



## 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>, Markus Singer\*<sup>1</sup>, Anne Feuer<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 Bearbeitungen ohne Schmierstoffe durchführen zu können. Ausgehend vom Bestreben der Trockenumformung wird an der Universität Stuttgart daher 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 mit 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 CO<sub>2</sub> 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. Fig. 1 zeigt die Prozessfolge des hier vorgestellten neuartigen Schmiersystems in vereinfachter Form.

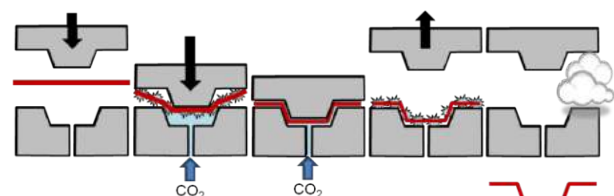


Fig. 1: Prozessfolge bei der Umformung mit flüssigem CO<sub>2</sub> als Schmierstoffersatz.

Das Phasendiagramm des CO<sub>2</sub> zeigt nach Fig. 2, dass CO<sub>2</sub> bei Raumtemperatur und einem Druck von 57,3 bar in flüssigem Zustand vorliegt. Das flüssige Schmiermedium wird direkt in die Wirkfuge geleitet und expandiert dort auf Atmosphärendruck. Dies bewirkt eine Abkühlung und es entsteht Trockeneisschnee, der als Schmiermedium wirkt, eine Trennung von

Werkzeug und Werkstück erreicht und die Rückhaltekräfte verringert. Der Druck in Höhe von ca. 57 bar, welcher der Normalkraft auf die Wirkfläche des Umformwerkzeugs entgegenwirkt, erzeugt ebenfalls eine Verringerung der Rückhaltekräfte. Nach der Umformung erwärmt sich das Trockeneis durch die Umgebungstemperatur der Produktionshalle und geht wieder in den gasförmigen Aggregatzustand über. Somit liegt kein beöltes Bauteil nach der Umformung vor und weitere Prozessschritte, wie kathodische Tauchlackierung oder Lackierung, können ohne zusätzliche Zwischenschritte durchgeführt werden.

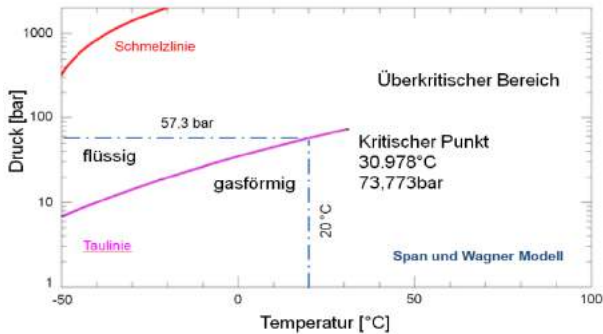


Fig. 2: Phasendiagramm von CO<sub>2</sub> [3].

## 2 Versuchsaufbau

Ziel war es, die Streifenziehmaschine mit Flachbahn des Instituts für Umformtechnik so zu modifizieren, dass die Rückhaltekräfte des untersuchten Schmier-systems messtechnisch erfasst werden können. Dazu wurde ein Versuchswerkzeug zur Zuführung des CO<sub>2</sub> in flüssigem Zustand direkt in die Kontaktfläche konzipiert und konstruiert sowie die Auslegung der generellen Zuführungsart entwickelt. Die Versuchsanlage wird in [4] genauer beschrieben.

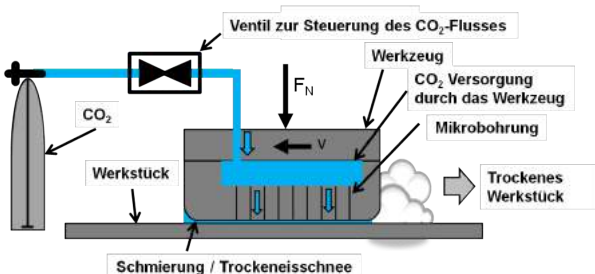


Fig. 3: Prinzipsskizze des Versuchsaufbaus zur Aufnahme der Rückhaltekräfte im Modellversuch Streifenziehen

### 2.1 Konzeption und Konstruktion des Versuchswerkzeugs

Um das flüssige CO<sub>2</sub> direkt in der Wirkfläche zwischen Werkzeug und Werkstück zu applizieren, muss es zuvor durch das Werkzeug geleitet werden. Dazu wurde ein zweiteiliger Aufbau des Versuchswerkzeugs aus einem hohlen Grundkörper und einem dünnen Wechselplättchen gewählt. Diese werden mittels eines O-Ringes gegeneinander abgedichtet. Die zweiteilige Ausführung ermöglicht einen schnellen und kostengünstigen Wechsel der Werkzeugwirkfläche. Des Weiteren wird eine gute Zugänglichkeit für die Herstellung der Mikrobohrungen sowie der Oberflächenstrukturierung ermöglicht.

Der Aufbau des Versuchswerkzeugs ist in Fig. 4 zu sehen.

Das Wechselplättchen besitzt hierbei eine Kontaktfläche von 400 mm<sup>2</sup>. Auf der Streifenziehmaschine können somit Flächenpressungen von maximal 75 MPa untersucht werden. Dies entspricht den auftretenden Belastungen am Matrizeneinlauffradius beim Umformen von höchstfesten Blechwerkstoffen. Durch Reduktion der Normalkraft können Flächenpressungen auch im unteren Pressungsbereich zwischen 2 und 10 MPa, wie sie je nach Werkstoff im Flanschbereich heute in der Praxis auftreten, untersucht werden.

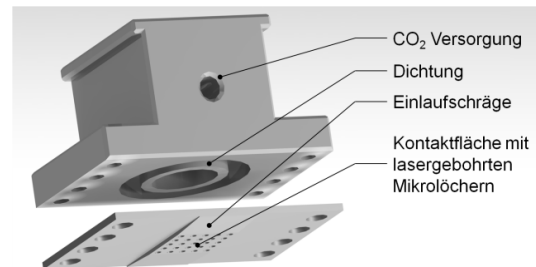


Fig. 4: Konstruktion des Versuchswerkzeugs mit Wechselplättchen für Streifenziehversuche.

Vorangegangene Untersuchungen bezüglich der Werkzeuggeometrie und insbesondere der Einlaufgeometrie der Versuchswerkzeuge im Streifenziehversuch ergaben, neben einem Radius mit tangentialem Übergang in die Kontaktfläche, eine gute Eignung einer Einlaufschräge von 3°. Dies ermöglicht eine Relativbewegung zwischen Blechstreifen und Versuchswerkzeug ohne Klemmen an der Werkzeugkante und der daraus resultierenden Verfälschung der gemessenen Rückhaltekräfte. Als Werkzeugwerkstoff wurde zunächst der Werkzeugstahl 1.2379 verwendet, der neben GGG70L für Umformwerkzeuge die größte Bedeutung besitzt.

### 2.2 Anpassung der Streifenziehmaschine

Aus dem Phasendiagramm von CO<sub>2</sub> kann man entnehmen, dass bei Raumtemperatur ein Druck von ca. 57,3 bar notwendig ist, damit CO<sub>2</sub> in flüssiger Phase vorliegt. Da bei diesem Forschungsprojekt die flüssige Zuführung in die Wirkfuge erreicht werden soll, muss daher dort mindestens ein Druck von 57,3 bar erzeugt werden. In CO<sub>2</sub>-Gasflaschen befindet sich ein Gleichgewicht zwischen flüssiger Phase am Boden und einem Gaspolster im oberen Teil der Flasche. Wird der Flasche CO<sub>2</sub> entnommen, verdampft ein Teil des flüssigen Mediums, bis wieder ein Gleichgewicht erreicht ist. Somit beträgt der Flaschendruck dauerhaft 57,3 bar. Aufgrund der höheren Dichte befindet sich der flüssige Teil im unteren Teil. Durch Verwendung einer Flasche mit Steigrohr kann sichergestellt werden, dass das CO<sub>2</sub> im gewünschten Aggregatzustand die Flasche verlässt. Im Versuchsaufbau wird über ein 2/2-Wege Magnetventil an der Flasche der Gasaustritt gezielt gesteuert; zum Werkzeug (Fig. 4) wird das CO<sub>2</sub> schließlich über einen druckfesten Schlauch geleitet. Aus Sicherheitsgründen befindet sich außerdem ein Überdruckventil im Versuchsaufbau, um ein Bersten des Druckschlauchs aus Sicherheitsgründen zu vermeiden.

Eine wesentliche Prozessgröße bei der Schmierung mit sich verflüchtigen Medien ist die Menge des

zugeführten Schmierstoffs. Ein Messgerät zum direkten Messen der  $\text{CO}_2$ -Menge in flüssigem Zustand ist nicht erhältlich. Im Regelfall wird die Menge des abströmenden Mediums über die Veränderung des Flaschengewichts und der Dichte des Stoffes bestimmt. Um die Genauigkeit der Messung zu erhöhen, wird bei den Versuchen über größere Zeiträume gemessen und anschließend das Gewicht gemittelt.

