



## Tribosysteme für die Kaltumformung auf der Basis von flüchtigen Schmiermedien und laserstrukturierten Oberflächen

Mathias Liewald<sup>1</sup>, Thomas Graf<sup>2</sup>, Thomas Hirth<sup>3</sup>, Christoph Wörz<sup>1</sup>, Steffen Boley<sup>2</sup>, Ehsan Zahedi<sup>2</sup>, Georg Umlauf<sup>\*3</sup>

<sup>1</sup>Institut für Umformtechnik, Holzgartenstraße 17, 70174 Stuttgart, Deutschland

<sup>2</sup>Institut für Strahlwerkzeuge, Pfaffenwaldring 43, 70569 Stuttgart, Deutschland

<sup>3</sup>Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Deutschland |

### Abstract

Technische, wirtschaftliche aber auch gesetzliche Vorgaben führen zu gesteigerten Anforderungen an Schmierstoffe für die Blechumformung. Auch die Auswirkungen auf die Umwelt werden vor diesem Hintergrund immer relevanter. Aktuelle Forschungsarbeiten verfolgen daher das Ziel, die verwendete Schmierstoffmenge zu reduzieren, um zukünftig eine Bearbeitung ohne Schmierstoffe durchführen zu können. Ausgehend vom Bestreben der Trockenumformung wird an der Universität Stuttgart deshalb ein neuartiges Verfahren zur Schmierung von Tiefziehprozessen mit flüssigem CO<sub>2</sub> als Schmierstoffersatz entwickelt. Dieses Verfahren ermöglicht das Einbringen eines Zwischenmediums in das tribologische System zwischen Blech und Werkzeug unter Verzicht auf nachfolgende Reinigungsprozesse, da das flüssige CO<sub>2</sub> bei der Entspannung auf Umgebungsdruck seinen Aggregatzustand ändert und rückstandslos verdampft.

Die Zuführung erfolgt dabei direkt in der Wirkfuge über lasergebohrte Mikrolöcher im Umformwerkzeug und wird im Modellversuch „Streifenziehen mit Flachbahn“ auf die grundsätzliche Eignung untersucht. Zur Verteilung des Kohlenstoffdioxids werden in die Werkzeugoberfläche lasergenerierte Strukturen eingebracht. Zur Beurteilung der ablaufenden Prozesse und zur Beschreibung des tribologischen Systems werden Strömungssimulationen durchgeführt, das Benetzungsverhalten von Werkzeug und Blech wird in einem Druckreaktor untersucht. |

**Keywords:** Blechumformung, Lasermikrobohren, Laserstrukturierung, überkritisches Kohlenstoffdioxid |

### 1 Einleitung

Tribologie wird als Wissenschaft von wechselwirkenden Oberflächen bei Relativbewegung definiert [1]. Dabei setzt sich das System aus Grundkörper, Gegenkörper, Zwischenstoff und Umgebungsmedium zusammen. In den meisten Blechumformprozessen werden mineralölbasierte Schmierstoffe als Zwischenmedium verwendet, um Reibung und Verschleiß zu verringern. Dabei sind bisweilen toxische Additive im Schmierstoff enthalten und die umgeformten Bauteile müssen für weitere Prozessschritte kosten- und zeitintensiv gereinigt werden [2]. Aus diesem Grund würde sich der Verzicht von Schmierstoffen positiv auf die Umwelt sowie auf die Wirtschaftlichkeit von Produktionsprozessen auswirken.

In dieser Arbeit wird ein neuartiges, umweltfreundliches Schmiersystem für die Blechumformung vorgestellt, für das flüssiges CO<sub>2</sub> als Schmierstoff verwendet

wird. In Abb. 1 ist die Prozessfolge des hier vorgestellten neuartigen Schmiersystems in vereinfachter Form dargestellt.

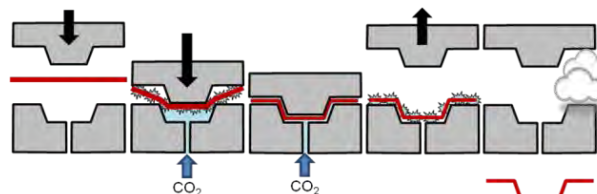


Abb. 1: Prozessfolge bei der Umformung mit flüssigem CO<sub>2</sub> als Schmierstoffersatz.

Aus dem Phasendiagramm des CO<sub>2</sub> (vgl. Abb. 2) ist ersichtlich, dass CO<sub>2</sub> bei Raumtemperatur und einem Druck von 5,73 MPa in flüssigem Zustand vorliegt. Das flüssige Schmiermedium wird direkt in die Wirkfuge geleitet und expandiert dort auf Atmosphärendruck. Die Expansion bewirkt eine Abkühlung und dadurch ent-

steht Trockeneisschnee, der als Schmiermedium wirkt und so eine Trennung von Werkzeug und Werkstück erreicht, sowie die Rückhaltekräfte verringert. Nach der Umformung erwärmt sich das Werkstück auf die Umgebungstemperatur der Produktionshalle und das Trockeneis sublimiert rückstandlos. Somit liegt kein beöltes Bauteil nach der Umformung vor und weitere Prozessschritte, wie beispielsweise die kathodische Tauchlackierung oder Lackierung, können ohne zusätzliche Zwischenschritte durchgeführt werden.

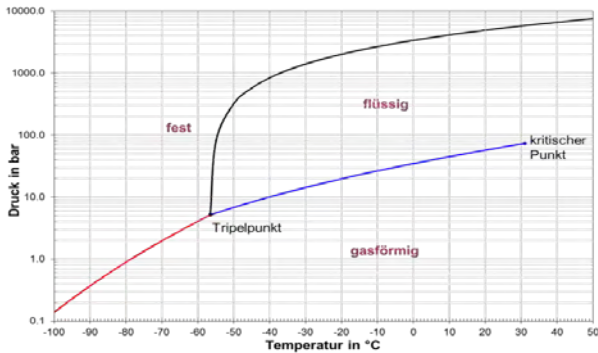


Abb. 2: Phasendiagramm von CO<sub>2</sub> [3].

## 2 Grundlagenversuche zur Untersuchung der Eignung von verflüssigten Gasen als Schmiermedium

Zu Projektbeginn wurden verschiedene Auswahlkriterien von möglichen Gasen als Schmiermedium definiert. Ausschlaggebende Punkte waren die Verfügbarkeit, die mögliche Eignung als Schmiermedium und die Nachhaltigkeit. Daraufhin wurden N<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> als optimale Gase für den Einsatz als flüchtiges Schmiermedium ausgewählt.

