fluenz von 1,5 J/cm<sup>2</sup> schneller erlangt.

Zu einem besseren Verständnis der Abtragsmechanismen und der Ursache für eine Begrenzung der Bohr-Tiefe wurde begonnen, ein Modell zu entwickeln. Dabei werden, wie in Bild 3 zu sehen ist, 3 Effekte betrachtet, welche hauptsächlich die maximale Tiefe limitieren: Zum einen werden die aus dem Material herausgeschlagenen Partikel teilweise von den Wänden der Bohrung reflektiert. Je tiefer die Bohrung ist, desto größer ist der Anteil der rückreflektierten Partikel bis das Material nicht mehr über den Probenrand gelangen kann und kein weiterer Abtrag mehr möglich ist. Dieses Verhalten hängt demnach stark von der kinetischen Energie der Partikel, und somit von der Fluenz der Laserstrahlung ab, was die Tatsache, dass bei größerer Fluenz tiefer gebohrt werden kann, erklärt. In Bild 4 ist das Ergebnis eines Experiments zu sehen, bei dem mit gleichen Parametern im Inneren (rote Messpunkte) sowie am Rand, mit dem Mittelpunkt der Bohrung direkt auf der Probenkante (blaue Messpunkte) gebohrt wurde. Diese Kurven ergeben sich, wie bei den Ergebnissen in Bild 2, aus den Mittelwerten von jeweils drei Versuchsreihen. Den größten Anteil an der Streuung haben jedoch die Messfehler bei der Bestimmung der Tiefen. Bei den Bohrungen am Rand konnte ein Teil der abgetragenen Partikel seitlich herausfallen. Hier wird eine deutlich größere Tiefe erzielt, was die These der Begrenzung durch Reflexionen unterstützt.

In dem Modell ist ein weiterer Effekt skizziert: Die Kante des Bodens der Bohrung ist von einer größeren Fläche umgeben als der Boden selbst, so dass dort die Wärme schneller abfließen kann. Daher besteht die Annahme, dass sich das geschmolzene Material während des Bohrens an der Kante schneller wieder verfestigt. Dies führt dazu, dass die Bohrung konisch, mit einem vom Material abhängigen Winkel, verläuft. Sobald die Wände im spitzen Winkel aufeinander zulaufen, wird die Strahlung von den schrägen Flächen komplett abgeschattet, so dass kein Material mehr abgetragen wird. Diese Behauptung wird von einem Experiment unterstützt, bei dem bei gleichen Prozessparametern das Tiefenlimit unterschiedlicher Materialien bestimmt wurde, wie in Bild 5 zu sehen ist. In Materialien mit einer sehr niedrigen thermischen Leitfähigkeit (Glas: 1,114 und Quarz mit 1,38 W/mK bei einer Temperatur von T = 20 °C) lässt sich deutlich tiefer bohren als in Materialien mit höheren Wärmeleitfähigkeiten (30 – 240 W/mK für Saphir, Keramik und Aluminium bei einer Temperatur von T = 20 °C).

Der dritte, die Tiefe limitierende Effekt beruht auf der Tiefenschärfe des projizierten Bildes der Maske. Nur in der Bildebene wird ein scharfes Abbild der Maske erzielt und nur da liegt ein Top Head Profil mit einer konstanten Energiedichte vor. Je tiefer gebohrt wird, desto weiter entfernt sich die

Probenoberfläche von der Bildebene. Das Top Head Profil geht in ein Gauß Profil mit abnehmender Energiedichte an den Rändern über, so dass in der Mitte ein stärkerer Materialabtrag erfolgt. Dieses Verhalten unterstützt die Bildung des Flankenwinkels und damit die Abschattung der folgenden Strahlung, so dass die erreichbare Bohrtiefe in den Sättigungsbereich übergeht.