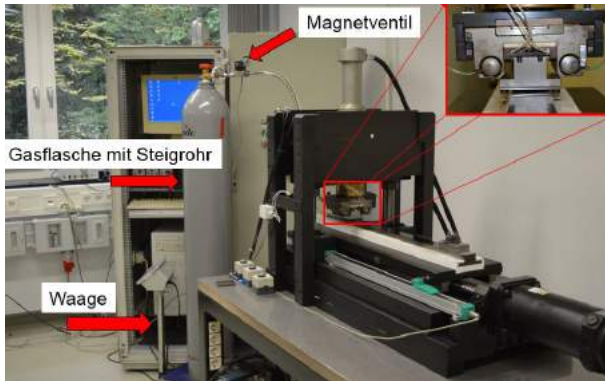


Fig. 5: Versuchsanlage am IFU zur Aufnahme der Rückhaltekräfte bei Schmierung mit flüssigem  $\text{CO}_2$ .

### 3 Lasergenerierte Mikrobohrungen und Strukturen

Durch seine vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten, die verschleißfreie Bearbeitung von Werkstücken und durch die Möglichkeit einer schnellen und flexiblen Positionierung des Bearbeitungsstrahls hat sich der Laser in den letzten Jahren zu einem Universalwerkzeug in der industriellen Fertigung etabliert. Im Gegensatz zu Dauerstrichlasern, die vor allem in Bereichen des Laserschneidens und -schweißens Anwendung finden, können mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung weitaus höhere Intensitäten oberhalb von  $10^{12} \text{ W/cm}^2$  erreicht werden. Dadurch erfolgt ein Abtrag des Materials vor allem in der Dampfphase, was zu einem geringen Wärmeeintrag ins Bauteil und damit zu einer geringen Wärmeschädigung führt [5, 6]. Dies wiederum ermöglicht eine präzisere Bearbeitung, so dass ultrakurz gepulste Laserstrahlung heute vor allem im Bereich der Mikrobearbeitung Anwendung findet. Für die Laserstrukturierung und das Lasermikrobohren von ersten Probenplättchen zur Weiterentwicklung des Trockenumformprozesses wurden zwei Ultrakurzpulslaser verwendet, die sich im Wesentlichen durch ihre Wellenlänge und ihre mittlere Leistung unterscheiden. Charakteristische Laserparameter der beiden Lasersysteme finden sich zum Vergleich in Tab. 1.

Tab. 1: Prozessparameter der verwendeten Lasersysteme.

Lasersystem	TruMicro 5050 (Fa. Trumpf)	Duetto (Fa. TimeBandWidth)
Pulsdauer	< 10 ps	< 12 ps
Wellenlänge	1030 nm	1064nm, 532 nm
Mittlere Leistung	50 W (bei 200 kHz)	10 W, 7 W (bei 50 kHz)
Max. Pulsenergie	250 $\mu\text{J}$	200 $\mu\text{J}$ , 140 $\mu\text{J}$ (bei 50 kHz)
Pulswiederholungsrate	Max. 200 kHz	50 kHz – 8MHz
Beugungsmaßzahl	< 1,3	< 1,3

#### 3.1 Laserfertigung von Mikrobohrungen

Das  $\text{CO}_2$  soll während des Trockenumformprozesses über Mikrobohrungen durch das Werkzeug direkt in die Wirkfuge geführt werden. Der wesentliche Vorteil des Laserwerkzeuges gegenüber der mechanischen Fertigung ist, dass weitaus höhere Aspektverhältnisse (bis 1:20) mit feinsten Bohrungsdurchmessern bis zu einem Durchmesser von lediglich 20  $\mu\text{m}$  möglich sind. Fig. 6 zeigt ausströmendes  $\text{CO}_2$  durch eine 2 mm dicke Probe mit einem mechanisch gebohrten Loch mit 1 mm Durchmesser (a) sowie eine Probe mit neun lasergefertigten Bohrungen mit einem mittleren Austrittsdurchmesser von 55  $\mu\text{m}$  (b).

Bei einer 1 mm großen Bohrung bildet sich ein ca. 30 cm hoher Strahl aus verdampfendem  $\text{CO}_2$ . Beim Probenplättchen mit neun lasergefertigten Mikrobohrungen misst dieser Strahl nur wenige Zentimeter in der Höhe. Darüber hinaus lässt sich in Fig. 6 b) an den Bohrungsaustritten die Bildung von Trockeneiss erkennen. Durch die plötzliche Entspannung auf Atmosphärendruck kühlt das  $\text{CO}_2$  auf  $-78^\circ\text{C}$  ab und gefriert. Bei der mechanisch gefertigten Bohrung von 1 mm Durchmesser reißt die größere Menge an ausströmendem  $\text{CO}_2$  das entstehende Trockeneis mit, so dass kein Trockeneiss auf der Oberfläche verbleibt. Erste Streifenziehversuche haben jedoch gezeigt, dass gerade der Trockeneiss zu einer Verringerung der Reibungszahl führt und somit als Schmierstoffersatz im Umformprozess verwendet werden soll. Für die weiteren Untersuchungen wurde der Durchmesser der Bohrungsaustritts auf unter 200  $\mu\text{m}$  festgelegt.

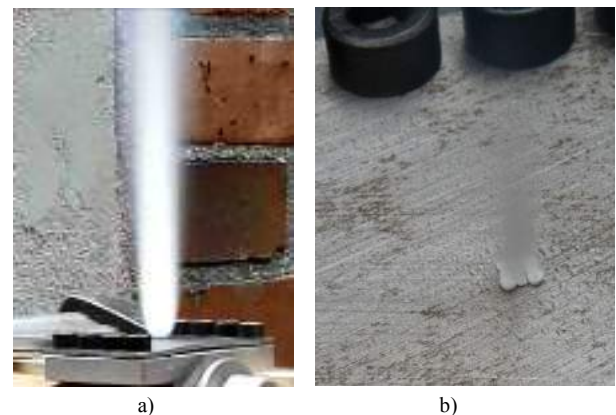


Fig. 6: Ausströmendes, flüssig zugeführtes  $\text{CO}_2$  durch a) eine mechanisch erzeugte Bohrung mit Durchmesser 1 mm und b) 9 lasergefertigte Mikrobohrungen mit Austrittsdurchmesser von 55  $\mu\text{m}$ .

Für die ersten lasergebohrten Prototyp-Umformwerkzeuge sind Wanddicken von 5 mm geplant. Die Herausforderung liegt darin, das Aspektverhältnis der Mikrobohrungen (bezogen auf den Austrittsdurchmesser) so zu steigern, dass Mikrobohrungen in 5 mm Werkzeugstahl mit Austrittsdurchmessern < 200  $\mu\text{m}$  möglich werden. Die höchste Qualität beim Laserbohren wird mit dem Wendelbohrverfahren erreicht [7, 8]. Dabei wird der Laserstrahl durch eine spezielle Bohroptik auf einer Kreisbahn geführt. Fig. 7 a) zeigt eine Prinzipskizze der am Institut für Strahlwerkzeuge entwickelten Wendelbohrroptik. Die maximale Rotationsfrequenz  $f_w$  der Optik liegt bei

3000 U/min. Ebenfalls einstellbar ist der Durchmesser des Wendelkreises  $d_w$  und damit der Bohrungsdurchmesser sowie der Anstellwinkel  $\gamma_w$  des Laserstrahls. Unter Verwendung einer Fokussierlinse mit einer Brennweite von 100 mm sind ein Wendeldurchmesser von 12  $\mu\text{m}$  bis 400  $\mu\text{m}$  und ein Anstellwinkel 0,1° bis 5° einstellbar. Durch die nachfolgende Fokussierlinse wird der rotierende Laserstrahl auf die aktuelle Position der Werkstückoberfläche fokussiert. Die Bohrung von der Seite des Laserstrahleintritts wird als Bohrungseintritt, von der Seite des Laserstrahlaustritts als Bohrungsausritt bezeichnet (siehe Fig. 7, b).

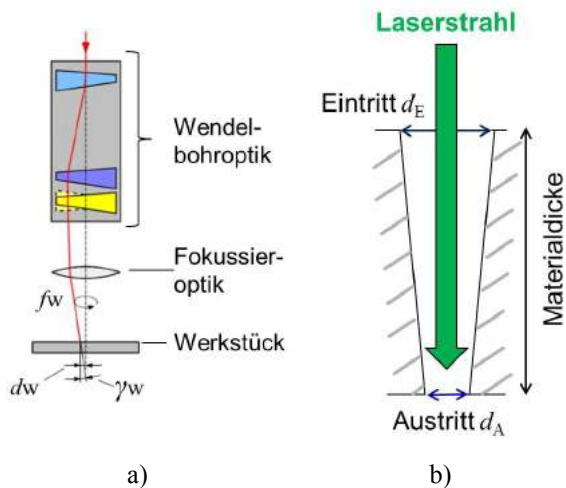


Fig. 7: a) Prinzipskizze der verwendeten Bohroptik. b) Geometrieskizze einer Bohrung im Querschnitt.

In einem ersten Versuch wurden positiv konische Wendelbohrungen mit verschieden großen Austrittsdurchmessern in flache Proben aus Werkzeugstahl 1.2379 eingebracht. Verwendet wurde das Lasersystem *Duetto* mit einer Wellenlänge von 532 nm. Der Laserstrahl wurde dazu unter Verwendung eines Lambda-Viertel-Plättchens zirkular polarisiert. Die Mikrobohrungen in 1 mm Werkzeugstahl wurden mit einer Puls wiederholungsrate von 50 kHz sowie mit einer Pulsergie von 80  $\mu\text{J}$  bzw. der maximalen Pulsergie von 136  $\mu\text{J}$  (gemessen nach der Fokussierlinse) erzeugt. Fig. 8 zeigt lasergefertigte Mikrobohrungen in 1 mm Werkzeugstahl von der Seite des Laserstrahleintritts sowie von der Seite des Laserstrahlaustritts. Der Eintrittsdurchmesser  $d_E$  ist dabei um das 1,5- bis 2,7-fache größer als der Austrittsdurchmesser  $d_A$ .

