

# Dry Metal Forming Open Access Journal

## Fast Manuscript Track

Edited by Frank Vollertsen  
Available online at [elib.suub.uni-bremen.de](http://elib.suub.uni-bremen.de)



[www.drymetalforming.de](http://www.drymetalforming.de)

Dry Met. Forming OAJ FMT 2 (2016) 018–049  
Received 15 April 2016; published 09 May 2016

## Grundlagenuntersuchungen zur Herstellung von Lasermikrobohrungen in Stahl und dem Ausströmverhalten von CO<sub>2</sub> als Trockenschmiermedium

Georg Umlauf<sup>1,\*</sup>, Ehsan Zahedi<sup>2,\*</sup>, Christoph Würz<sup>3</sup>, Jakob Barz<sup>4</sup>, Mathias Liewald<sup>3</sup>, Thomas Graf<sup>2</sup>, Günter E. M. Tovar<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Deutschland

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

<sup>3</sup>Institut für Umformtechnik, Holzgartenstraße 17, 70174 Stuttgart, Deutschland

<sup>4</sup>Fraunhofer-Institut für Grenzflächen und Bioverfahrenstechnik, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Deutschland

### Abstract

Technische, wirtschaftliche und gesetzliche Vorgaben führen zu gesteigerten Anforderungen an Schmierstoffe der Blechumformung. Auch die Auswirkungen auf die Umwelt werden immer relevanter. Langfristig ist das Ziel, die verwendete Schmierstoffmenge zu reduzieren, um zukünftig Blechbearbeitungen ohne Schmierstoffe durchführen zu können. Ausgehend vom Bestreben der Trockenumformung wird 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 mit Verzicht auf nachfolgende, kostenintensive 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. Es wird gezeigt, dass mit Laserpulsen mit Pulsenergien von bis zu 2,3 mJ und einer Pulsdauer von 8 ps 12 mm dicker, nichtrostender Stahl in weniger als 50 Sekunden (pro Loch) gebohrt werden kann. Erst durch diese relativ kurzen Prozesszeiten wird es möglich sein, ausreichend viele Löcher für Werkzeuge für industrielle Anforderungen zu erzeugen und anschließend im Modellversuch „Streifenziehen mit Flachbahn“ auf ihre grundsätzliche Eignung zu verifizieren. Zur Verteilung des CO<sub>2</sub> werden in die Oberfläche von Umformwerkzeugen lasergenerierte Strukturen eingebracht. Zur Beurteilung der ablaufenden Prozesse und zur Beschreibung des tribologischen Systems wurden Untersuchungen zum Benetzungsverhalten von Werkzeug und Blech in einem Druckreaktor durchgeführt.

**Keywords:** Lasermikrobohren, Kohlenstoffdioxid, Trockeneis, Blechumformung,

### 1 Laserbohren

Die besonderen Herausforderungen beim laserbasierten Bohren von Metallen liegt vor allem in den hoch dynamischen Veränderungen der Randbedingungen während des Bohrprozesses begründet, wie beispielsweise die Änderung der lokalen Fluenz, das Entstehen von Plasma und die Bildung und der Transport von Schmelze im Inneren der Bohrung. Diese Phänomene nehmen an Bedeutung zu, wenn die Materialdicke zunimmt oder kleine Bohrungsdurchmesser benötigt werden. Sie haben Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit der Bohrwand und die Zylindrizität (bzw. den Taperwinkel) der Bohrung.

Für die Zuführung des CO<sub>2</sub> als Schmierstoffersatz in die Kontaktfläche des Umformwerkzeugs mit dem Blech werden mittels Laserstrahl Löcher in das Umformwerkzeug gebohrt. Um eine ausreichende Steifigkeit des Umformwerkzeugs sicherzustellen, sollte dieses eine minimale Dicke von 12 mm haben [1]. Erst dann können lokale Verformungen vermieden werden, welche einen negativen Einfluss auf die Homogenität der Reibungskräfte und demzufolge den Materialfluss entlang der Kontaktfläche haben.