Verglichen mit anderen Gasen besitzt CO<sub>2</sub> eine sehr hohe Kondensations- und Erstarrungstemperatur. Bei Atmosphärendruck liegt CO<sub>2</sub> bereits bei -80 °C in fester Form (Trockeneis) vor. Aus diesem Grund wurde CO<sub>2</sub> in diesem Projekt schon sehr früh als möglicher Schmierstoffersatz zur Trockenumformung ausgewählt. Da jedoch CO<sub>2</sub> neben vielen Vorteilen auch einige Nachteile aufweist, soll untersucht werden, ob auch andere Gase als Schmierstoffersatz geeignet sind. Als erste Alternative ist hier Druckluft zu nennen, da sie in ausreichender Menge zur Verfügung steht, nicht brennbar ist und nach der Umformung umweltneutral entweicht. Da Luft zu ca. 80% aus N<sub>2</sub> besteht, wurde in dieser Untersuchung aufgrund der vereinfachten Versuchsdurchführung N<sub>2</sub> verwendet.

### 2.1 Verflüssigen von Gasen auf Metalloberflächen

Die Bewertung der beiden oben genannten Gase erfolgte im Autoklav, welcher mit einem Kamerasystem ausgerüstet wurde, um die möglichen Phasenübergänge sichtbar zu machen.

Im Autoklaven konnte gezeigt werden, dass CO<sub>2</sub> auf einer gekühlten (-10°C) Messingoberfläche kondensiert (Abb. 3). Eine flüssige Phase bildete sich bei der niedrigen Temperatur bereits ab einem Druck von 3 MPa aus. Um den Flüssigkeitsfilm auf der Metalloberfläche bei

steigenden Temperaturen aufrecht zu erhalten, musste der Druck stetig erhöht werden. Dabei kam es zu jedem Zeitpunkt zu einer vollständigen Benetzung der Oberfläche und es bildete sich ein wenige Millimeter dicker Flüssigkeitsfilm auf der Metalloberfläche. Dies deutet auf eine niedrige Oberflächenspannung hin. Ein weiterer Vorteil ist, dass CO<sub>2</sub> eine niedrige dynamische Viskosität  $\eta$  von 0,128 mPa\*s ( $T = -10^\circ\text{C}$ ,  $p = 5 \text{ MPa}$ ) aufweist [4]. Dieser Wert ist um den Faktor 10 kleiner als für Wasser unter Normalbedingungen. Dadurch kann eine gute Spaltgängigkeit in der Werkfuge während des Umformprozesses sichergestellt werden. Die Viskosität stellt ein Maß für die Fließfähigkeit dar, je niedriger die Viskosität einer Flüssigkeit ist, desto dünnflüssiger und damit fließfähiger ist die Flüssigkeit. Dieser Zustand einer niedrigen Viskosität wird angestrebt, wenn flüssiges CO<sub>2</sub> als Schmiermedium eingesetzt wird.

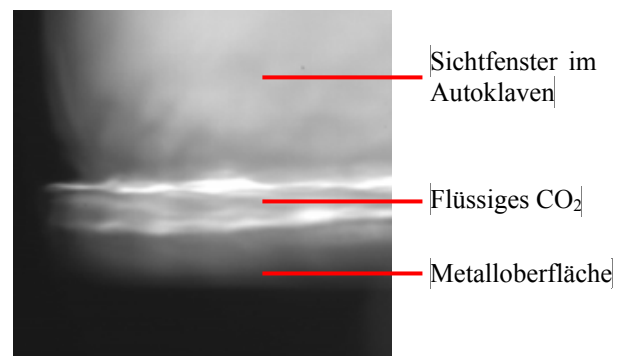


Abb. 3: Bildausschnitt vom Benetzungsverhalten von flüssigem CO<sub>2</sub> auf einer Metalloberfläche.

Im Autoklaven konnte bei der Verwendung von N<sub>2</sub> kein Phasenübergang von gasförmig zu flüssig gezeigt werden. Es bildete sich lediglich ein Dunstschleier, die aufgenommen Bilder können jedoch nicht hinreichend gut ausgewertet werden, da keine eindeutige Phasengrenze zu erkennen ist. Der Druck wurde in einem Bereich von 0,1 MPa bis 8 MPa variiert. Diese Beobachtungen stimmen mit dem Phasendiagramm von N<sub>2</sub> überein. Die Tatsache, dass sich bei Verwendung von N<sub>2</sub> unter Umformbedingungen keine flüssige Phase ausbildet, spiegelt sich in den erhöhten Reibwerten für die Streifenziehversuche am IFU im Vergleich zu CO<sub>2</sub> wieder (siehe Kapitel 3.3).

### 2.2 Reaktiver Einfluss von CO<sub>2</sub> auf eine Metalloberfläche

Wenn im Umformprozess die Rauigkeitsspitzen von Werkzeug- und Werkstückoberfläche in Kontakt kommen, entsteht durch das Abscheren dieser Spitzen eine reaktionsfähige Metalloberfläche ohne Oxidschicht. An den freien Metalloberflächen kann es durch den Kontakt mit flüssigem oder überkritischem CO<sub>2</sub> eine chemische Veränderung geben. Zudem wurde auch N<sub>2</sub> als Atmosphäre eingesetzt.

Um den reaktiven Einfluss zu untersuchen, wurden am IGVP Experimente in einer definierten Gasatmosphäre durchgeführt. Die entsprechenden Proben wurden in einer Glovebox mechanisch gebrochen und anschließend einer ESCA-Messung (Röntgenphoto-

elektronenspektroskopie, engl.: electron spectroscopy for chemical analysis) unterzogen, um eine mögliche chemische Veränderung der Oberfläche zu detektieren.

Als Referenz wurde je eine Probe bei Raumtemperatur und eine weitere bei 60 °C an Umgebungsluft gebrochen. Die Messung bei erhöhter Temperatur sollte dabei die auftretenden Temperaturen in einem Umformprozess simulieren.

Dieses Analyseverfahren nutzt die unterschiedlichen Bindungsenergien der in einem Werkstoff vorkommenden Elemente. Die Probe wird mit Röntgenstrahlung oder UV-Licht bestrahlt, der dabei auftretende photoelektronische Effekt der oberflächennahen Elektronen wird für die Detektierung ausgenutzt. Die elementspezifischen kinetischen Energien werden in einem Detektor spektroskopisch ausgewertet und anschließend in ein Liniendiagramm umgewandelt. Die Eindringtiefe der eingesetzten Strahlung beträgt 5 nm.