Der Fokus des Laserstrahls lag während des gesamten Bohrprozesses fest bei 0,8 mm unterhalb der Werkstückoberfläche. Die Prozessparameter für die Herstellung der Mikrobohrungen in 1 mm Stahl sind in Tab. 2 zusammengefasst. In einer ersten Bohrphase wurde zunächst bei einem fest eingestellten Wendeldurchmesser das Werkstück durchbohrt. Anschließend wurde in einer zweiten Bohrphase der Bohrkanal auf die gewünschte Größe aufgeweitet. Pro Probe wurden 5 bzw. 9 Mikrobohrungen gefertigt. Die Standardabweichung im Austrittsdurchmesser lag zwischen 0,6  $\mu\text{m}$  und 3  $\mu\text{m}$  pro Probe.

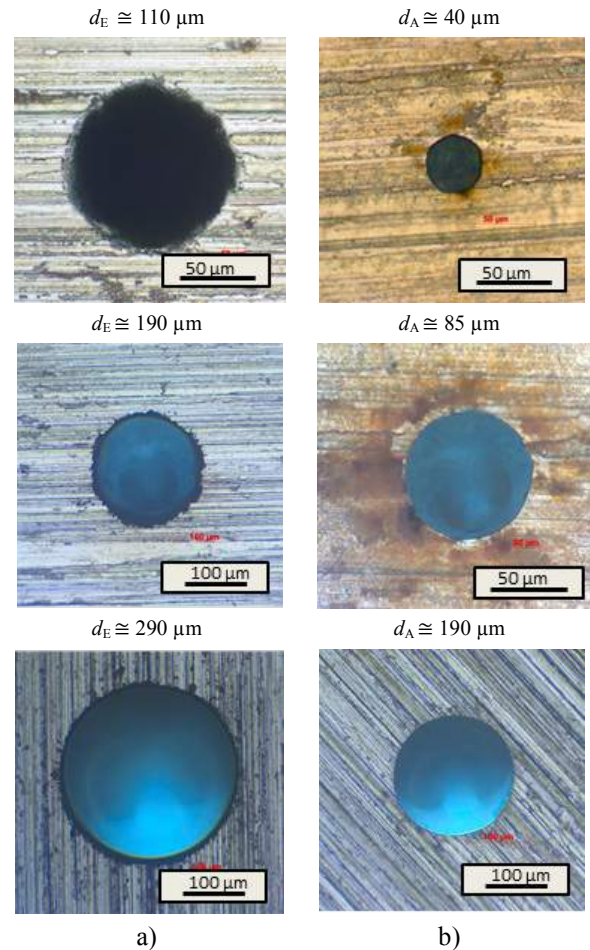


Fig. 8: Mikroskopbilder von lasergefertigten Mikrobohrungen in 1 mm Werkzeugstahl a) von der Seite des Lasereintritts, b) von der Seite des Laseraustritts.

Als weiteres Qualitätsmaß wurde für den Bohrungsausritt die Rundheitsabweichung nach dem MZC- (Minimum Zone Circle)-Verfahren bestimmt. Sie liegt bei den Bohrungen in 1 mm Werkzeugstahl im Mittel bei 2  $\mu\text{m}$ .

Tab. 2: Prozessparameter für Mikrobohrungen in 1 mm und 2 mm Werkzeugstahl.

Materialstärke	1 mm	2 mm
Wellenlänge	532 nm	532 nm
Puls wiederholungsrate	50 kHz	50 kHz
Pulsergie	80 $\mu\text{J}$   136 $\mu\text{J}$   136 $\mu\text{J}$	136 $\mu\text{J}$
Fokussierdurchmesser	17 $\mu\text{m}$	17 $\mu\text{m}$
Rayleighlänge	330 $\mu\text{m}$	330 $\mu\text{m}$
Fokussierlage	-0,8 mm* (fest)	-0,8 $\mu\text{m}$ * (fest)
Polarisation	zirkular	zirkular
Prozesszeit	15 s   15 s   55 s	88 s

\*Angabe ist relativ zur Werkstückoberfläche.

Fig. 9 zeigt den Ein- und Austritt einer lasergefertigten Mikrobohrung in 2 mm dickem Werkzeugstahl. Die hierbei verwendeten Prozessparameter sind in Tab. 2 festgehalten. Bei den Bohrungen in ein 2 mm dickes Stahlplättchen zeigt sich ein deutlicher Qualitätsunterschied gegenüber den Bohrungen in 1 mm Werkzeugstahlplättchen. Die mittlere Rundheitsabweichung des Bohrungsausritts ist mit 8  $\mu\text{m}$  deutlich stärker und der Austritt weist Schmelzablagerungen und Grat auf.

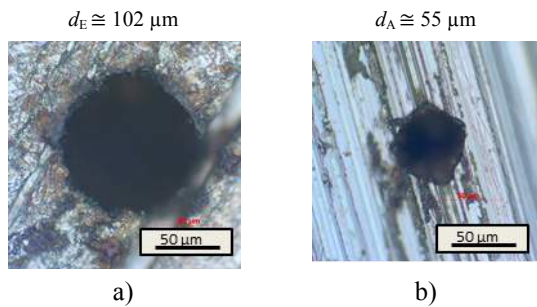


Fig. 9: Laserfertigte Mikrobohrungen in 2 mm Werkzeugstahl a) von der Seite des Strahleintritts und b) von der Seite des Strahlaustritts.

Darüber hinaus reicht die Pulsenergie des Lasers nicht mehr aus, um den gesamten Bohrkanal während der Aufweitungphase auf einen vorgegebenen Durchmesser aufzuweiten. Die Standardabweichung des Austrittsdurchmessers reicht von 3  $\mu\text{m}$  bis 8  $\mu\text{m}$  pro Probe und liegt damit ebenfalls über denen der Mikrobohrungen in 1 mm Werkzeugstahlplättchen.

Für eine erste Untersuchung des Durchströmverhaltens von Gas durch Mikrobohrungen in Werkzeugstahl 1.2379 mit der Dicke 2 mm wurden in Versuchsproben 1, 5 und 9 Bohrungen in den Bohrungsabständen 0,5 mm und 1 mm eingebracht (siehe Fig. 6 b).

In einem weiteren Versuch wurden Mikrobohrungen in 3 mm und 4 mm Werkzeugstahl gefertigt. In den Versuchen mit 2 mm Werkzeugstahl hat sich gezeigt, dass bei einer festen Fokusslage eine Einstellung des Bohrungsausstritts über die Einstellung des Wendeldurchmessers nicht mehr möglich ist. Für die Mikrobohrungen in 3 mm und 4 mm dicken Proben wurde daher die Prozessstrategie dahingehend geändert, dass der Laserfokus während des Bohrprozesses in 100  $\mu\text{m}$  bzw. 200  $\mu\text{m}$  Abständen nachgeführt und der Bohrkanal somit schrittweise aufgeweitet wird. Durch das schrittweise Aufweiten des Bohrkanals ist es möglich, den Bohrungsdurchmesser auch in Proben von 3 mm und 4 mm Dicke entsprechend dem eingestellten Wendeldurchmesser aufzuweiten (Fig. 10).

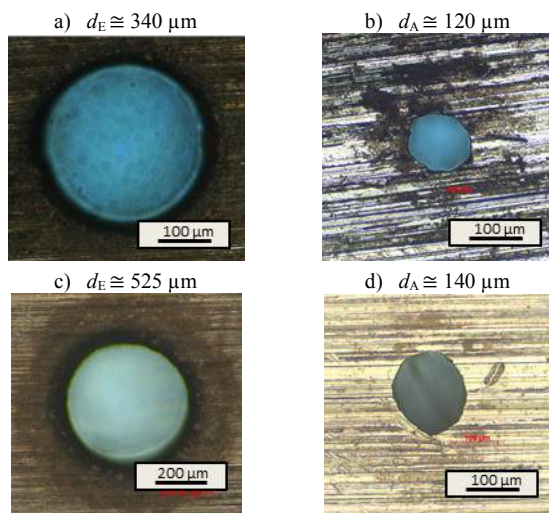


Fig. 10: Laserfertigte Mikrobohrungen in 3 mm (a, b) und 4 mm (c, d) Werkzeugstahl von der Seite des Strahleintritts (a, c) und von der Seite des Strahlaustritts (b, d).

Da der Laserstrahl ausgehend vom Fokus eine natürliche Divergenz aufweist, würde bei einer Fokusslage der Laserstrahl bei tiefen Fokusslagen vom Bohrungseintritt abgeschnitten werden. Daher gilt, je tiefer der Mikrobohrung, desto stärker muss der Bohrkanaal vorher aufgeweitet werden. Dies erklärt die deutlich größeren Eintrittsdurchmesser bei den Mikrobohrungen in den 3 mm und 4 mm dicken Probenplättchen.

Für die Fertigung der Mikrobohrungen wurde das Lasersystem *TruMicro 5050* mit einer Wellenlänge von 1030 nm verwendet, mit einer dem frequenzverdoppelten Laser *Duetto* deutlich höhere Pulsenergie aufweist. Der Fokussdurchmesser wurde gegenüber den Versuchen in 1 mm und 2 mm Stahl auf 41  $\mu\text{m}$  vergrößert, so dass sich die Rayleighlänge auf 990  $\mu\text{m}$  vergrößert. Die dafür verwendeten Prozessparameter sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Tab. 3: Prozessparameter für Mikrobohrungen in 3 mm und 4 mm dicken Werkzeugstahlplättchen.