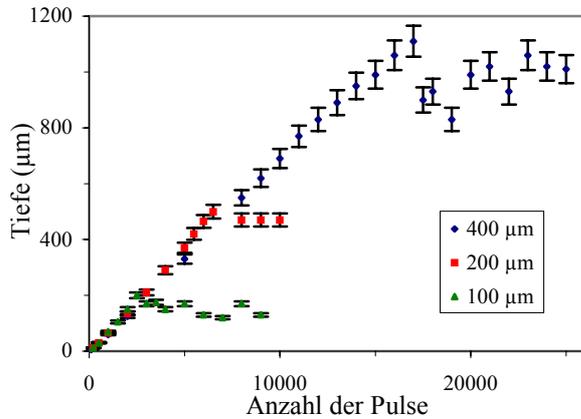


Bild 2: Maximale Tiefe bei einer Fluenz von  $4,6 \pm 1 \text{ J/cm}^2$ , mit verschiedenen Abtragsgrößen

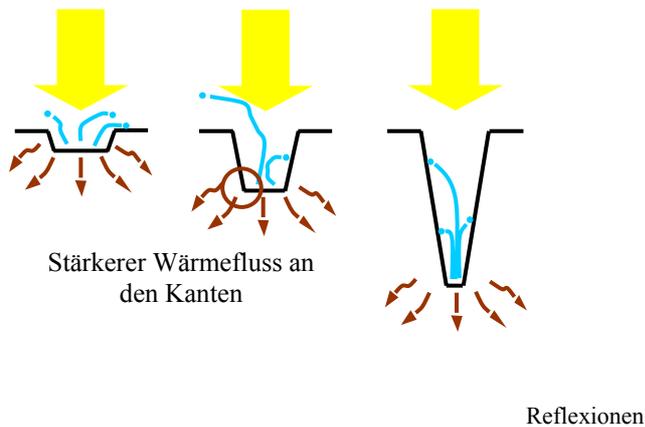


Bild 3: Modell zu den Abtragsmechanismen beim Bohren

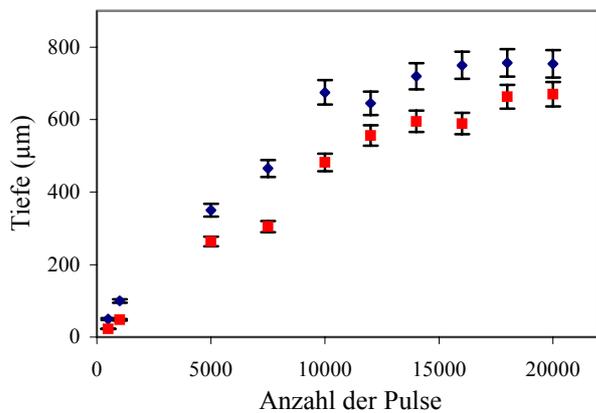


Bild 4: Maximale Tiefe bei einer Fluenz von  $4 \pm 1 \text{ J/cm}^2$ , gebohrt im Innern einer Saphirprobe (rot) und am Rand (blau)

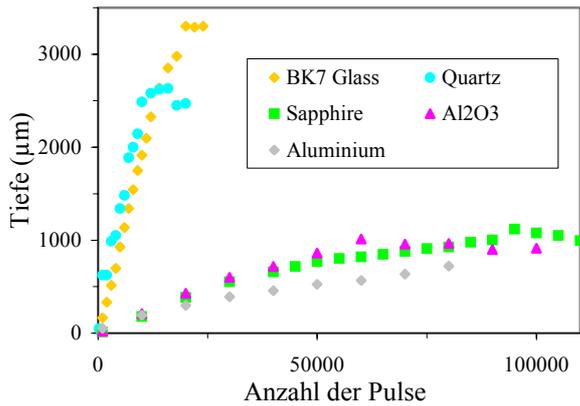


Bild 5: Maximale Tiefe für verschiedene Materialien bei Fluenzen zwischen 4.6 und 5.1 J/ cm<sup>2</sup>

### Größeneffekte beim Umformprozess

Das übergeordnete Ziel dieses Forschungsvorhabens, ist die Weiterentwicklung vorhandener Halbwarmumformverfahren für die Herstellung komplexer metallischer Werkstücke im Submillimeterbereich, basierend auf der Untersuchung von auftretenden Größeneinflüssen und deren Modellierung in der FEM Simulation. Hierzu werden skalierte Massivumformprozesse in experimentellen und numerischen Untersuchungen betrachtet. Ein bedeutender Größeneffekt ist die größenabhängige Temperatur- und Temperaturverteilungsänderung, wie in Bild 6 beispielhaft dargestellt ist. Hier sind die simulierte Temperatur und Temperaturverteilung eines Werkstücks am Ende eines Umformvorgangs dargestellt bei zwei Eingangstemperatur  $T_E$  (20 °C und 800 °C) und einer Höhenreduktion von 50% in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors  $\lambda$ . Zu erkennen ist, dass die Temperatur mit kleiner werdendem Bauteil abnimmt. Die Laserunterstützung des Mikroumformprozesses mit transparenten Saphirwerkzeugen zur gezielten lokalen Werkstückerwärmung stellt hierbei einen bedeutenden Ansatz zur Kompensation dieses Größeneffektes im Rahmen der Miniaturisierung von Massivumformverfahren und zur Fertigung komplexer Werkstücke dar.