Die Reibung zwischen Umformwerkzeug und Blech kann durch einen kontrollierten Durchfluss der flüchtigen Medien (z.B. CO<sub>2</sub>) beeinflusst werden. Der Zustand der Medien kann durch Herstellung von Mik-

rolöchern mit unterschiedlichen Durchmessern in verschieden dichter Anordnung verändert werden. Eine Verkleinerung der Lochdurchmesser macht den Prozess zudem wirtschaftlicher, da weniger CO<sub>2</sub> für den Umformprozess eines einzelnen Teils verbraucht wird.

Erst kürzlich wurden mit einem Pikosekunden-Lasersystem das Bohren von Mikrolöchern hoher Qualität in Stahl mit einer Dicke von 5,2 mm mit einem Austrittsdurchmesser von 140 µm demonstriert [2]. Die Prozesszeit zur Erzeugung jeder Mikrobohrung betrug ungefähr 500 Sekunden. Dieser Aspekt ist sehr wichtig, da in manchen Fällen mehrere hundert Mikrolöchern mit geringem Abstand voneinander im Umformwerkzeug gebohrt werden müssen. Für die industrielle Anwendung sollte die Prozesszeit daher verkürzt werden. Um Material mit einer Dicke von 12 mm effektiv bearbeiten zu können, werden also neue Lösungsansätze benötigt.

Die Herausforderungen dabei bestehen nicht nur aus einem größeren Volumen, welches abgetragen werden muss, sondern auch durch die dabei vergrößerte bestrahlte Oberfläche in der Kapillare, welche zu einer Reduzierung der einwirkenden Fluenz führt. Wegen des hohen Aspektverhältnisses der Bohrung kann Plasma wie eine zweite Wärmequelle wirken und die Bildung von Schmelze verstärken [3]. Des Weiteren führt eine Änderung der Wärmeleitung von drei auf zwei Dimensionen kombiniert mit Wärmeakkumulationseffekten zu einer weiteren Erhöhung der Temperatur und verstärkt die Erzeugung von Schmelze in der Kapillare. Darüber hinaus kann eine tiefe Kapillare den Auswurf von Abtragprodukten verhindern. Diese Partikel können den einfallenden Strahl absorbieren und streuen, wenn diese länger existieren als der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen.

Aufgrund der oben beschriebenen Herausforderungen kann es ein geeigneter Ansatz sein, Laserpulse mit hoher Pulsenergie zu verwenden, um die Bohrtiefe zu erhöhen. Hohe Pulsenergien führen zu einer hohen Fluenz deutlich über der Abtragungsschwelle auch in tiefen Kapillaren. Selbst nach Absorption von Strahlung in einem Plasma werden am Bohrungsgrund noch ausreichend hohe Fluenzen erreicht.

Um hohe Pulsenergie anwenden zu können, wurde der am Institut für Strahlwerkzeuge entwickelte Hochleistungs-Pikosekundenlaser [4] verwendet. Ein Überblick über die hier angewandten Spezifikationen des Lasersystems ist in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: IFSW kW-ps Lasersystem.

Pulsdauer	10 ps
Wellenlänge	1030 nm
Max mittlere Leistung	990 W
Max. Pulsenergie	3,3 mJ
Pulsrepetitionsrate	300 kHz
Beugungsmaßzahl	< 1,3
Polarisation	Zirkular
Kollimierter Strahldurchmesser	5,2 mm

Zur Erzeugung der Bohrung wurde die Pulsenergie während des Prozesses schrittweise erhöht. Dies bedeutet, dass zu Beginn des Bohrprozesses ungefähr 130 µJ appliziert wurden. Die Pulsenergie wurde schrittweise erhöht bis gegen Ende des Bohrprozesses ungefähr 2,3 mJ eingesetzt wurden. Die benötigte Bohrzeit wurde aufgezeichnet.