Materialdicke	3 mm	4 mm
Wellenlänge	1030 nm	1030 nm
Pulswiederholungsrate	20 kHz	40 kHz
Pulsenergie	210 $\mu\text{J}$	210 $\mu\text{J}$
Fokussdurchmesser	41 $\mu\text{m}$	41 $\mu\text{m}$
Rayleighlänge	990 $\mu\text{m}$	990 $\mu\text{m}$
Fokusslage	-200 $\mu\text{m}$ ... -2800 $\mu\text{m}$	-100 $\mu\text{m}$ ...-3900 $\mu\text{m}$
Polarisation	Zirkular	zirkular
Prozesszeit	3 min	10 min   15 min

\*Angabe ist relativ zur Werkstückoberfläche.

Für Streifenziehversuche wurden 3 mm dicke Wechselplättchen (siehe Fig. 4) mit 9, 27 und 36 Bohrungen mit einem mittleren Austrittsdurchmesser von 120  $\mu\text{m}$  sowie 4 mm dicke Wechselplättchen mit 25 und 50 Bohrungen mit jeweils einem mittleren Austrittsdurchmesser von 110  $\mu\text{m}$  und 140  $\mu\text{m}$  gefertigt.

### 3.2 Laserfertigung von Strukturen für tribologische Anwendungen

Neben der Laserfertigung von Mikrobohrungen werden zusätzlich tribologische Strukturen in die Werkzeugoberfläche eingebracht. Diese Strukturen sollen zum einen der Verteilung des  $\text{CO}_2$  von den Mikrobohrungen über die gesamte Werkzeugoberfläche dienen und zum anderen die Reibungseigenschaften zwischen den Oberflächen zusätzlich durch eine Reduzierung der Reibungszahl verbessern. Um den Einfluss verschiedener Oberflächenstrukturen auf deren tribologische Wirkung zu untersuchen, wurden mit dem Laser Strukturen mit drei unterschiedlichen Designs auf Probenplättchen gefertigt und die jeweilige Reibungszahl in Streifenziehversuchen bestimmt. Die Ergebnisse der Streifenziehversuche finden sich in Kap. 5.2.

Die Laserstrukturierung von Werkzeugen mit Ölschmierung wurde bereits in [9-12] erforscht. Die Länge der ablatierten Strukturen liegt dabei im Bereich zwischen 50  $\mu\text{m}$  bis 300  $\mu\text{m}$ . Bei Linienstrukturen liegt die Linienbreite im Bereich zwischen 10  $\mu\text{m}$  und 100  $\mu\text{m}$  und ist damit ca. 5 bis 50 mal größer als die Rauheit der unbehandelten Originaloberfläche. Zur

Untersuchung der tribologischen Wirkung von strukturierten Oberflächen mit CO<sub>2</sub> wurden Strukturen in diesen Größenordnungen gefertigt.

Da der Laser ein thermisches Werkzeug darstellt und zwangsläufig mit Schmelzbildung einhergeht, liegt die Herausforderung in der Laserstrukturierung darin, durch die geeignete Wahl der Laserparameter die Schmelzfilmdicke so gering wie möglich zu halten, um Schmelzablagerungen und Gratbildung besonders am oberen Rand der Strukturen zu vermeiden. Diese würden sonst die Reibung unnötig erhöhen. Aus diesem Grund wurde für die Laserfertigung der Strukturen ein Ultrakurzpulslaser, hier der *TruMicro 5050* (siehe Tab. 1), verwendet. Für die Untersuchung der tribologischen Wirkung von strukturierten Oberflächen wurden Strukturen folgender Designs in die nichtpolierte Oberfläche von Probenplättchen eingebracht: symmetrische Näpfcchen, asymmetrische Näpfcchen sowie Linien.

Für die Fertigung der symmetrischen Näpfcchen wurde der Laserstrahl mit einer Plankonvexlinse der Brennweite 125 mm auf die Werkstückoberfläche fokussiert. Der Fokusbereich war 68 µm, die Pulsernergie 250 µJ, die verwendete Pulswiederholungsrate 20 kHz und die Pulsanzahl pro Näpfcchen 2000. Fig. 11 zeigt das Bild einer interferometrischen Messung einer mit symmetrischen Näpfcchen strukturierten Oberfläche (a) sowie den Querschnitt dieser strukturierten Oberfläche (b). Der Abstand zwischen den einzelnen Näpfcchen wurde so gewählt, dass die nicht strukturierte Oberfläche 70 % der Originaloberfläche entspricht.

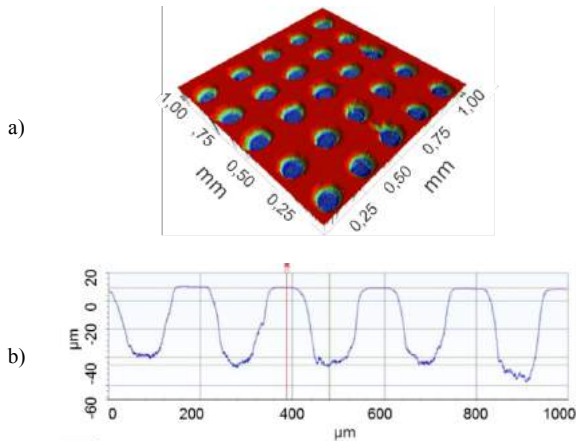


Fig. 11: a) Bild einer laserstrukturierten Oberfläche mit symmetrischen Näpfcchen aus einer interferometrischen Messung und b) der entsprechende Querschnitt.

Um die tribologische Wirkung asymmetrischer Strukturen zu untersuchen, wurden Oberflächen mit Näpfcchen in asymmetrischer Form erzeugt. Für die Fertigung dieser Strukturen wurde eine bikonvexe Fokussierlinse außermittig und schräg zur optischen Achse positioniert (siehe Fig. 12 a). Die daraus resultierenden Abweichungen von der idealen optischen Abbildung (Astigmatismus und Koma) erzeugt einen asymmetrischen Fokus (siehe Fig. 12 b). Dies führt zu einem asymmetrischen Laserabtrag. Die asymmetrischen Näpfcchen wurden ebenfalls mit der maximalen Pulsernergie von 250 µJ und einer Pulswiederholungsrate von 2 kHz gefertigt.

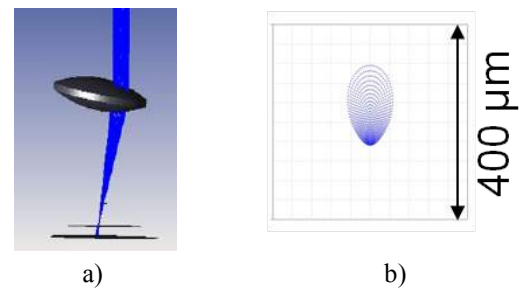


Fig. 12: a) Strahlengang durch außermittig, zur optischen Achse schräg positionierten Bikonvexlinse und b) berechnetes Fokusdiagramm des daraus resultierenden asymmetrischen Fokus.

Fig. 13 zeigt das Bild einer interferometrischen Messung eines asymmetrischen Näpfcchens (a) sowie den Querschnitt (longitudinal) des Näpfcchens (b).

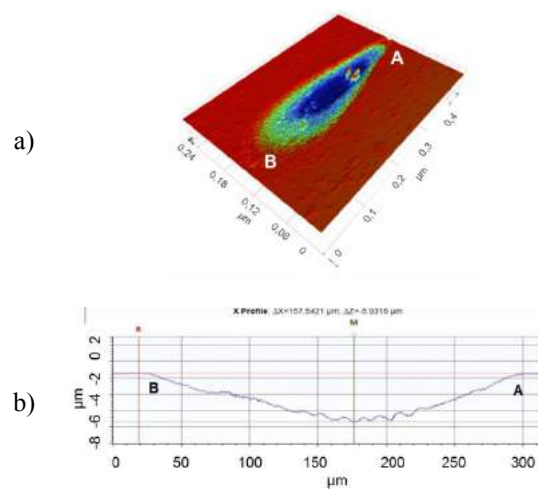


Fig. 13: a) Bild eines asymmetrischen Näpfcchens aus einer interferometrischen Messung und b) der entsprechende longitudinale Querschnitt des Näpfcchens.

Als dritte Strukturierungsvariante wurde die Linienstruktur gewählt. Zur Fertigung der Linien wurde ein Linienfokus verwendet, welcher sich aus der Kombination einer Zylinderlinse der Brennweite 150 mm mit einer Plankonvexlinse der Brennweite 60 mm ergibt. Fig. 14 zeigt den Strahlengang des Laserstrahls durch die beiden Linsen (a) sowie die berechnete Abbildung des Linienfokus (b). Pro Fokusposition lag die Pulsanzahl bei 20000. Die verwendete Pulsernergie lag bei 250 µJ, die Pulswiederholungsrate bei 200 kHz.