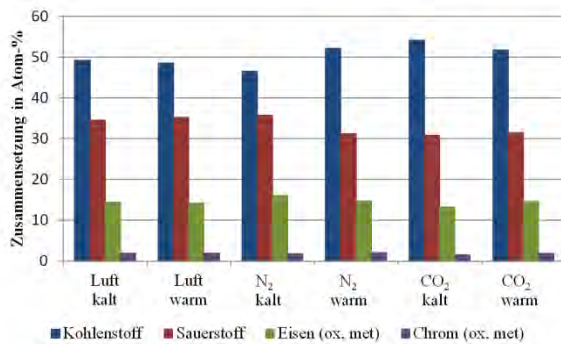


Abb. 4: Chemische Zusammensetzung (in Atom-%) der wichtigsten Elemente von den Werkstoffproben mittels ESCA gemessen.

Aus dem Diagramm in Abb. 4 ist zu erkennen, dass sich die chemische Zusammensetzung hinsichtlich der vier wichtigsten Elemente (C, O<sub>2</sub>, Fe, Cr) nicht wesentlich ändert. Eine leichte Schwankung des Verhältnisses von Kohlenstoff zu Sauerstoff ist darin begründet, dass es sich bei der gebrochenen Oberfläche nicht um eine glatte Oberfläche handelt. Eine abschließende Bewertung zur Eignung der Gase als Schmiermedium kann erst durch entsprechende Streifenziehversuche vorgenommen werden. Die entsprechenden Ergebnisse sind im Kapitel 3.3 aufgeführt.

### 3 Verhalten von flüssigen Gasen in und um lasergenerierte Mikrolöcher

Das langfristige Ziel in diesem Projekt ist die umformtechnische Herstellung von komplexen Blechbauteilen mit lokal angepassten Tribosystemen. Als Grundlage hierfür wird in der ersten Projektphase auf Basis von Streifenziehversuchen untersucht, wie durch die Auslegung der Werkzeugwirkflächen die Reibung gezielt angepasst werden kann. Durch Variation der Anzahl der Mikrobohrungen und deren Durchmesser im ersten Schritt sowie durch gezielte Aufbringungen von Oberflächenstrukturierungen im zweiten Schritt soll dies erreicht werden.

### 3.1 Lasergenerierte Mikrobohrungen

Die effiziente Mikrobearbeitung von Umformwerkzeugen spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von geometrisch anspruchsvollen Umformprozessen. Die Bearbeitungszeit, Produktionskosten und die Präzision bei der Bearbeitung von großen Oberflächen definieren maßgeblich das Bearbeitungsverfahren für das Umformwerkzeug. Für die Bearbeitung dieser Werkzeuge werden aufgrund der Qualitätsanforderungen kurz und ultrakurz gepulste Lasersysteme gefordert.

Um eine thermische Schädigung durch die Laser-Mikrobearbeitung zu verhindern, müssen passende Prozessstrategien angewendet werden. Andernfalls können die Qualitätsanforderungen nicht erreicht werden. Ungeeignete induzierte Wärmemengen können die Oberflächenqualität, hauptsächlich die Rauigkeit und die Oberflächeneigenschaften, negativ beeinflussen.

In dieser Arbeit werden Laserpulse mit einer Dauer von 8 ps dazu verwendet, Mikrobohrungen in Wechselplättchen für Streifenziehversuche einzubringen. Durch diese Bohrungen soll CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> an die Oberfläche der Proben geleitet werden.

Hergestellt wurden die Mikrobohrungen in Werkzeugstahl 1.2379 mit einer Stärke von 5 mm. Die Eigenschaften des verwendeten gepulsten Laser (TruMicro 5050) sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Prozessparameter der verwendeten Lasersysteme.

Lasersystem	TruMicro 5050 (Fa. Trumpf)
Pulsdauer	8 ps
Wellenlänge	1030 nm
Mittlere Leistung	76 W (bei 300 kHz)
Max. Pulsenergie	250 μJ
Puls wiederholungsrate	300 kHz
Beugungsmaßzahl	< 1,3
Polarisation	Zirkular

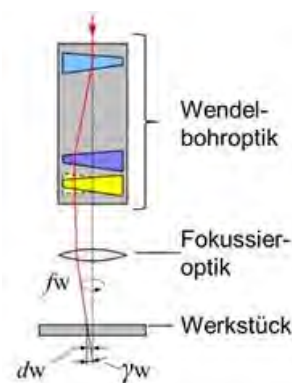


Abb. 5: Schematische Darstellung der eingesetzten Wendelbohroptik.

Durch die Rotation des Laserstrahls mithilfe einer Wendelbohroptik (siehe Abb. 5) kann der Werkstoff gleichmäßig abgetragen werden. Diese spezielle Optik versetzt den Laserstrahl in eine Rotation mit 2000 U/min. Zusätzlich kann ein Bahnradius von 0 bis 400 μm eingestellt werden. Dies ermöglicht auch in dickeren Werkstoffen das Bohren von qualitativ hochwertigen Löchern. Zur Fokussierung des Laserstrahls wurde eine Linse mit einer Brennweite von 110 mm

eingesetzt. Dies ergibt bei einem kollimierten Strahl von 5,2 mm einen Fokusbereich von ca. 38  $\mu\text{m}$ .

Für einen schichtweisen Abtrag wurde die Rotationsbewegung mit einer Radialbewegung überlagert. Wie in Abb. 6 zu sehen, ergibt sich eine spiralförmige Bahn, von der Mitte zum äußeren Rand der Bohrung. Die Fokussierung des Strahls wurde nach jeder abgetragenen Schicht schrittweise angepasst. Außerdem wurde der maximale Radius schrittweise reduziert. Dieser Prozess wurde 22-mal wiederholt und dauerte insgesamt 8 Minuten.

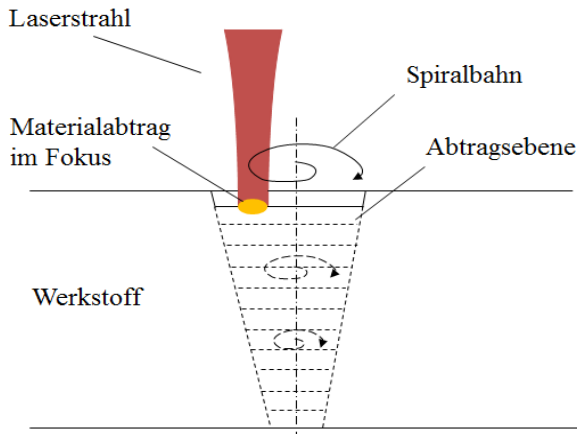


Abb. 6: Strategie beim Laserbohren.

Um die Oxidation an der Bohrungsoberfläche zu reduzieren, wurde unter Stickstoffatmosphäre gebohrt. Mit dieser Strategie wurde (bezogen sowohl auf Bohrungsrichtung, als auch bezüglich  $\text{CO}_2$ -Fluss) ein Austrittsdurchmesser, wie in Abb. 7 dargestellt, von ca. 140  $\mu\text{m}$  bei einem Eintrittsdurchmesser von 400  $\mu\text{m}$  erreicht. Außerdem wurden Proben mit einem Austrittsdurchmesser von 120  $\mu\text{m}$  gefertigt.