### Durchbohren von 5,2 mm dicken Material

Um den Einfluss der verschiedenen Beschichtungen, welche in Tabelle 2 aufgeführt sind, auf den Reibkoeffizient zu untersuchen, wurden für den Streifenziehversuch in einem quadratischen Feld 9 bzw. 25 Bohrungen mit einem Durchmesser von 140 µm in die Probe gebohrt. Die genaue Anordnung und die Abstände der Bohrungen sind in [2] beschrieben. Darüber hinaus wurden mit den gleichen Parametern einzelne Mikrolöcher in Stahl derselben Dicke für hydrodynamische Untersuchungen in der Druckkammer gebohrt, welche im nächsten Abschnitt diskutiert werden. Um die Bohrdauer zu verkürzen, wurde der oben erwähnte Laser für die Perkussionsbohrungen verwendet. Der Laserstrahl wurde durch eine Linse mit einer Brennweite von 330 mm fokussiert. Der fokussierte Strahl hatte einen Fokussdurchmesser von 103 µm. Die Pulsenergie zu Beginn der Bohrung betrug 130 µJ und wurde innerhalb von 33 ms schlagartig auf 1,1 mJ erhöht. Die benötigte Zeit zum Durchbohren des Materials betrug 1,8 Sekunden. In den vorherigen Untersuchungen [2] wurde eine Pulsenergie von 250 µJ für dasselbe Material mit derselben Dicke verwendet, wobei für eine Bohrung 500 Sekunden benötigt wurden. Verglichen dazu wurde die Pulsenergie um das Vierfache erhöht, wodurch die benötigte Zeit zum Durchbohren des Materials um das 280fache reduziert werden konnte. Die Abtragstiefe pro Puls hat sich dadurch im Vergleich zu [2] von 0,035 nm auf 10 nm erhöht. Dieser Wert ist vergleichbar mit der Abtragstiefe, welche in [5] mit einem Pikosekundenlaser auf der Oberfläche gezeigt wurde. Betrachtet man das Volumen des als Kegels stumpf genäherten Bohrlochs und nimmt in der Energiebilanz an, dass das gesamte Material verdampft wurde, resultiert ein Prozesswirkungsgrad von 6%.

Die Abbildung 1 zeigt die Austrittsöffnungen zweier Mikrolöcher. Der dunkle Bereich kennzeichnet wieder erstarrtes Material.

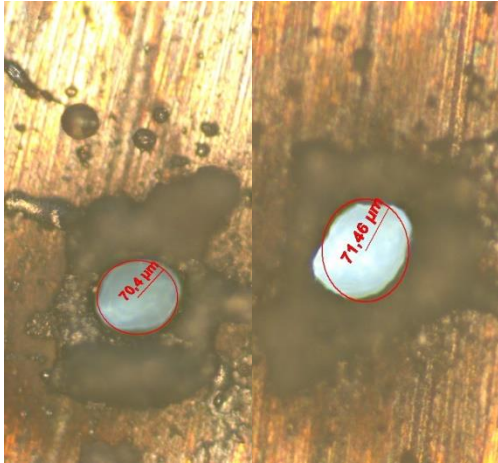


Abbildung 1: Die Austrittsöffnungen der Perkussionsbohrungen in 5,2 mm dickem Stahl hergestellt mit einem Pikosekundenlaser bei einer maximalen Pulsenergie von 1,1 mJ, Bohrdauer 1,8 Sekunden und Fokusdurchmesser von 103 µm.

### Durchbohren von 12 mm dicken Material

Wie bereits erläutert ist eine minimale Materialdicke von 12 mm notwendig, um eine ausreichende Steifigkeit des Umformwerkzeugs zu gewährleisten. Zum Durchbohren solch dicker Proben wurde der Laserstrahl mit einer Linse mit einer Brennweite von 750 mm fokussiert, wodurch ein Fokusdurchmesser von 236 µm resultiert. Die Pulsenergie zu Beginn der Bohrung betrug zunächst für 5 Sekunden 130 µJ. Dann wurde die Pulsenergie für 15 Sekunden schlagartig auf 0,5 mJ erhöht. Anschließend für 15 Sekunden auf 1,1 mJ und schließlich für sieben Sekunden auf 1,7 mJ erhöht. Die Gesamtzeit für eine Bohrung betrug 42 Sekunden. Der polierte und geätzte Querschnitt der gehärteten Probe ist in Abbildung 2 dargestellt.