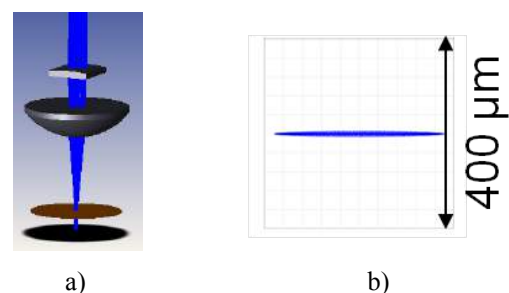


Fig. 14: a) Strahlengang durch eine Zylinderlinse und eine Plankonvexlinse und b) berechnetes Fokusdiagramm des daraus resultierenden Linienfokus.

Die linienstrukturierte Oberfläche aus einer interferometrischen Messung sowie der Querschnitt dieser Oberfläche sind in Fig. 15 dargestellt.

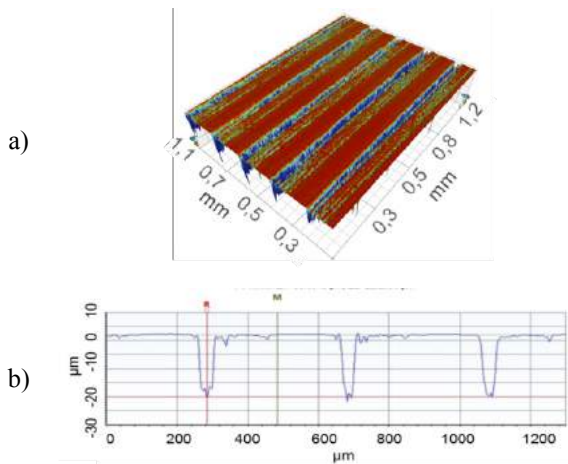


Fig. 15: a) Bild einer linienstrukturierten Oberfläche aus einer interferometrischen Messung und b) der entsprechende Querschnitt dieser Oberfläche.

#### 4 Druckreaktor für Benetzungsanalysen

Ziel der bisherigen Arbeiten am Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie an der Universität Stuttgart war die Adaption und der Umbau eines Druckreaktors für Grundlagenuntersuchungen zum Be- und Entnetzungsverhalten von  $\text{CO}_2$  auf unterschiedlichen Oberflächen in Abhängigkeit von dessen Aggregatzustand und weiteren Variablen wie Temperatur im Hinblick auf Umformprozesse. Zunächst musste eine geeignete Auswahl an dafür geeigneten Autoklaven getroffen werden. Diese mussten für die in den Experimenten vorherrschenden Parameter ausgelegt sein.

Es wurden folgende Randbedingungen an den Autoklav gestellt:

- Maximaler Druck von 150 bar.
- Einstellen von tiefen Temperaturen muss möglich sein, um beispielsweise den Tripelpunkt von  $\text{CO}_2$  anfahren zu können ( $T = -56,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 5,19 \text{ bar}$ ).
- Der Reaktor muss über zwei Sichtfenster verfügen. Vor einem Fenster wird eine Hochgeschwindigkeitskamera installiert. Dadurch kann die Tropfenkondensation nachverfolgt und ausgewertet werden. Am verbleibenden Fenster muss eine Lichtquelle installiert werden, um die Vorgänge im Inneren des Autoklav sichtbar zu machen.

Weil der Autoklav für tiefe Temperaturen (bis  $-60^\circ\text{C}$ ) ausgelegt ist, müssen spezielle Silberdichtungen zum Abdichten von Deckel und Glocke verwendet werden. Konventionelle Kunststoffdichtungen würden bei zu hoher Temperaturabsenkung verspröden.

Ein Autoklav, der den oben genannten Anforderungen genügt, ist der „midiclave Typ4/1.0lt.“ mit Doppelmantel zum Beheizen oder Kühlen. Außerdem verfügt dieser Druckreaktor über einen zylinderförmigen Wärmetauscher im Inneren des Gefäßvolumens. Das

benötigte Kühlmedium kann über entsprechende Swagelok-Anschlüsse im Deckel zugeführt werden.

Durch die zwei separaten Kühl- und Heizkreisläufe ist es zudem möglich, sowohl die vorherrschenden Temperaturen im Werkstück, als auch im Werkzeug nachzubilden. Der Probenstisch ist zunächst an einem Kühlthermostat angeschlossen. Dadurch kann die Tropfenkondensation an der Probenoberfläche beschleunigt werden.

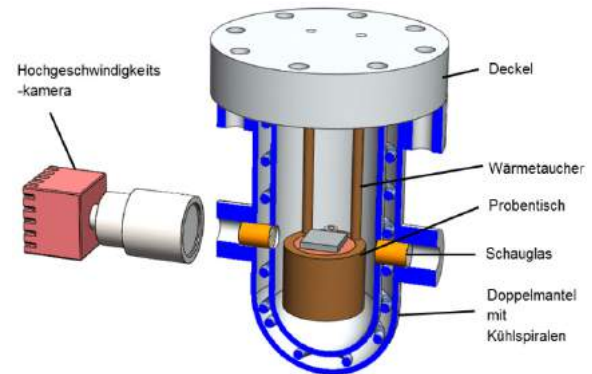


Fig. 16: Druckreaktor "midiclave Typ 4" der Firma C3 Analysetechnik in isometrischer Schnittdarstellung.

Mit einer IR-Kamera wurden Wärmebilder aufgenommen um auszuschließen, dass sich eventuell eine ungleichmäßige Temperaturverteilung einstellt. Wie in Fig. 17 dargestellt, ist eine gleichmäßige Wärmeverteilung im gesamten Gefäßvolumen zu erkennen. Ebenfalls verteilt sich die Temperatur gleichmäßig über den Probenstisch (vgl. Fig. 18). Die gewünschte Temperatur überträgt sich auch auf die aufgelegte Probe. Die Temperatur im Gefäßvolumen wird über ein PT100-Thermoelement mit Hilfe eines elektronischen Microstat erfasst. Dadurch kann der Thermostat direkt angesteuert werden.

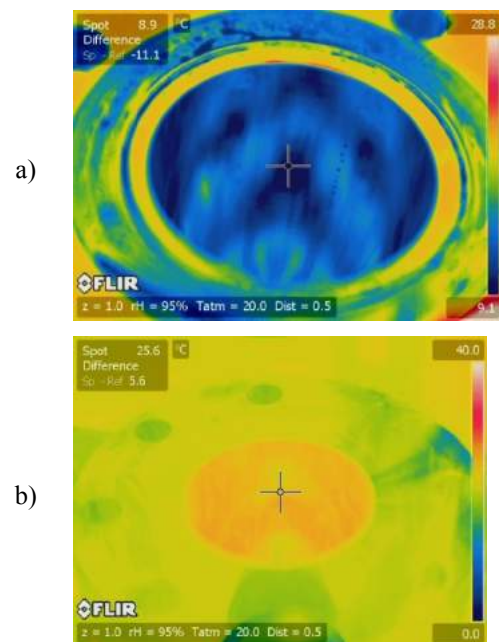


Fig. 17: Aufnahmen einer IR-Kamera des Gefäßvolumens. a) Gleichmäßige Temperaturverteilung im Gefäßvolumen bei einer voreingestellten Temperatur von  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . b) Nach 30 min ergibt sich eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Gefäßvolumen von  $25,6 \text{ }^\circ\text{C}$  im Spotpunkt bei eingestellten  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

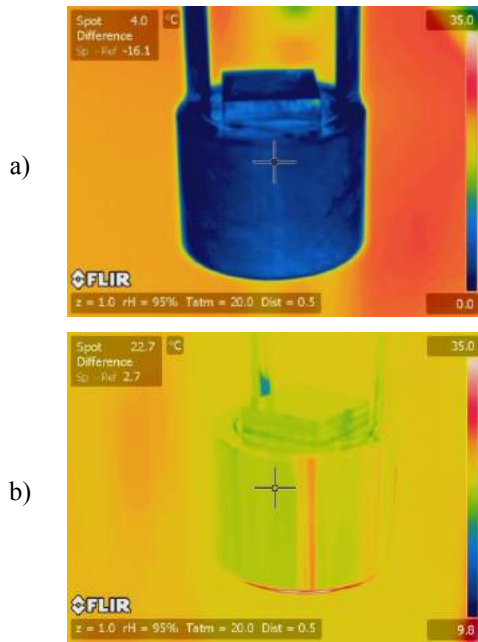


Fig. 18: Aufnahmen einer IR-Kamera des Probenstüchs. a) Gleichmäßige Verteilung der Temperatur bei abgeschaltetem Thermostat, b) mit eingeschaltetem Thermostat stellt sich nach 15 min eine gleichmäßige Temperatur von 4 °C ein.

In nachfolgenden Experimenten können auf dem Probenstüch unterschiedliche Werkstücke in verschiedenen Materialien und mit einer maximalen Abmessung von 35 mm x 35 mm aufgelegt werden. Das Probenmaterial ist dabei nicht entscheidend. Die maximale Probenhöhe liegt bei 5 mm. Da ansonsten keine Tropfenkondensation durch die seitlichen Schaufenster mit der Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet werden können.



Fig. 19: Aufnahme einer IR-Kamera der Außenwand des Druckreaktors. Vorderansicht bei eingestellter Temperatur von 55°C.

## 5 Ergebnisse

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die Durchmesser der Mikrobohrungen vorausgelegt sowie lasergefertigte Mikrobohrungen und -strukturen erzeugt. Im Folgenden wird ein Zusammenhang zwischen Oberflächenkennwerten und dem Abströmverhalten des CO<sub>2</sub> hergestellt, sowie Simulationsergebnisse zum Strömungsverhalten des CO<sub>2</sub> über strukturierte Oberflächen dargestellt. Darüber hinaus werden Reibungszahlen für unterschiedliche Strukturen mit Ölschmierung sowie für unterschiedliche Mikrobohrungsanzahlen bei Schmierung mit flüssigem CO<sub>2</sub> aufgenommen und verglichen.