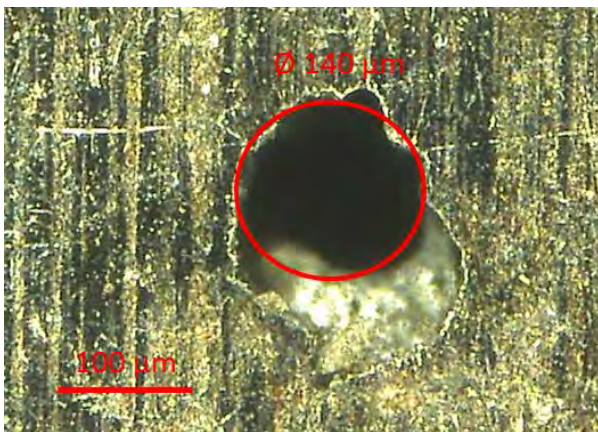


Abb. 7: Austrittsloch einer Bohrung in 5 mm Werkzeugstahl 1.2379.

Für weitere Versuche wurden jeweils drei mal 9, 25 und 49 Bohrungen auf Werkzeugproben auf einer Fläche von 20 x 20  $\text{mm}^2$  eingebracht. Die Bohrungen wurden in einer Rechteckanordnung mit einem Abstand von jeweils 6,6 mm, 4,0 mm und 2,9 mm angeordnet. Beispielfähig ist in Abb. 8 die Probe mit 9 (3 x 3) Bohrungen dargestellt.

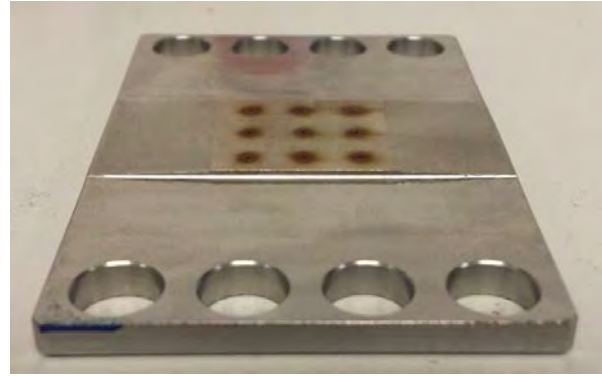


Abb. 8: Wechsellplatte für einen Streifenziehversuch mit 9 Bohrungen (3 x 3 Anordnung).

### 3.2 $\text{CO}_2$ -Austritt durch die Mikrolöcher

Neben den Streifenziehversuchen und den daraus gewonnenen Reibungszahlen als Qualitätsmerkmal sollte auch das Verhalten der eingesetzten Gase am Bohraustritt von lasergebohrten Mikrolöchern sichtbar gemacht werden. Für diese Untersuchungen am IGVP wurde der bereits vorhandene Probenstisch so modifiziert, dass eine Werkzeugprobe mit den Maßen 5 x 30 x 35 mm (H x B x T), über einen O-Ring abgedichtet, am Messingblock angebracht werden konnte.

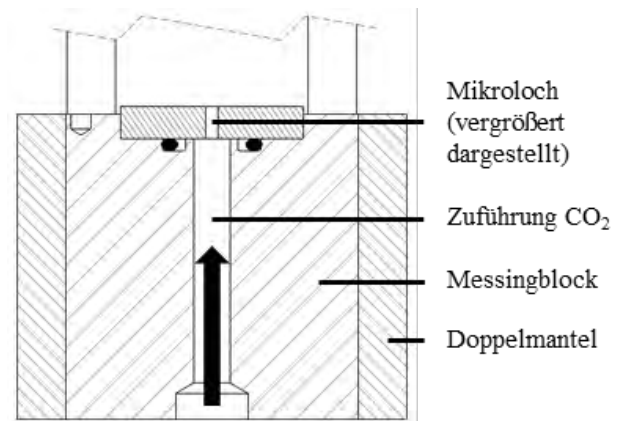


Abb. 9: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Expansion von flüssigem  $\text{CO}_2$ .

Die Zuführung des flüssigen  $\text{CO}_2$  aus einer Gasflasche mit Steigrohr erfolgt über ein Rohrleitungssystem bis zur Unterseite des Messingblocks (siehe Abb. 9). Dieser ist mit einer durchgängigen Bohrung versehen. Die Werkzeugproben aus dem Werkzeugstahl 1.2379 wurden am IFSW gefertigt, die genaue Herstellung, sowie Dimensionen der Mikrobohrungen in die Werkzeugproben werden in Kapitel 3.1 beschrieben.

Bei den Experimenten wird  $\text{CO}_2$  auf Umgebungsdruck entspannt. Jedes Mikroloch im Probenplättchen stellt eine Drossel dar. Bei der Expansion kommt der Joule-Thomson-Effekt zum Tragen. Aus der van-der-Waalschen Zustandsgleichung ergibt sich für  $\text{CO}_2$  eine Inversionstemperatur  $T_i = \frac{2 \cdot a}{R_m \cdot b}$  von 2053 K [5,6]. Da die Umgebungstemperatur in jedem Fall unter der Inversionstemperatur liegt, kommt es bei der Drosselung von  $\text{CO}_2$  zu einer Abkühlung. Die Folge ist die Bildung eines feinen, schneeähnlichen Feststoffs, dem sogenannten Trockeneis (siehe Abb. 10). Damit die Vor-

gänge in der Wirkfuge sichtbar gemacht werden konnten, wurde in einem definierten Abstand von 60  $\mu\text{m}$  eine Plexiglasplatte über dem Werkstück angebracht. Diese Platte repräsentiert das umzuformende Werkstück, ohne jedoch den erforderlichen Gegendruck auf das Werkzeug auszuüben.

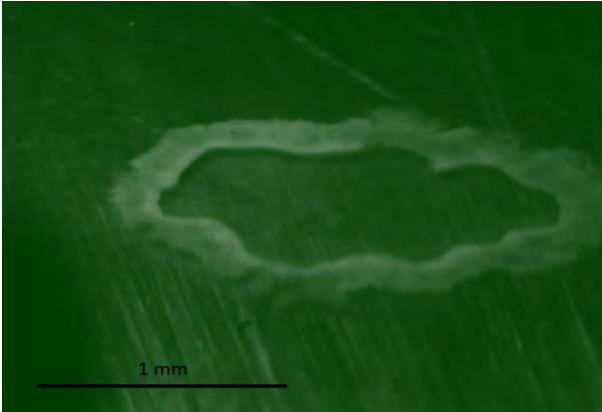


Abb. 10: Bildung von Trockeneis bei der Expansion von flüssigem  $\text{CO}_2$  auf Atmosphärendruck durch eine Mikrobohrung.