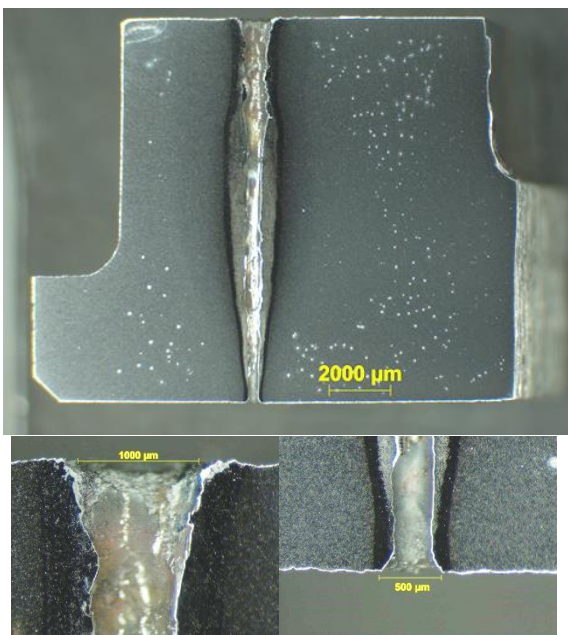


Abbildung 2: Querschnitt der Bohrung in gehärtetem Stahl mit 12 mm Dicke mit einem Pikosekunden-Lasersystem und einer maximalen Pulsenergie 1,7mJ und einem Fokusdurchmesser von 236 µm. Eintritt 1100 µm, Austritt 420 µm, Bohrdauer 42 Sekunden.

Bei der in Abbildung 2 dargestellten Probe traf der Laserstrahl diese von oben. Der Eintrittsdurchmesser beträgt 1100 µm, der Austrittsdurchmesser 420 µm. Jede Restwärme verursacht eine Phasenumwandlung in dem gehärteten Stahl. Während der Ätzung verändern sich die optischen Eigenschaften der Bereiche, in denen ein Phasenübergang stattfand und offenbaren somit die Ausdehnung der Wärmeeinflusszone. Die Grenze der Wärmeeinflusszone mit dem Grundwerkstoff ist durch den schwarzen Bereich gekennzeichnet. Es gibt zwei unterschiedliche Gebiete hinsichtlich der Ausdehnung der Wärmeeinflusszone: Erstens, nahe der Eintrittsöffnung der Bohrung beginnend bei der Oberfläche bis zu einer Tiefe von fast 2 mm, in der sich die Wärmeeinflusszone nicht so stark ausdehnt. Zweitens, die tropfenförmige Wärmeeinflusszone, welche bei einer Tiefe von 2 mm beginnt und bis zum Austritt immer kleiner wird. Diese Form kann eine Folge unterschiedlicher Temperaturerhöhungen abhängig von der Bohrtiefe sein, da in einem Teil des Gaußstrahls die Fluenz unterhalb der Abtragsschwelle liegt. In der Nähe des Eintritts ist der Anteil der gaußförmigen Intensitätsverteilung, der unterhalb der Abtragsschwelle liegt, aufgrund des senkrechten Einfalls noch am kleinsten. Mit zunehmender Tiefe treibt der zentrale Bereich des Gaußstrahls die Bohrung voran. Jedoch trägt ein zunehmend größerer Anteil des Gaußstrahls nicht zum Abtrag bei, da durch die vergrößerte Oberfläche der Anteil der gaußförmigen Intensitätsverteilung, der unter die Abtragsschwelle fällt, zunimmt. Der entsprechende Anteil der Pulsenergie, welcher im Material als akkumulierte Wärme induziert wird, führt zu einer Ausdehnung der Wärmeeinflusszone. Eine andere Möglichkeit, die zur Bildung der tropfenförmigen Wärmeeinflusszone geführt haben kann, könnte Streulicht des Plasmas sein. Wie in [3] beschrieben, wird bei einem Aspektverhältnis von 1-2 ein großer Anteil der Energie im Plasma umgewandelt.

Betrachtet man das Volumen des als geometrischen Kegelstumpfes genäherten Bohrlochs und nimmt in der Energiebilanz an, dass das gesamte Material verdampft, resultiert ein Prozesswirkungsgrad von 4,1 %.

### Durchbohren von 20 mm dicken Material

Für Untersuchungen von noch dickeren Materialien wurde Baustahl mit einer Dicke von 20 mm ebenfalls durchbohrt. Die Fokussieroptik war identisch mit der, die bei den Bohrungen in 12 mm dickem Material verwendet wurde. Die Pulsenergie zu Beginn der Bohrung betrug zunächst für 5 Sekunden 130 µJ. Dann wurde die Pulsenergie für 15 Sekunden schlagartig auf 0,5 mJ erhöht. Anschließend für 15 Sekunden auf 1,1 mJ und für 15 Sekunden auf 1,7 mJ erhöht. In einer letzten Rampe wurde schließlich die maximale Pulsenergie von 2,3 mJ für 18 Sekunden eingestellt. Die benötigte Zeit für eine Bohrung betrug 68 Sekunden. Der Querschnitt der Bohrung ist in Abbildung 3 zu sehen.