### 5.1 Zusammenhang zwischen Oberflächenkennwert und der Abströmmenge aus Mikrobohrungen

Zum weiteren Verständnis der ablaufenden Prozesse wurden Abströmversuche ohne Relativbewegung durchgeführt. Aus diesen statischen Versuchen geht hervor, dass ein Zusammenhang zwischen dem Oberflächenkennwert  $S_{da}$ , dem „closed dale area“, und der Menge des abströmenden Schmiermediums vorliegt. Dabei wird deutlich, dass höhere  $S_{da}$ -Wertes auch zu höheren Abströmmen führen. Bei hohen  $S_{da}$ -Werten ist mehr Raum zwischen den Oberflächentopografien vorhanden als bei kleinen und der Widerstand für das CO<sub>2</sub> ist geringer. Die Oberflächenrauheit reicht aus, um dem CO<sub>2</sub> einen Weg durch die Spitzen und Mulden zu ermöglichen. Es tritt auch bei 11 MPa Flächenpressung, dem doppelten des Gegendrucks, durch das austretende CO<sub>2</sub> keine Abdichtung der Oberflächen auf. Zur Messung des Abströmens auf unterschiedlichen Oberflächen wurden vier verschiedene Stahlarten verwendet. Diese unterscheiden sich in ihrer Festigkeit, jedoch wurden lediglich statische Abströmversuche durchgeführt, bei denen einzig die Oberfläche betrachtet wurde. Für jede Kombination wurden fünf Versuche durchgeführt. Dabei wurde das Magnetventil geöffnet und gewartet, bis das komplette System mit flüssigem CO<sub>2</sub> gefüllt ist. Anschließend wurde das Versuchswerkzeug mit 11 MPa auf die Oberfläche gepresst, die Gewichtsveränderung der Gasflasche für 30 s gemessen und anschließend der Mittelwert gebildet. Durch dieses Vorgehen konnten Ergebnisse mit guter Wiederholbarkeit aufgenommen werden.

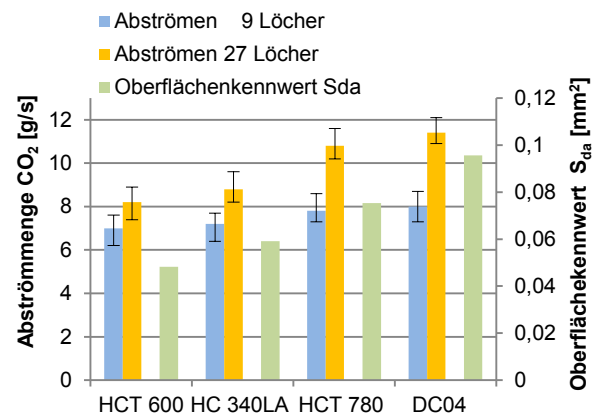


Fig. 20: Einfluss der Blechoberfläche auf die Abströmmenge.

Außerdem wurden Messungen mit unterschiedlichen lasergebohrten Mikrolöchern durchgeführt. Dabei kamen Wechselplättchen mit einer Dicke von 3 mm mit neun und 27 Bohrungen und einem Durchmesser von ca. 100 µm am Lochaustritt und ca. 340 µm am Loch Eintritt zum Einsatz. Die unterschiedliche Anzahl an Mikrobohrungen zeigt den Einfluss auf die Menge des abströmenden Mediums, wobei ein Erhöhen der Bohrungsanzahl einen größeren CO<sub>2</sub> Durchsatz bewirkt.

Mit solchen Abströmversuchen kann gezeigt werden, dass die Schmierstoffmenge mittels der Parameter „Bohrungsanzahl“ und „Oberflächenstruktur“ beeinflusst werden kann. Diese geometrischen Parameter sind notwendig, da der Druck des CO<sub>2</sub> nicht verändert wer-



den kann. Eine Verringerung ist nicht möglich, da somit bei Raumtemperatur keine flüssige Phase erreicht wird; die Erhöhung des Drucks ist aufgrund des begrenzten Flaschendrucks nicht möglich. Für die folgende Strukturierung der Oberfläche sind demnach hohe  $S_{da}$ -Werte anzustreben. Für die Reduzierung der Rückhaltekräfte soll eine große Anzahl an Mikrobohrungen vorgesehen werden. Durch diese Erkenntnis kann beim Übertrag auf ein Tiefziehbauteil die Reibungszahl lokal veränderlich eingestellt werden und somit der Werkstofffluss durch die gezielte Einbringung einer größeren oder kleineren Anzahl an Mikrobohrungen beeinflusst werden.

## 5.2 Streifenziehversuch mit konventioneller Schmierung und aufgetragenen Strukturen

Zur Untersuchung der tribologischen Wirkung von laserstrukturierten Oberflächen wurde für die in Kap. 3.2 hergestellten Oberflächen die Reibungszahl in Streifenziehversuchen mit konventioneller Schmierung bestimmt und mit den Reibungszahlen für geschliffene und hochpolierte metallische Oberflächen verglichen. Die Reibungszahlen der geschliffenen sowie der hochpolierten Oberflächen ergaben sich ebenfalls aus Streifenziehversuchen. Die Streifenziehversuche erfolgten bei einer Flächenpressung von 5 MPa und einer Relativgeschwindigkeit von 100 mm/s.

Die Reibungszahl jeder Oberfläche ergibt sich aus dem Mittelwert aus jeweils drei Streifenziehversuchen. Die Ergebnisse sind in Fig. 21 zusammengefasst. Es zeigt sich deutlich, dass die Reibungszahl im Vergleich zur geschliffenen Oberfläche mit einer Reibungszahl von  $\mu = 0,12$  um bis zu 20 % reduziert werden konnte. Nur die Reibungszahl der polierten Oberfläche liegt mit  $\mu = 0,085$  unter der Reibungszahl der strukturierten Flächen. Jedoch bildeten sich bei der polierten Oberfläche nach drei Versuchen deutlich sichtbare Riefen, welche die Reibungszahl innerhalb der nächsten Züge ansteigen ließen.

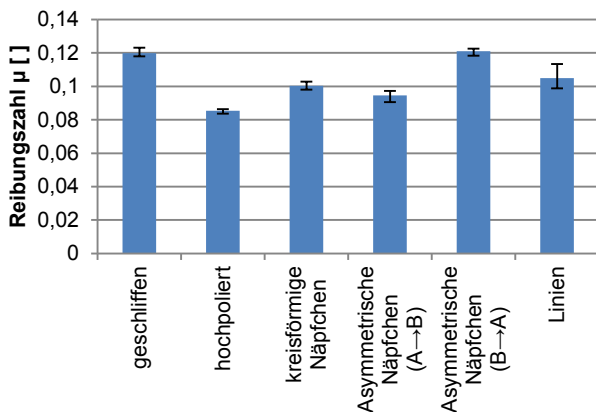


Fig. 21: Reibungszahlen aus Streifenziehversuchen mit Versuchsproben verschiedener Oberflächen.

Die Auswertung zeigt auch, dass bezüglich der asymmetrischen Strukturen die Bewegungsrichtung eine entscheidende Rolle spielt. Bewegt sich die Oberfläche mit asymmetrischen Näpfcchen von A nach B (vgl. Fig. 13), erhält man innerhalb der laserstrukturierten Oberflächen die kleinste Reibungszahl mit  $\mu = 0,095$ , bei Bewegung in entgegengesetzter Richtung, das heißt von B nach A, erhält man dagegen die höchste Rei-

bungszahl. Diese liegt mit einem Wert von  $\mu = 0,12$  im Bereich der geschliffenen Oberfläche.

Mit der linienstrukturierten Oberfläche konnte die Reibungszahl nur um knappe 10 % verringert werden. Der Grund dafür liegt vermutlich darin, dass die Schmierung sich entlang der Linie verteilen kann und nicht wie im Näpfcchen gehalten werden kann.

Basierend auf diesen Ergebnissen ist die Strukturierung mit asymmetrischen Näpfcchen im Streifenziehversuch für die konventionelle Schmierung am geeignetsten, vorausgesetzt man beachtet die Bewegungsrichtung. Inwieweit dies auch für  $\text{CO}_2$  als Schmierung gilt, soll in weiteren Untersuchungen geklärt werden. Darüber hinaus sollen weitere Strukturen auf ihre tribologische Wirkung untersucht werden.

## 5.3 Simulationen zum Verhalten von flüssigen Gasen auf strukturierten Oberflächen

Vor den experimentellen Untersuchungen wurden Computersimulationen durchgeführt, um das Verhalten von flüssigen Gasen in verschiedenen Strukturen zu analysieren. Für das Erstellen der dreidimensionalen Strukturen wurde die 3D-CAD Konstruktionssoftware SolidWorks verwendet, die physikalischen Simulationen wurden im Anschluss daran mit Hilfe von COMSOL Multiphysics durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurden vier grundlegende Strukturen mit unterschiedlichen geometrischen Parametern (Tiefe, Breite und Muster der Struktur) simuliert.