Nach einer Zeit von 1,5 sec nach dem ersten sichtbaren Austritt von  $\text{CO}_2$  bildet sich ein kreisförmiger Ring aus Trockeneis mit einem Außendurchmesser von 0,5 mm. Dieser vergrößert sich innerhalb der nächsten 3 sec auf 2,5 mm.

In weiteren Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich der Gasstrom aus zwei benachbarten Löchern (Abstand von bis zu 6,6 mm) überlagert und sich ein geschlossener Gasfilm bildet. In einem Umformprozess, mit einem Druck höher als 0,5 MPa in der Wirkfuge, kommt es zu einem flächigen Verflüssigen des  $\text{CO}_2$ . Ein durchgehender Schmierfilm aus flüssigem  $\text{CO}_2$  kann sich bilden.

Wie bereits oben beschrieben, kühlt sich das expandierende  $\text{CO}_2$  am Bohraustritt ab. Bei einem mittleren Joule-Thomson-Koeffizienten  $\mu = 1,2 \text{ K/bar}$  [7] ergibt sich für das  $\text{CO}_2$  rechnerisch eine Temperatur von  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Experimentell konnte eine Temperatur des Trockeneisschnees von  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$  mit einer IR-Kamera (ThermaCAM P20, FLIR Systems) nachgewiesen werden. Diese Temperatur überträgt sich lokal auch auf das Metall. In einem Abstand von 3 mm zum Bohraustritt wurde dagegen eine Oberflächentemperatur von  $11 \text{ }^\circ\text{C}$  detektiert. In Folge der Abkühlung auf bis zu  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$  verringert sich die Zähigkeit des Werkzeugstahls 1.2379. Der Einfluss des Temperaturprofils auf die mechanischen Eigenschaften des Werkzeugstahls wird mit Experimenten im Kerbschlagbiegeversuch untersucht.

Die Abweichung zwischen den rechnerischen und den experimentell gemessenen Temperaturen kommt durch unterschiedliche Emissionsgrade zustande. Dieser beträgt für Werkzeugstahl  $\epsilon = 0,64$  gegenüber  $\epsilon = 0,98$  von Trockeneis [8]. Zudem ist der Joule-Thomson-Effekt eine druck- und temperaturabhängige Variable. Am Gasflaschenausgang wurde stets ein Druck von 0,62 MPa gemessen, dieser Druck verringert sich jedoch bis zum Austritt an der Mikrobohrung. Eine Druckmessung an dieser Stelle ist jedoch nicht möglich.

### 3.3 Untersuchung verschiedener Gase hinsichtlich ihrer Eignung als Schmierstoffersatz

Zur Beurteilung der Schmierwirkung wurde die Reibungszahl  $\mu$  in Streifenziehversuchen ermittelt. Hierzu kam die Streifenziehvorrichtung am IFU zum Einsatz. Aufgrund der niedrigen Kondensations- bzw. Erstarrungstemperatur von  $\text{N}_2$  ist eine Verwendung in flüssiger oder fester Form schwer zu realisieren. Um die Vergleichbarkeit der Streifenziehversuche zu gewährleisten, wurde daher am Auslass der  $\text{CO}_2$ - und  $\text{N}_2$ -Gasflasche ein Druck von 6 MPa gewählt. Im Gegensatz zu  $\text{CO}_2$  liegt Stickstoff bei diesem Druck in gasförmiger Form vor.

Das Werkzeug zur Ermittlung der Reibungszahl  $\mu$  ist in Abb. 11 zu sehen. Eine genaue Beschreibung des Versuchsaufbaus befindet sich in [9].

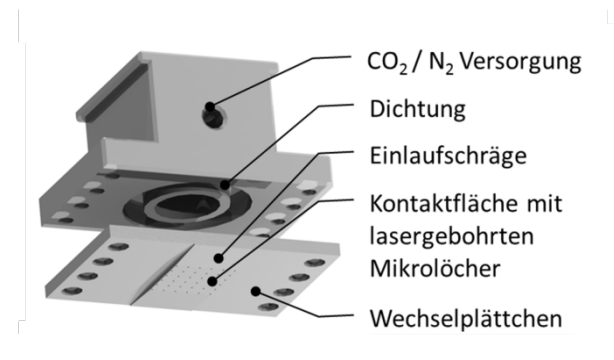


Abb. 11: Versuchswerkzeug mit Wechsellättchen für Streifenziehversuche mit  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$ .

Insgesamt kamen vier verschiedene Wechsellättchen zum Einsatz, um den Einfluss der Ausströmfläche in den Untersuchungen zu berücksichtigen. Wie in Tabelle 2 zu sehen ist, wurden bei den vier Wechsellättchen der Lochdurchmesser (120 und 140  $\mu\text{m}$ ) sowie das Lochmuster (25 und 49 Mikrolöcher) variiert.

Tabelle 2: Wechsellättchen mit unterschiedlichen Mikrobohrungen für die Streifenziehversuche mit  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$ .

Lochanzahl [ ]	25	25	49	49
$\varnothing$ der Mikrobohrung [ $\mu\text{m}$ ]	120	140	120	140
Ausströmfläche [ $\text{mm}^2$ ]	0,28	0,38	0,55	0,75

Die Streifenziehversuche wurden mit zwei verschiedenen Ziehgeschwindigkeiten (50 und 100 mm/s) sowie drei Flächenpressungen (2,2 MPa 5,8 MPa und 9 MPa) durchgeführt und jeweils fünfmal wiederholt. Als Blechmaterial kam DC04 in Walzrichtung zum Einsatz.

Zur Bewertung der Schmierwirkung wurden die Versuche für alle Prozessparameter mit den beiden Referenzschmierstoffen Wisura ZO3368 und AK3080 wiederholt. Hierbei wurde eine Schmiermittelmenge von  $1,35 \text{ g/m}^2$  auf die Blechstreifen aufgebracht.

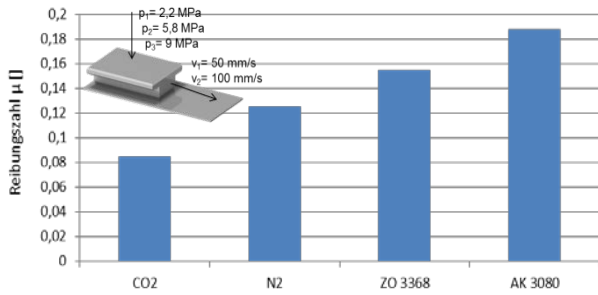


Abb. 12: Mittelwert der Reibungszahl für verschiedene Prozessparameter bei unterschiedlichen Schmierungsarten im Streifenziehversuch.