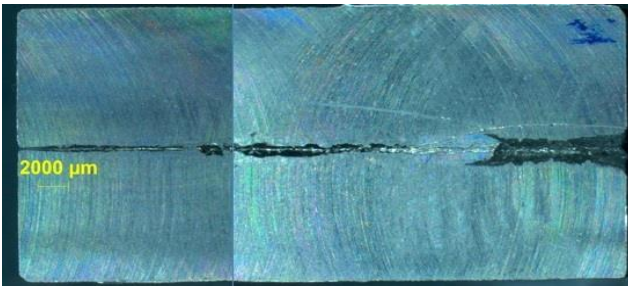


Abbildung 3: Querschnitt der Bohrung in Baustahl mit einem Pikosekunden-Lasersystem und einer maximal Pulsenergie von 2,3 mJ und einem Fokusdurchmesser von 236 µm. Eintritt 1200 µm, Austritt 450 µm, Bohrdauer 68 Sekunden.

In Abbildung 3 beträgt der Eintrittsdurchmesser auf der rechten Seite der Probe 1200 µm, der Austrittsdurchmesser auf der linken Seite beträgt 450 µm. Aufgrund der geringeren Härte dieser Probe wurden Bereiche während dem Sägeprozess zur Herstellung des Querschnitts zerstört.

Betrachtet man das Volumen des als geometrischen Kegelstumpfes genäherten Bohrlochs und nimmt in der Energiebilanz an, dass das gesamte Material verdampft, resultiert ein Prozesswirkungsgrad von 2,3 %.

## 2 Untersuchungen zum Durchströmverhalten von flüssigen CO<sub>2</sub> in Mikrolöchern

Zur Untersuchung des Ausströmverhaltens des flüssigen CO<sub>2</sub> aus den laserbohrten Mikrolöchern sollte das Verhalten der resultierenden Fontäne sichtbar gemacht werden. Die Zuführung des flüssigen CO<sub>2</sub> aus einer Gasflasche mit Steigrohr erfolgte über ein Rohrleitungssystem bis zur Unterseite des Messingblocks (siehe Abb. 4). Dieser ist mit einer durchgängigen Bohrung versehen. Mit Hilfe eines O-Rings und vier M6 Schrauben konnte das Wechselplättchen mit einer Mikrobohrung gegenüber dem Messingblock abgedichtet werden.

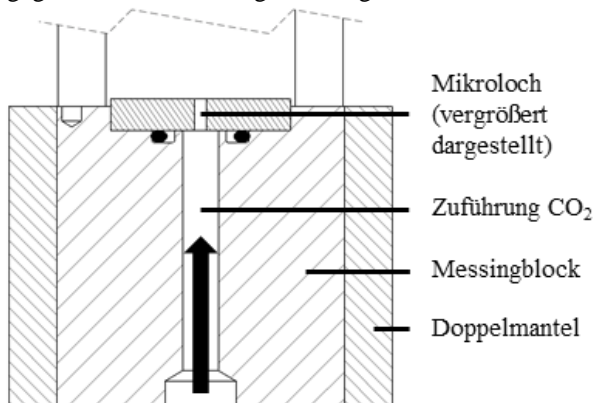


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Expansion von flüssigem CO<sub>2</sub> [1].

Bei den Experimenten wurde der Gegendruck im Druckreaktor ( $p_{\min} = 1$  bar;  $p_{\max} = 60$  bar) als auch die Lochgeometrie verändert. Der Probestisch, auf welchem die Wechselplättchen mit den Maßen 5 x 30 x 35 mm (B x H x T), mit jeweils einer Mikrobohrung befestigt waren, wurde unterschiedlichen Temperaturen von -15°C bis 40°C ausgesetzt. Die Temperaturregulierung wurde über den Doppelmantel und ein

daran angeschlossenes Thermostat realisiert. Somit sollte neben der Druckabhängigkeit auch ein Zusammenhang zur Werkzeugtemperatur dargestellt werden können. Auf Grund dessen, dass technisch bedingt die am IFSW hergestellten Bohrungen konisch durch das Material verlaufen, konnten die Proben jeweils als Konfuser und als Diffusor durchströmt werden (siehe Abb. 5).