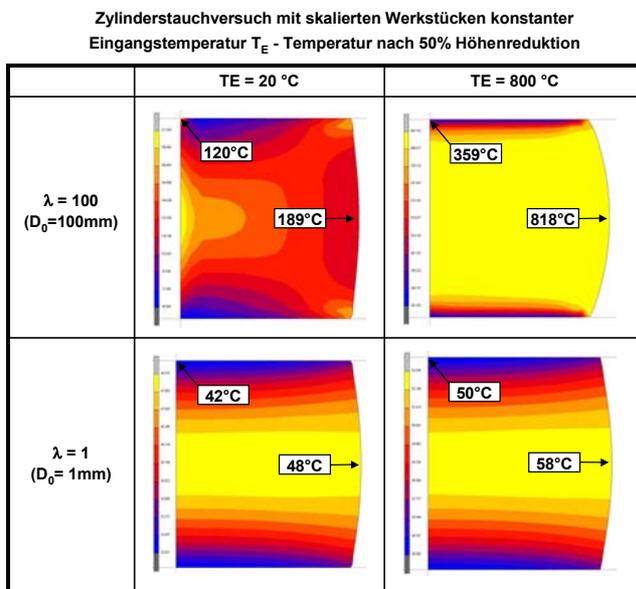


Bild 6: Abhängigkeit der Temperatur und Temperaturverteilung von der Werkstückgröße

Das Prinzip des laserunterstützten Mikroumformens, ist in Bild 7 dargestellt. Während die Laserenergie, die durch das Saphirwerkzeug transmittiert wird, das Werkstück erwärmt, wirkt zusätzlich eine Stempelkraft über das Saphirwerkzeug auf das Werkstück, welche die Umformung des Werkstücks bewirkt.