In Abb. 12 sind die Ergebnisse der Untersuchung für verschiedene Schmierstoffe zu sehen. Für eine bessere Übersicht ist die Reibungszahl  $\mu$  hier als Mittelwert aller Versuche bei unterschiedlichen Ziehgeschwindigkeiten und Flächenpressungen dargestellt.

Mit CO<sub>2</sub> werden die geringsten Reibungszahlen erreicht. Doch auch mit N<sub>2</sub> erhält man im Durchschnitt eine deutlich niedrigere Reibungszahl als bei Verwendung der Referenzschmierstoffe Wisura ZO3368 und AK3080.

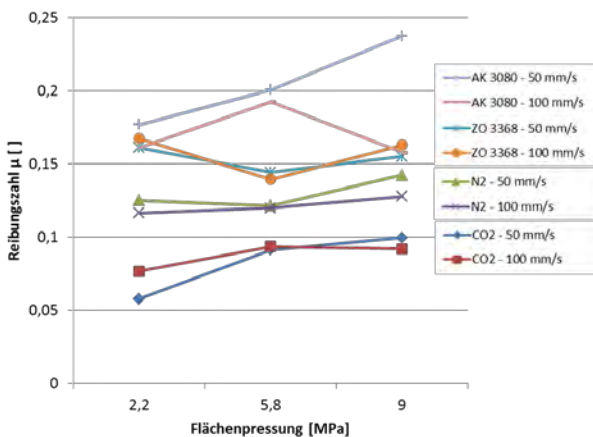


Abb. 13: Reibungszahl im Streifenziehversuch für unterschiedliche Flächenpressungen, Ziehgeschwindigkeiten und Schmierungsarten.

In Abb. 13 ist zu sehen, dass bei den Referenzschmierstoffen eine starke Abhängigkeit von der Flächenpressung und Ziehgeschwindigkeit vorliegt. Gerade bei einer langsamen Ziehgeschwindigkeit und hohen Flächenpressung steigt die Reibungszahl für den Schmierstoff Wisura AK3080 stark an. N<sub>2</sub> weist dagegen für alle Flächenpressungen eine niedrige Reibungszahl mit einer geringen Geschwindigkeitsabhängigkeit auf. Somit stellt N<sub>2</sub> bzw. Druckluft eine Alternative zur Verwendung von mineralölbasierten Schmierstoffen dar. Die Gründe für die reduzierten Reibungszahlen sind bisher nicht geklärt. Als nächster Schritt soll hierzu mit Hilfe von Temperaturmessungen in der Wirkfuge sowie Streifenziehversuche mit N<sub>2</sub> bei erhöhtem Gasdruck die Ursache für die reduzierte Reibung näher untersucht werden.

Aufgrund der mit Abstand geringsten Reibungszahlen bei den Streifenziehversuchen mit CO<sub>2</sub> wird im Folgenden jedoch zunächst der Schwerpunkt auf CO<sub>2</sub> als Schmierstoffersatz gelegt.

### 3.4 Auslegung der Werkzeugwirkfläche zur gezielten Anpassung der Reibungsbedingungen in Werkzeugen – Variation der Mikrobohrungen

Wie bereits vorherigen Abschnitt vorgestellt, wurden unter anderem Streifenziehversuche mit CO<sub>2</sub> als Schmierstoffersatz durchgeführt und dabei verschiedene Wechselplättchen mit unterschiedlichen Mikrobohrungen (vergleiche Tabelle 2) verwendet. Die detaillierten Ergebnisse mit Unterscheidung nach Ziehgeschwindigkeit, Flächenpressung, Anzahl der Mikrobohrungen sowie Durchmesser der Mikrobohrungen für die Versuche mit CO<sub>2</sub> sind in Abb. 14 dargestellt.

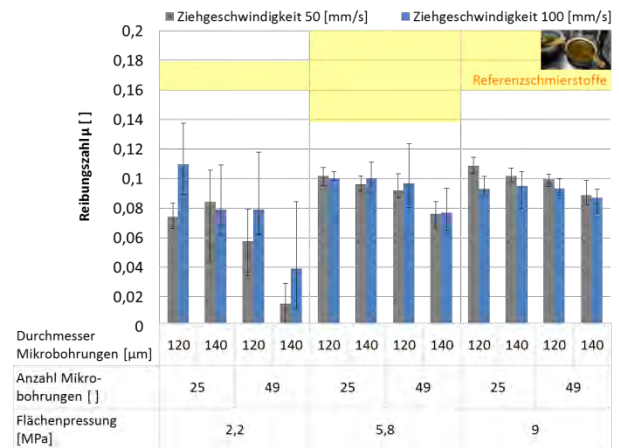


Abb. 14: Reibungszahl im Streifenziehversuch mit CO<sub>2</sub> als Schmierstoffersatz.

Die Fehlerindikatoren im Diagramm zeigen die maximalen und minimalen Werte bei der fünffachen Replikation der Versuche. Es ist auffällig, dass bei der niedrigen Flächenpressung von 2,2 MPa des Ziehbackens eine deutlich höhere Varianz der Versuchsdaten vorliegt. Dennoch ist bei dieser Flächenpressung für beide Ziehgeschwindigkeiten eine eindeutige Abnahme der Reibungszahl mit zunehmender Ausströmfläche der Mikrobohrungen erkennbar. Demnach kann durch Reduzierung der Flächenpressung und Einbringung von vielen Mikrobohrungen mit Durchmesser 140 μm das Tribosystem im Werkzeug lokal so angepasst werden, dass die Reibungszahl minimal wird. Bei steigenden Flächenpressungen nimmt der Einfluss der Ausströmfläche dagegen ab. So sinkt die Reibungszahl bei einer Flächenpressung von 9 MPa durch Erhöhung der Anzahl der Mikrobohrungen und deren Durchmesser nur noch gering. Gerade aus wirtschaftlicher Sicht sind diese Ergebnisse sehr positiv zu bewerten. So benötigt man bei erhöhten Flächenpressungen eine deutlich geringere Anzahl von Mikrobohrungen und erhält dennoch eine geringere Reibungszahl als mit den mineralölbasierten Schmierstoffen (im Diagramm gelb dargestellt). Durch das zusätzliche Aufbringen von Oberflächenstrukturen wird erwartet, dass die Anzahl der Mikrobohrungen weiter reduziert werden kann.