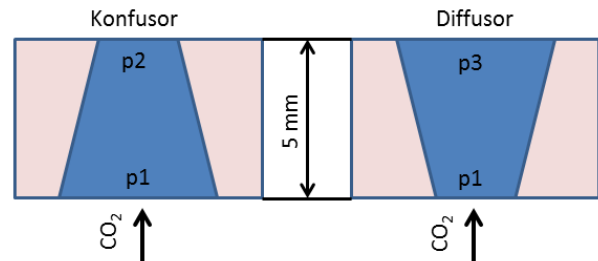


Abbildung 5: Für eine Strömungsgeschwindigkeit  $Mach < 1$  gilt: a) Durchströmung der Probe vom großen zum kleinen Durchmesser (sich verjüngender Querschnitt) wird als Konfuser bezeichnet; b) Durchströmung der Probe vom kleinen zum großen Durchmesser (sich erweiternder Querschnitt) wird als Diffusor bezeichnet.

Bei einer Unterschallströmung des Fluids durch einen Konfuser erhöht sich die Geschwindigkeit des Fluids. Im Gegensatz dazu wird das Fluid in einem Diffusor abgebremst. Während bei Unterschallgeschwindigkeit ein sich verjüngender Querschnitt als Konfuser und ein sich erweiternder Querschnitt als Diffusor wirkt, ist die Bezeichnung bei Überschallgeschwindigkeit umgekehrt. Die Strömung des Fluids lag bei den Untersuchungen stets im Bereich der Unterschallgeschwindigkeit. Der Druck  $p_1$  entspricht hierbei dem Flaschen- druck von maximal 57 bar. Bei diesen Untersuchungen wurde eine CO<sub>2</sub>-Gasflasche mit Steigrohr verwendet, somit konnte flüssiges CO<sub>2</sub> direkt bis unter das Probenplättchen transportiert werden. Erst auf dem Weg durch die 5 mm dicke Probe kam es zu einer Expansion des CO<sub>2</sub>. Das bei diesen Experimenten verwendete Probenplättchen hatte einen großen Lochdurchmesser (Lasereintritt) von 300 µm, der kleine Lochdurchmesser (Laseraustritt) betrug 140 µm.

Es wurden folgende Beobachtungen festgestellt, wenn die größere Bohrungsöffnung der CO<sub>2</sub>-Zuführung zugewandt war (Durchströmung als Konfuser): Vor dem ersten sichtbaren Austritt an CO<sub>2</sub> tritt eine deutliche Abkühlung um das Bohrloch herum auf, besonders bei Gegendrücken von 30 bis 40 bar. Die dabei eingestellte Probestichtemperatur betrug maximal 20 °C. Oberhalb dieser Temperatur konnte keine Abkühlung nachgewiesen werden.

Die beim Austritt des CO<sub>2</sub> aus der Bohrung entstehende Fontäne war breit gefächert und zeichnet sich durch einen größeren Öffnungswinkel aus (vgl. dazu Abb. 6a und 6b).

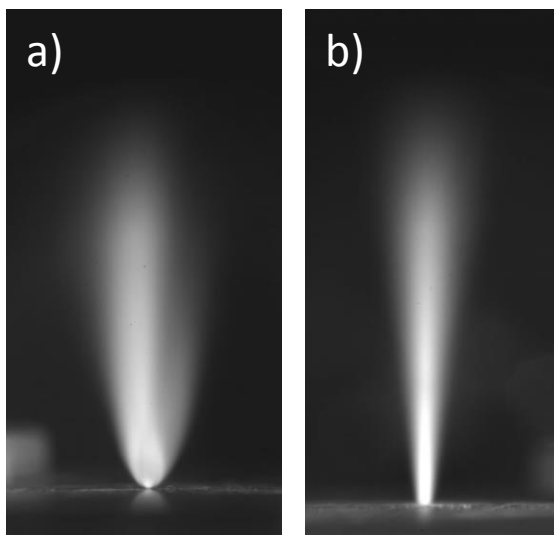


Abbildung 6: Durchströmung des CO<sub>2</sub> a) Fontäne am Lochaustritt mit Anordnung als Konfuser; b) Fontäne am Lochaustritt mit Anordnung als Diffusor; Gegendruck im Druckreaktor: p = 1 bar, Temperatur im Probestisch: T = -5°C.