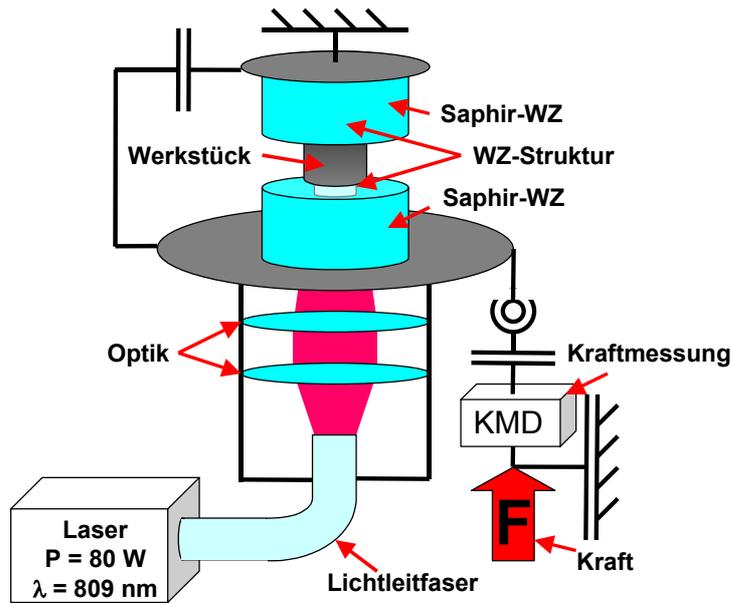


Bild 7: Prinzipieller Aufbau des laserunterstützten Mikroumformens

Ein Aufbau zur Realisierung des laserunterstützten Mikroumformens wurde am LaFT realisiert. Dabei steht als Umformmaschine eine Universalprüfmaschine des Typs Zwick 1484 zur Verfügung, in die der Versuchsaufbau integriert ist (Bild 8). Die Genauigkeit der Kraftmessung liegt bei 1,04 N, der Traversen-Wegmessung bei 1  $\mu\text{m}$ . Für Untersuchungen der Halbwarm- und Warmumformung durch eine Laserunterstützung des Umformprozesses steht ein fasergekoppeltes Diodenlasersystem der Firma COHERENT mit einer maximalen Leistung von 80 W zur Verfügung. Die Wellenlänge der Laserstrahlung liegt mit  $\lambda = 809 \text{ nm}$  in einem Wellenlängenbereich, für den Saphir einen hohen Transmissionsgrad aufweist, d.h. die eingesetzten Saphirwerkzeuge sind für Strahlung dieser Wellenlänge transparent. Das Lasersystem wurde außerhalb der Prüfmaschine aufgebaut, wobei die Zuleitung der Laserstrahlung über eine Lichtleitfaser zum Optikmodul erfolgt, welches im Werkzeugsystem integriert ist. Das optische System wurde dabei möglichst nah am transparenten Werkzeug (Saphir) angeordnet, um die bestrahlte Werkstückfläche entsprechend der geringen Strukturgrößen möglichst klein zu halten.

Die Genauigkeit des Führungssystems der Universalprüfmaschine wurde als unzureichend für die Anforderungen bei der Mikroumformtechnik eingestuft. Daher wurde zur Gewährleistung einer ausreichenden Positioniergenauigkeit in den Umformversuchen eine separate Führung mit vier Führungssäulen und Präzisionsbuchsen in den Prototyp des entwickelten Versuchsaufbaus integriert sowie diese von der Maschinenführung durch eine gelenkige Lagerung entkoppelt. Weiterhin wurde durch den durchgängigen Einsatz von Stahlwerkstoffen und der Dimensionierung der Einzelteile, eine hohe Steifigkeit des Aufbaus erlangt.

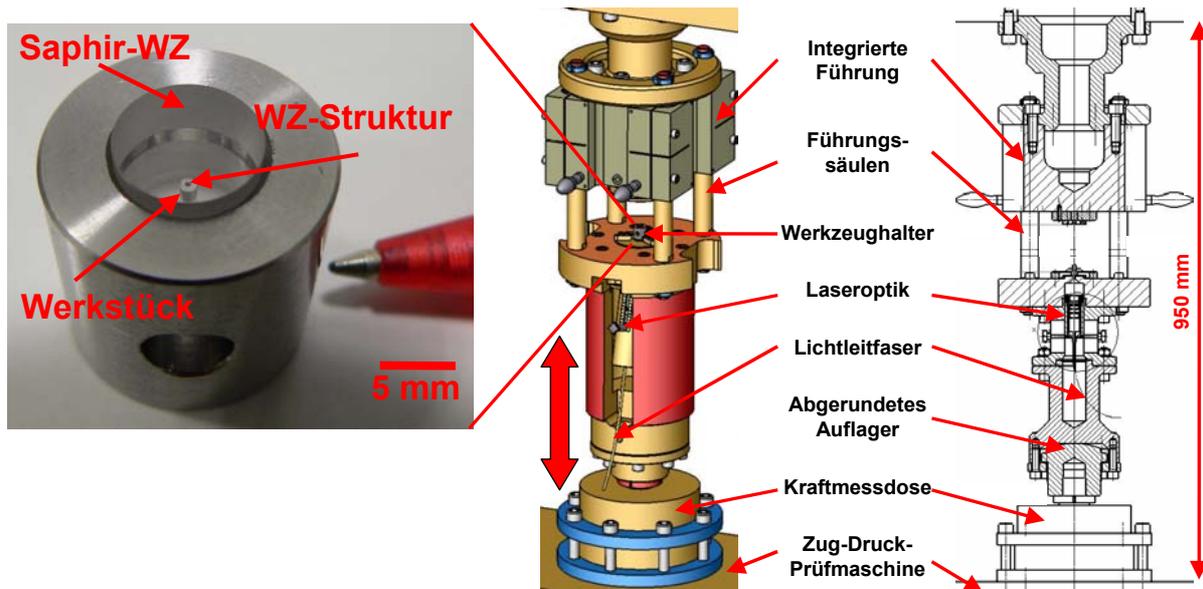


Bild 8: Skizze des entwickelten Aufbaus zum laserunterstützten Mikroumformen

Ziel der experimentellen Untersuchungen ist die Qualifizierung des Verfahrens für die Erfassung und Analyse auftretender Größeneffekte bei der Skalierung von Massivumformprozessen. Ferner wird untersucht, inwieweit durch die Laserunterstützung des Umformprozesses und dem damit verbundenen Übergang zur Halbwarmumformung Größeneffekte verringert oder vermieden werden können. Dazu wurden experimentelle Arbeiten zum Mikroprägen rotationssymmetrischer Strukturen mit Saphirwerkzeugen durchgeführt.