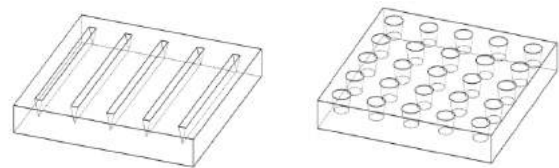


Fig. 22: Etablierte mit dem Laser generierte Strukturen a) Linienstruktur (Tiefe 60  $\mu\text{m}$ , Weite 40  $\mu\text{m}$ ) b) konische Näpfcchen (Tiefe 55  $\mu\text{m}$ , Durchmesser an der Werkzeugoberfläche 100  $\mu\text{m}$ ).

Am Institut für Strahlwerkzeuge können Linien- und Napfstrukturen mit dem Laser mit hoher Genauigkeit in die Werkzeugoberfläche eingebracht werden. Die aus dem 3D-Scan ermittelten Strukturgrößen (vgl. Fig. 15) wurden im Maßstab 1:1 in SolidWorks übernommen. Bei den in Fig. 23 dargestellten Strukturen handelt es sich um neue Strukturen, welche noch für den Einsatz als geeignete Schmierstoffgeometrie verifiziert werden müssen.

Bei diesen sogenannten Narrow-deep Strukturen handelt es sich um Strukturen, welche zu Beginn breit und flach sind. Mit fortschreitender Länge werden diese Strukturen immer schmaler und tiefer. Im Gegensatz dazu stehen die Wide-deep Strukturen. Die maximale Tiefe wird an der maximalen Ausdehnung erreicht. Diese befindet sich im ersten Viertel der Strukturgröße. Für beide Strukturen wurden folgende Geometriebereiche festgelegt:

- Länge (L): 150 bis 300  $\mu\text{m}$
- Breite (B): 25 bis 100  $\mu\text{m}$
- Tiefe (T): 10 bis 30  $\mu\text{m}$

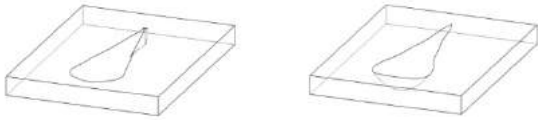


Fig. 23: Zwei neuartige Strukturen, um die Werkzeuoberfläche zu strukturieren a) Narrow-deep-Strukturen  $L=300\ \mu\text{m}$ ,  $B=100\ \mu\text{m}$ ,  $T=30\ \mu\text{m}$  b) Wide-deep-Strukturen  $L=300\ \mu\text{m}$ ,  $B=100\ \mu\text{m}$ ,  $T=30\ \mu\text{m}$ .

Um eine realitätsgetreue Nachbildung von einem Streifenziehversuch in der Simulation nachzubilden, wurde über der strukturierten Werkzeuoberfläche im Abstand von  $10\ \mu\text{m}$  eine gleitende Wand (in dem Fall das Werkstück) mit einer Ziehgeschwindigkeit von  $100\ \text{mm/s}$  definiert. Diese Geschwindigkeit wird auch bei realen Ziehversuchen erreicht. Zudem kann optional eingestellt werden, aus welcher Richtung der Schmierstoff die Struktur anströmt. Allerdings wurde die Oberflächenrauheit von Werkzeug und Werkstück noch nicht berücksichtigt. Trotz dieser Vereinfachungen können durch die Simulationen erste Tendenzen identifiziert werden.

So kommt es zum Beispiel in einigen Teilbereichen der strukturierten Oberflächen zu einer Verringerung der Fließgeschwindigkeit. Sobald dies der Fall ist, bilden sich dort Schmierstoffreservoirs. Wird das Schmiermittel hingegen lokal auf über  $100\ \text{mm/s}$  beschleunigt, könnte dort der Schmierfilm abreißen.

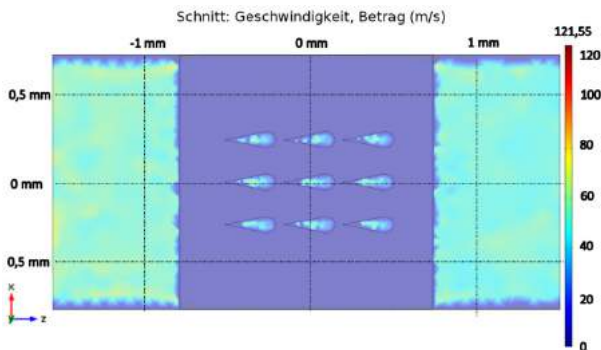


Fig. 24: Darstellung der Geschwindigkeit von  $\text{CO}_2$  auf Höhe der strukturierten Werkzeuoberfläche.

Der Einfluss der Fließgeschwindigkeit von flüssigem  $\text{CO}_2$  zwischen der Werkzeug- und Werkstückoberfläche konnte in den Simulationen verdeutlicht werden. Der in Fig. 24 dargestellte Schnitt zeigt die Geschwindigkeit an der Grenzfläche zwischen Werkzeug und Schmiermittel. Entsprechend zeigt Fig. 25 die Geschwindigkeit in der Grenzschicht zwischen Werkstück und Schmiermittel. Da sich in den Strukturen auf dem Werkzeug eine Geschwindigkeit  $> 0\ \text{mm/s}$  einstellt, kann davon ausgegangen werden, dass sich dort Schmierstoff ansammelt und die eingebrachten Strukturen als Reservoir fungieren.

In Fig. 25 und Fig. 26 ist deutlich zu erkennen, dass sich die Strukturen auf die Geschwindigkeit des fließenden Kohlenstoffdioxids in Höhe der Werkzeuoberfläche auswirken. Sobald die Strukturen nicht in Richtung des fließenden Mediums angeordnet sind, kommt es zu stärkeren Verwirbelungen und zu einem deutlichen Geschwindigkeitsabfall des  $\text{CO}_2$ . Aus diesem Grund ist eine Struktur zu wählen, deren Ausrichtung

sich an der Hauptziehrichtung im Umformprozess orientiert.

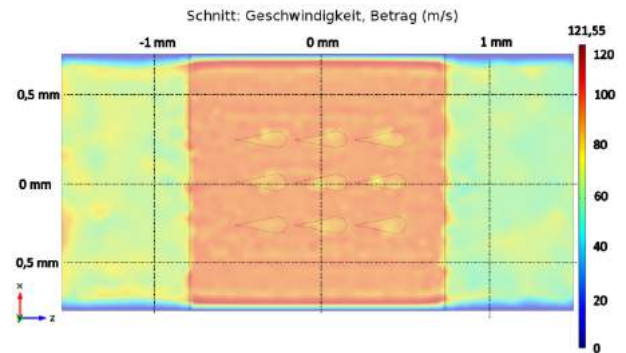


Fig. 25: Darstellung der Geschwindigkeit von  $\text{CO}_2$  auf Höhe der sich bewegten Werkstückoberfläche.

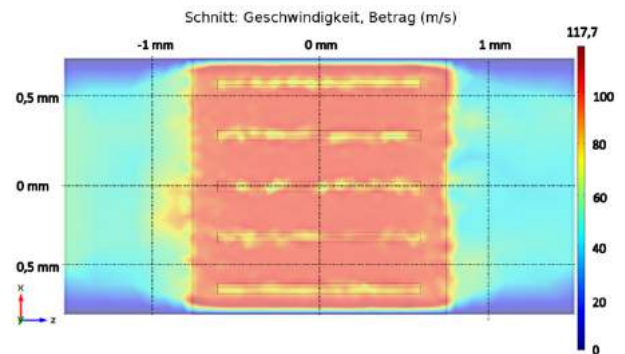


Fig. 26: Darstellung der Geschwindigkeit längs angeströmten Linienstrukturen, mit bewegter Platte.

#### 5.4 Streifenziehversuche mit flüssigem $\text{CO}_2$

Zu Untersuchung der Eignung des Tribosystems mit flüssigem  $\text{CO}_2$  als Schmierstoffersatz wurden Streifenziehversuche mit unterschiedlichen Bohrungsanzahlen durchgeführt. Zum Beweis der Eignung von flüssigem  $\text{CO}_2$  als Schmierstoff wurde zusätzlich ein gleich gestaltetes Werkzeug ohne Schmierung zur Aufnahme der Rückhaltekräfte verwendet. Bei den Bohrungsanzahlen handelt es sich, analog zu den Abströmversuchen, um ein Werkzeugplättchen, in das 9 lasergebohrte Mikrolöchern mit  $100\ \mu\text{m}$  Durchmesser am Bohrungsaustritt eingebracht wurden und um ein Werkzeugplättchen mit derselben Größe, jedoch mit 27 Bohrungen. Die 9 Bohrungen wurden mit einem Abstand von  $8\ \text{mm}$  quadratisch in die Kontaktfläche eingebracht, die 27 Bohrungen wurden in Form von 3 konzentrischen Kreisen mit 3, 9 und 15 Bohrungen um den Mittelpunkt der Kontaktfläche angeordnet. Die Versuche wurden mit einer Flächenpressung von  $5,5\ \text{MPa}$  und einer Ziehgeschwindigkeit von  $100\ \text{mm/s}$  durchgeführt. Für jedes Werkzeugplättchen wurden fünf Versuche aufgenommen und die Reibungszahl gemittelt. Fig. 27 zeigt die aufgenommenen Reibungszahlen aus dem Streifenziehversuch mit Flachbahn. Es ist zu erkennen, dass die Reibungszahl  $\mu$  bei Verwendung von flüssigem  $\text{CO}_2$  als Schmierstoffersatz im Vergleich zu den Versuchen ohne Schmierstoff verringert werden konnte. Mit steigender Anzahl an lasergebohrten Mikrolöchern sinkt die Reibungszahl weiter ab. Bei Verwendung des Wechselplättchens mit 27 Bohrungen konnte eine Verringerung

der Reibungszahl um 35 %, im Vergleich zu den Versuchen ohne Schmierstoff, gemessen werden.