Bei höheren Temperaturen im Probestisch neigt die Fontäne dazu, sich nur stockend aufzubauen. Bei einem hohen Gegendruck ist die Oberfläche zunächst mit einem dünnen Flüssigkeitsfilm bedeckt. Sobald es zu einem Austritt an CO<sub>2</sub> am Lochrand kommt, wird die Oberfläche um das Bohrloch herum entzerrt und ist vollkommen trocken.

Wenn diese Erkenntnisse auf einen Streifenziehversuch übertragen werden, bedeutet dies, dass sich bei hohen Flächenpressungen unter Umständen keine vollständig benetzte Oberfläche einstellen könnte. Eine genaue Erläuterung der Vorgehensweise der Untersuchungen bei einem Streifenziehversuch ist in [1] beschrieben.

Bei einem großen Lochdurchmesser als Lochaustritt (Durchströmung als Diffusor) konnten folgende Beobachtungen festgehalten werden:

Bei niedrigen Gegendrücken kommt es verstärkt zu einer Bildung von Trockeneis am Lochrand. Eine Abkühlung um das Bohrloch herum kann ebenfalls beobachtet werden, jedoch nicht in dem Maße wie bei einer Durchströmung als Konfuser.

Wenn ein mittlerer Gegendruck zwischen 25 und 35 bar eingestellt ist, entsteht eine flüssige Fontäne mit fein verteilten Tropfen. Diese Tropfen bilden, abhängig von der Probestischtemperatur, einen Flüssigkeitsfilm auf der Probenoberfläche.



Abbildung 7: Flüssige CO<sub>2</sub>-Fontäne bei einem Gegendruck von 30 bar und einer Probestischtemperatur von 0°C.

In den bisherigen Untersuchungen mit der Streifenziehmaschine am IFU [1] wurden die Proben so gefertigt, dass das CO<sub>2</sub> vom großen zum kleinen Lochdurchmesser strömt (Durchströmung als Diffusor). Auf Grund der hier gewonnenen Ergebnisse mit dem „umgekehrten“ Probenplättchen, ist mit einer positiven Entwicklung der Reibwerte zu rechnen. Zudem soll für ausgewählte Druck- und Temperaturverhältnisse die Abhängigkeit vom Lochdurchmesser weiter untersucht werden. Bisher standen nur Wechsellplättchen mit der oben beschriebenen Lochgeometrie zur Verfügung.

### 3 Optimierung des Ausbreitungsverhaltens auf plasmamodifizierten Oberflächen

Durch eine chemische Modifikation der Oberfläche der Probenplättchen durch PECVD-Plasmaverfahren soll das Spreitverhalten von dem Schmiermedium CO<sub>2</sub> hingehend zu einem besseren Benetzungsverhalten verändert werden. Primäres Ziel dabei ist, eine dünne Schicht im Nanometerbereich auf der Metallfläche abzuschneiden. Dieses Verfahren eignet sich ebenfalls dafür, die kleinen Strukturen (Tropfen, Sterne; siehe dazu Abb. 8) zu beschichten und kann so zur Verstärkung der Schmierwirkung beitragen. Dabei wurde eine Vielzahl an Schichten hergestellt und anschließend bewertet, um eine Schicht, mit den genannten Eigenschaften, für die weitere Bearbeitung in diesem Arbeitspaket zu bestimmen.

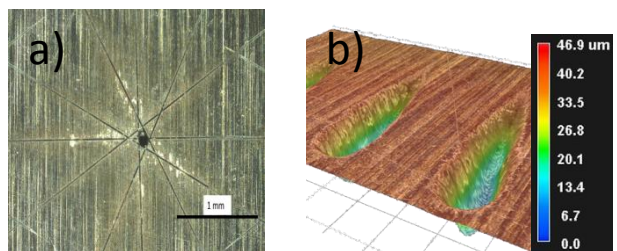


Abbildung 8: a) Sternstruktur am Bohraustritt; b) zusammengesetztes 3D-Bild einer Tropfenstruktur, Länge L = 300 µm [1].