In Bild 9 sind Prägeergebnisse mit einem Strukturdurchmesser von  $400\ \mu\text{m}$  in 1.4301-Stahl zu sehen, bei denen zum Einen kalt und zum Anderen halbwarm mit einer Laserleistung von  $P_L = 6,7\ \text{W}$  geprägt wurde. Zu erkennen ist, dass das Prägergebnis mit Laserunterstützung deutlich besser ist.

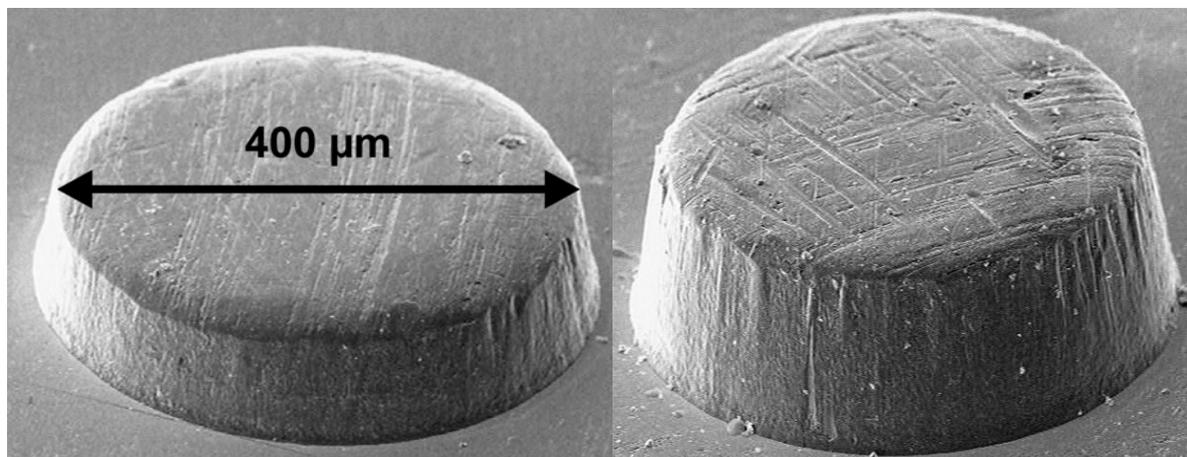


Bild 9: Prägeergebnisse in 1.4301-Stahl links: kaltgeprägt, rechts: halbwarmgeprägt mit einer Laserleistung  $P_L = 6,7\ \text{W}$

Des Weiteren wurden mit strukturierten und mittels Laserablation vom LZH aufgerauten Werkzeugoberflächen Umformversuche durchgeführt, bei denen die eingestellte Oberflächenrauheit der Werkzeuge ( $R_z = 3,1\ \mu\text{m}$ ) auf die Oberflächenrauheit der Werkstücke übertragen werden konnte (Bild 10).