### 3.5 Laserstrukturierung

Wie bereits in Kapitel 3.1. beschrieben, dauert eine Mikrobohrung bis zu 8 min. Deshalb ist es vorgesehen, parallel zu den Mikrolöchern auch feinste Strukturen in

die Metalloberfläche einzubringen, um dadurch einerseits durch die zusätzliche Strukturierung die Anzahl notwendiger Mikrobohrungen zu reduzieren, ohne die Reibwerte zu erhöhen und andererseits durch die Strukturen die Verteilung des flüssigen Schmiermediums über die gesamte Werkzeugoberfläche zu erleichtern.

Im Rahmen dieser Arbeiten wurden Strukturen hoher Qualität um die Laserbohrungen erzeugt. Im Folgenden werden verschiedene Strategien zur Strukturierung der Proben vorgestellt. Jede der Streifenzugproben, mit unterschiedlichen Bohrungsanzahlen, wurde mit einer von drei unterschiedlichen Strategien bearbeitet.

### Sternstruktur

Am Austritt der Bohrungen wurde eine sternförmige Struktur erzeugt. Jede sternförmige Struktur besteht aus 6 Nuten, die jeweils um 30 Grad zueinander verdreht sind. Der Durchmesser des Sterns und damit die Länge jeder Nut betragen 3,8 mm. Die Nuten kreuzen sich idealerweise in der Mitte der Bohrung. In Abb. 15 a) ist jedoch zu sehen, dass die Sternstruktur aufgrund von Positionierfehlern nicht konzentrisch zu den Bohrungen angeordnet ist. Jedoch kreuzt mindestens eine Nut die Laserbohrung.

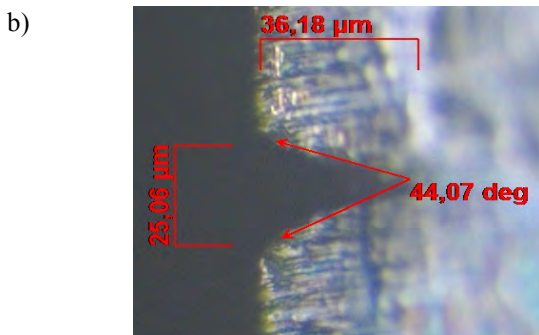
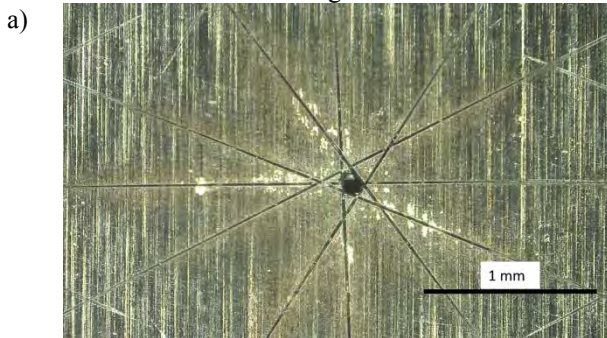


Abb. 15: a) Sternstruktur am Bohraustritt, b) Detailansicht als Querschnitt einer Nut zur Beurteilung der Eindringtiefe des Lasers.

Zur Erzeugung der Nuten wurde eine Kombination aus einer zylindrischen und einer sphärischen Linse verwendet. Diese formen den kollimierten Laserstrahl zu einem Linienfokus mit einer Länge von ca. 3,9 mm und einer Breite von ca. 30 µm. In Abb. 16 ist zu sehen, wie die zylindrische Linse, mit Brennweite 150 mm, den kollimierten Strahl in einer Achsrichtung fokussiert. Die plan-konvexe (sphärische) Linse, mit einer Brennweite von 60 mm, fokussiert den Strahl in beiden Achsrichtungen auf die Probe.



Abb. 16: Schematische Darstellung der Linsenordnung für Linienfokus.

Unter Berücksichtigung des Wärmeakkumulationseffekts und seiner Auswirkungen [10, 11] wurde zur Vermeidung von Schmelzablagerungen die Repetitionsrate hier auf 100 kHz beschränkt. Dies verhindert ein Verstopfen des Bohrlochs. Um eine Nuttiefe von ca. 35 µm (Abb. 15 b) zu erreichen, waren zwei Millionen Pulse nötig.

### Kreuzstruktur

Eine weitere Struktur besteht aus mehreren, zueinander senkrechten Nuten. Der Nutabstand zwischen zwei parallelen Nuten beträgt 300 µm. Die Nuten sind in einem Winkel von 45 Grad zur Bewegung der Streifenzugprobe orientiert. Der Laserstrahl wurde wie bei der Erzeugung der Sternstruktur wieder zu einem Linienfokus geformt. Das Werkstück wurde mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 4 mm/s parallel zur Richtung des Linienfokus bewegt. Zuerst wurden die Nuten in -45 Grad, anschließend die in 45 Grad Richtung erzeugt. Als Laserparameter wurde eine Pulsenergie von 250 µJ bei einer Repetitionsrate von 150 kHz gewählt. Die Größe und Qualität der Kreuzstruktur ist in Abb. 17 zu entnehmen.

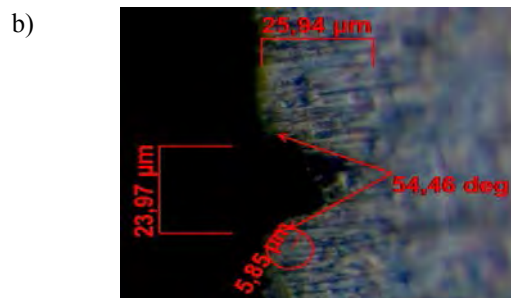
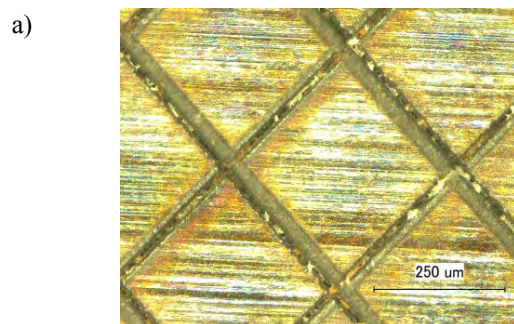


Abb. 17: a) Kreuzstruktur am Bohraustritt, b) Detailansicht als Querschnitt einer Nut zur Beurteilung der Eindringtiefe des Lasers.