Diese Verringerung der Reibungszahl hat drei Gründe. Zuerst wird der Druck von 57,3 bar direkt in die Wirkfläche zwischen Grund und Gegenkörper des Tribosystems eingebracht. Somit wurde eine Prozesskraft eingebracht, die der Normalkraft entgegenwirkt, was zu einer Reduzierung der Rückhaltekräfte führt.

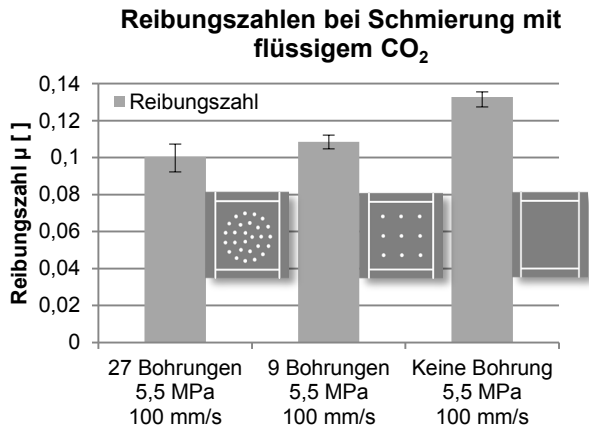


Fig. 27: Reibungszahlen bei Schmierung mit flüssigem CO<sub>2</sub>, Vergleich der Reibungszahlveränderung aufgrund unterschiedlicher Bohrungsanzahlen.

Des Weiteren bewirkt das eingetragene CO<sub>2</sub> eine Trennung von Werkzeug und Blech und wirkt als Zwischenstoff des tribologischen Systems, ähnlich einem konventionellen Schmierstoff. Außerdem ist das CO<sub>2</sub> reaktionsträge und lediglich die Kombination von H<sub>2</sub>, elementarem C, P, Mg oder Na und Hitze kann das CO<sub>2</sub> zu dem reaktionsfreudigeren CO reduzieren. Diese Eigenschaft verringert die chemische Wechselwirkung zwischen Grund- und Gegenkörper und somit das Auftreten unerwünschter tribologischer Effekte.

Die Änderung des Aggregatzustands von flüssig zu gasförmig, sowie die Entstehung des Trockeneisschnees direkt in der Kontaktfläche führt zu einem Gleiteffekt durch das Auffüllen der Oberflächenrauheiten von Werkzeug und Blech. Dies bewirkt ebenfalls eine Verringerung der Rückhaltekräfte.

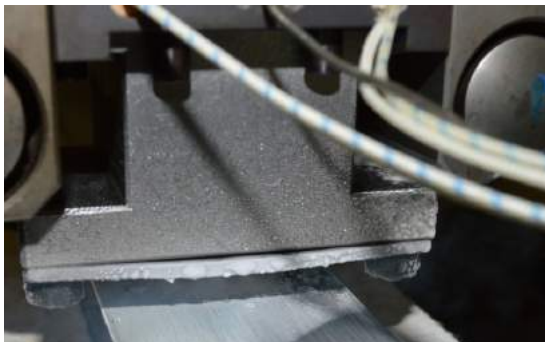


Fig. 28: Vereistes Werkzeugplättchen nach dem Streifenziehversuch.

Bei den Streifenziehversuchen war auffällig, dass das Werkzeug durch die Abkühlung beim Austritt des flüssigen CO<sub>2</sub> eine leichte Eisschicht ausgebildet hat. Diese ist in Fig. 28 zu erkennen. Hier besteht die Gefahr der Kaltversprödung des Werkzeugs und somit einem frühzeitigen Versagen. Für weitere Untersuchungen und

den anschließenden Übertrag auf ein Tiefziehwerkzeug muss dies bei der Auswahl des Werkzeugwerkstoffs beachtet werden. Da die Kaltversprödung nur bei kubisch-raumzentriertem Kristallgitter auftritt [18], muss hier ein Werkstoff mit kubisch-flächenzentriertem Kristallgitter ausgewählt werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Streifenziehmaschine am Institut für Umformtechnik wurde für den Gebrauch von flüssigem CO<sub>2</sub> als Schmierstoffersatz umgebaut, ein Versuchswerkzeug konstruiert und die Zuführungsart entwickelt. Zur Fertigung der Mikrobohrungen in der Wirkfläche konnte gezeigt werden, dass unter Verwendung von ultrakurz gepulster Laserstrahlung Mikrobohrungen mit Austrittsdurchmesser < 200  $\mu\text{m}$  in 4 mm Werkzeugstahl (1.2379) gefertigt werden können. Als Prozessstrategie wurde hierbei das Wendelbohrverfahren gewählt, welches eine schrittweise Aufweitung des Bohrkanals und somit das Vordringen in größere Tiefen ermöglicht. In Streifenziehversuchen konnte gezeigt werden, dass die Verwendung von flüssigem CO<sub>2</sub> die Reibungszahl deutlich reduziert. Auch die Oberflächenstrukturierung mit asymmetrischen Nöpfchen konnte in ersten Streifenziehversuchen mit konventioneller Schmierung die Reibungszahl im Vergleich zur geschliffenen Oberfläche um knapp 20 % reduzieren. Außerdem konnte ein Druckreaktor in Betrieb genommen werden, mit dem es möglich ist, verschiedene Gase auf ihre Tauglichkeit als Schmiermittel zu untersuchen.

In weiteren Untersuchungen sollen mit dem Laser Mikrobohrungen in 5 mm Werkzeugstahl gefertigt werden. Dazu ist geplant, einen Pikosekundenlaser mit einer mittleren Leistung von erstmals 1,1 kW zu verwenden, welcher am IFSW entwickelt wurde. Die Pulsenenergie liegt mit knapp 3,7 mJ eine Größenordnung höher als jene in diesen Untersuchungen verwendeten Lasersysteme. Darüber hinaus soll das Auströmverhalten sowie der Phasenübergang des flüssigen CO<sub>2</sub> am Bohrungsaustritt für verschiedene Bohrungsgrößen visualisiert und untersucht werden. Außerdem sollen die lasergefertigten Strukturen auch mit CO<sub>2</sub> als Schmierung auf ihre tribologische Wirkung getestet werden. Eine Optimierung der Strahlformung zur Erzeugung solcher Strukturen sowie die Untersuchung weiterer Strukturen sollen ebenfalls folgen. Zum besseren Verständnis der ablaufenden Prozesse muss in den nächsten Untersuchungen der reaktive Einfluss solcher Gase, welche auch im überkritischen Zustand vorliegen können, ausgeschlossen werden. Zudem soll das Verhalten von verflüssigten Gasen in Mikrolöchern genauer analysiert werden.

## Danksagung

Diese Arbeit ist 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] R. Span, W. Wagner: A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 25(6) (1996), 1509 – 1596
- [4] M. Liewald, S. Wagner; D. Becker: Ausstattung und Kompetenzen des Tribologie-Labors am Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart. IDDRG-Sitzung Düsseldorf (2005)
- [5] C. Föhl, F. Dausinger: High precision deep drilling with ultrashort pulses. *Proc. SPIE 5063* (2003) 346-351.
- [6] D. Breiting, C. Föhl, F. Dausinger, T. Kononenko, V. Konov in *Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications*. F. Dausinger, F. Lichtner and H. Lubatschowski, eds. (2004), Springer, Berlin.
- [7] M. Kraus, S. Collmer, S. Sommer, F. Dausinger: Microdrilling in steel with frequency-doubled ultrashort pulsed laser radiation. *J. Laser Micro/Nanoengineering* 3 (2008) 129–134
- [8] R. Weber et al.: Effects of Radial and Tangential Polarization in Laser Material Processing. *Physics Procedia* Vol. 12, Part A (2012) 21–30
- [9] H.L. Costa, I.M. Hutchings, Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. *Tribology International*, 40(8) (2007) 1227-1238.
- [10] I. Etsion, State of the art in laser surface texturing. *Journal of Tribology-Transactions of the Asme*, 2005. 127(1): p. 248-253.
- [11] R. Bathe et al., Laser surface texturing of gray cast iron for improving tribological behavior. *Applied Physics a-Materials Science & Processing*, 117(1) (2014) 117-123.
- [12] W. Grabon et al., Improving tribological behaviour of piston ring-cylinder liner frictional pair by liner surface texturing. *Tribology International*, 61 (2013) 102-108.
- [13] H.L. Costa, I.M. Hutchings, Effects of die surface patterning on lubrication in strip drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3) (2009) 1175-1180.
- [14] C. Donnet, A. Erdemir, "Tribology of Diamond-Like Carbon Films, Chapter 3: Laser Processing", (2008) Springer
- [15] I. Etsion, Modeling of surface texturing in hydrodynamic lubrication, *Friction*, 1 (3) (2013) 195–209.
- [16] Y. Hori, *Hydrodynamic Lubrication*. (2006): Springer Tokyo.
- [17] J. Han et al., Hydrodynamic Lubrication of Surfaces with Asymmetric Microdimple. *Tribology Transactions* 54(4) (2010) 607-615.
- [18] H. Berns, W. Theissen, *Eisenwerkstoffe – Stahl und Gusseisen*, (2013) Springer, Berlin Heidelberg