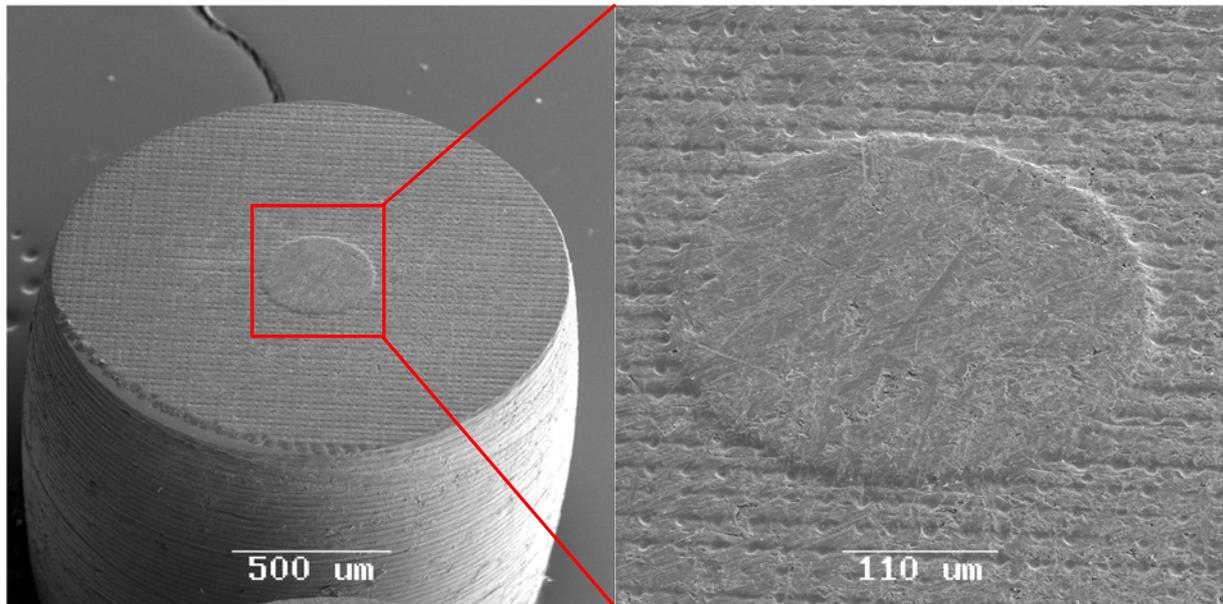


Bild 10: Prägeergebnis eines Umformwerkzeugs mit einer Oberflächenrauheit von  $R_z = 3,1 \mu\text{m}$  in eine Zylinderprobe aus 1.4301-stahl

Als Erkenntnis der ersten Versuche lässt sich ableiten, dass die Skalierung von Fertigungsprozessen im Submillimeterbereich zu Größeneffekten führt, welche eine Übertragung des Prozesswissens aus dem konventionellen Größenbereich nur bedingt ermöglicht. Anhand experimenteller Untersuchungen und numerischer Simulationen wurden relevante Größeneinflüsse bei der Miniaturisierung von Massivumformprozessen, wie z.B. der Einfluss der Werkzeugoberflächenrauheit, phänomenologisch erfasst. Auf dieser Grundlage soll in Zukunft eine Weiterentwicklung der im Makrobereich etablierten FEM-Simulation durch die Modellierung von Größeneffekten und deren Integration in die Simulation erfolgen. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen können dann zur Prozess- und Werkzeuggestaltung mit dem Ziel der Kompensation von Größeneinflüssen genutzt werden. Durch das gewonnene Prozesswissen wird die Fertigung komplexer Geometrien in Anlehnung an Realbauteile ermöglicht. Zu betrachten sind hierbei insbesondere hochlegierte Stahlwerkstoffe, die bis heute im Bereich der Mikrofertigung aufgrund der extrem schwierigen Formbarkeit im Kaltbereich eine untergeordnete Rolle spielen, die aber gerade für den Aufbau komplexer dreidimensionaler Mikrosysteme von entscheidender Bedeutung sind. Das betrachtete Werkstoffspektrum soll zukünftig auf niedrig legierte Stähle und NE-Metalle erweitert werden, wobei es zu untersuchen ist inwieweit die Größeneffekte materialspezifisch auftreten. Langfristiges Ziel ist darüber hinaus die Weiterentwicklung der FEM-Simulation durch die Integration von Erkenntnissen und Modellen über Größeneffekte bei Umformprozessen. Letztendlich wird angestrebt, die heute hauptsächlich im Makrobereich eingesetzte FEM-Simulation als universell anwendbares Hilfsmittel für die konstruktive Auslegung von Werkzeugen und Fertigungsprozessen der Mikroumformtechnik zu ermöglichen.

[1] M. Terzi, J. Wulfsberg, K. Samm, A. Ostendorf: Experimentelle und simulatorische Untersuchungen zum laserunterstützten Massivumformen von metallischen Werkstoffen. In: Prozessskalierung, Strahltechnik Band 27, Tagungsband des 2. Kolloquiums Prozessskalierung im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms Prozessskalierung, F. Vollertsen (Hrsg.), BIAS Verlag Bremen, Bremen, 11.2005, S. 21-40. ISBN:3-933762-17-0.

[2] K. Samm, M. Terzi, A. Ostendorf, J. Wulfsberg: Laser-assisted micro-forming with laser structured sapphire dies. In: ICALEO 2006 Congress proceedings, 25TH International Congress on Applications of Lasers & Electro Optics. Scottsdale, AZ USA, 10/11.2006, Paper M601, Seite 62 – 69.