### Asymmetrische Nöpfchenstruktur

Die Nöpfchenstruktur wurde durch eine Kombination aus sphärischer Linse und optischen Keil erzeugt. Der kollimierte Laserstrahl wird dabei durch den Keil, mit einem Keilwinkel von 10 Grad, um 5 Grad abgelenkt. Der Strahl wird, durch eine um 4 mm aus der Strahlachse verschobene und 22 Grad verkippete bi-konvexe (sphärische) Linse, geleitet wodurch der Strahlquerschnitt eine Tropfenform erhält. Die Brennweite der verwendeten Linse betrug 125 mm. Als Laserparameter wurden eine Pulsenergie von 250  $\mu\text{J}$  und eine verringerte Repetitionsrate von 6 kHz eingestellt. Dank der reduzierten Repetitionsrate ist der zeitliche Abstand zweier aufeinander folgender Pulse lang genug, um Wärmeakkumulationseffekte zu vermeiden [10]. Um eine Tiefe von 50  $\mu\text{m}$ , an der tiefsten Stelle des Nöpfchens zu erhalten, waren 4800 Pulse nötig. In Abb. 18 b) ist ein realer Querschnitt längs der Nöpfchenstruktur dargestellt. Die Tiefe (A-B) beträgt 47  $\mu\text{m}$  und die Struktur ist 430  $\mu\text{m}$  lang (C-D). Diese Abmessungen wurden für alle Probenplättchen mit Nöpfchen als Struktur reproduzierbar eingehalten.

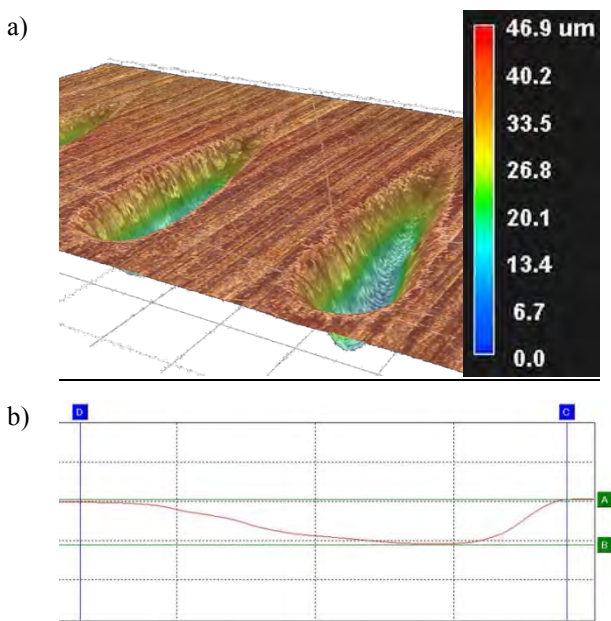


Abb. 18: a) Zusammengesetztes 3D-Bild einer Nöpfstruktur und b) Darstellung des mittigen Querschnittes längs der Struktur.

### Ausblick

In den verbleibenden Monaten der ersten Förderperiode werden Streifenziehversuche mit strukturierten Oberflächen durchgeführt. Ziel dabei ist es, eine unterstützende Wirkung der Strukturen bei der Minderung der Reibungszahl nachzuweisen. Des Weiteren soll am IGVP das Ausbreitungsverhalten des Schmiermediums durch eine zusätzliche plasmatechnologische Oberflächenmodifizierung weiter verbessert werden. Erste Untersuchungen mit kreisförmig angeordneten Strukturen um ein Mikroloch zeigten bereits eine deutliche Verbesserung des Ausbreitungsverhaltens gegenüber unstrukturierten Oberflächen. Weiter werden verschiedene Kombinationen von Mikrobohrungen mit Strukturierungen der Oberfläche im Streifenziehversuch am IFU untersucht. In weiteren Untersuchungen soll die

Effizienz des Laserbohr- und Laserstrukturierungsprozesses nochmals verbessert werden. Insbesondere das Laserbohren von dicken Proben mit kleinem Aspektverhältnis ist ein zeitintensiver Prozess. Die Anwendung von Ultrakurz-gepulsten Laserstrahlquellen mit hohen Pulsenergien ist eine Möglichkeit zur Beschleunigung des Bohrprozesses von tiefen Bohrungen. Eine weitere Alternative zur Steigerung der Prozesseffizienz ist das Bohren mit radial polarisierten Laserstrahlen. Ausgehend von den Ergebnissen der Messung des Reibkoeffizienten für Proben mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen werden diese in zukünftigen Untersuchungen am IFSW optimiert. Damit einhergehend wird die Positioniergenauigkeit des Versuchsaufbaus weiter verbessert, um die Strukturen relativ zu den Bohrungen mit höherer Genauigkeit ausrichten zu können.

Zusammen mit den bisherigen Versuchsergebnissen soll somit am Ende des Projekts eine Empfehlung ausgesprochen werden, mit welcher Gestaltung der Werkzeugwirkfläche (Anzahl und Durchmesser der Mikrobohrungen sowie Strukturierung der Oberfläche) welche Reibungsbedingungen erzielt werden können.

### Danksagung

Diese Arbeit wird von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1676 Trockenumformen – Nachhaltige Produktion durch Trockenbearbeitung in der Umformtechnik gefördert. Die Autoren bedanken sich bei der DFG für die finanzielle Unterstützung.

### Referenzen

- [1] Gesellschaft für Tribologie (Hrsg.): Tribologie – Verschleiß, Reibung, Definitionen, Begriffe, Prüfung. GfT-Arbeitsblatt 7, Aachen (2002).
- [2] F. Vollertsen, F. Schmidt: Dry Metal Forming: Definition, Chances and Challenges. Int. J. Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology 1/1 (2014) 59-62.
- [3] ChemicalLogic Corporation, <http://www.chemicallogic.com/Pages/default.aspx> (2015).
- [4] Online Berechnungssoftware, [http://www.peacesoftware.de/einigewerte/calc\\_co2.php5](http://www.peacesoftware.de/einigewerte/calc_co2.php5).
- [5] P. Atkins, J. de Paula: Physikalische Chemie, 5. Auflage, Wiley-VCH-Verlag (2013).
- [6] E. Hering, R. Martin, M. Stohrer: Taschenbuch der Mathematik und Physik, 4. Akt. Auflage, Springer-Verlag(2005).
- [7] E. S. Burnett: Experimental Study of the Joule-Thomson Effekt in Carbon Dioxide, Phys. Rev 22, 590 (1923).
- [8] KLEIBER Infrared GmbH, <http://www.kleiberinfrared.de/index.php/de/amanwendungen/emissionsgrade.html>.
- [9] M.Liewald, T.Graf, T.Hirth, et al.: Tribosysteme für die Kaltumformung auf der Basis von flüchtigen Schmiermedien und laserstrukturierten Oberflächen, Dry Met. Forming OAJ FMT 1 (2015) S.22-33.
- [10] R. Weber, T. Graf, P. Berger, V. Onuseit, M. Wiedenmann, C. Freitag, and A. Feuer, "Heat accumulation during pulsed laser materials processing," Opt. Express 22(9), 11312–11324 (2014).
- [11] Bauer, F., Michalowski, A., Kiedrowski, Th., Nolte, S., "Heat accumulation in ultra-short pulsed scanning laser ablation of metals," Opt. Expr., 23, 1035 – 1043 (2015).