Die Untersuchungen der Kontaktwinkelanalyse nach Wilhelmy an den beschichteten Proben erfolgte im Druckreaktor. Die Probenplatten wurden auf den Probenstisch senkrecht gestellt und der Reaktor mit flüssigem CO<sub>2</sub> bis zur Höhe des Sichtfensters gefüllt. Mit der Hochgeschwindigkeitskamera wurde der Vorgang aufgezeichnet und anschließend das Benetzungsverhalten gemessen und manuell ausgewertet.

Ein Auszug der verwendeten Schichten ist in Tabelle 2 zu finden. Im Rahmen der Quervernetzung der einzelnen Projekte im Schwerpunktprogramm Trockenumformen der DFG SPP 1676 wurden auch drei Schichten von externen Instituten getestet. Dabei handelt es sich um eine mit Wolfram dotierte amorphe Kohlenwasserstoffschicht vom Institut für Werkstofftechnik in Bremen (IWT). Des Weiteren wurde jeweils eine sp<sup>2</sup>- und eine sp<sup>3</sup>-hybridisierte Kohlenstoffschicht vom Dortmunder OberflächenCentrum (DOC) zur Verfügung gestellt. Die Schichten mit dem besten Benetzungsverhalten wurden dann im Anschluss auf Wechselplättchen für den Streifenziehversuch abgeschieden und in Kombination mit CO<sub>2</sub> als Schmiermittel auf der Streifenziehmaschine am IFU genauer untersucht.

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Schichten zur plasmatechnologischen Ausrüstung der Oberflächen.

Verwendete Schicht	Herstellung
Siliziumoxid	HMDSO + O <sub>2</sub>
HMDSO	HMDSO + N
Siliziumcarbid	CH <sub>4</sub> + SiH <sub>4</sub>
Siliziumnitrit	NH <sub>3</sub> + SiH <sub>4</sub>
Aluminiumoxid	N <sub>2</sub> O + TMA + Ar
Fluorkohlenstoff	C <sub>3</sub> F <sub>6</sub>
CHF <sub>3</sub>	CHF <sub>3</sub>
W-a:CH	extern
Sp <sup>2</sup>	extern
Sp <sup>3</sup>	extern

Neben der Kontaktwinkelanalyse wurden die Schichten auf ihren reaktiven Einfluss mit CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> untersucht. Dabei kam es bei Siliziumcarbidschichten und C<sub>3</sub>F<sub>6</sub>-Schichten nach dem Kontakt mit flüssigen CO<sub>2</sub> zu einer Ablösung der Schicht.

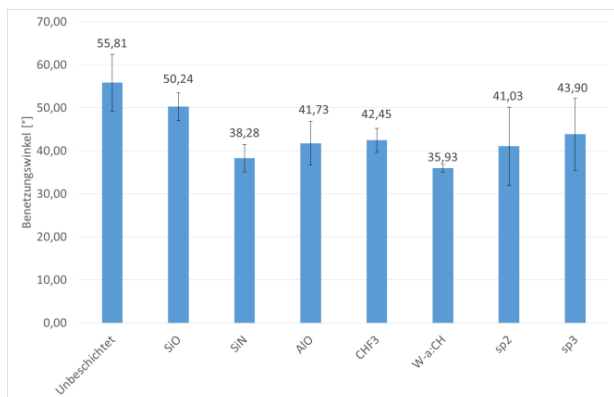


Abbildung 9: Kontaktwinkel nach Wilhelmy an den verwendeten Schichten. Ein unbeschichtetes Probenplättchen aus Werkzeugstahl 1.2379 wurde als Referenz verwendet.

Auf Grundlage der gemessenen Benetzungswinkel und die nachgewiesene Wechselwirkung der Schichten mit den Schmiermedien wird ein optimales Spreitverhalten der flüchtigen Schmiermedien durch eine Siliziumnitrit- oder eine wolframbdotierte amorphe Kohlenwasserstoffschicht gewährleistet. Durch beide Schichten kann der Kontaktwinkel erheblich gesenkt werden, was durch eine größere Benetzung der Metalloberfläche nachgewiesen wird.

Daraufhin wurden insgesamt vier Proben für den Streifenziehversuch mit einer Siliziumnitritschicht beschichtet, die Schichtdicke betrug 105 nm.

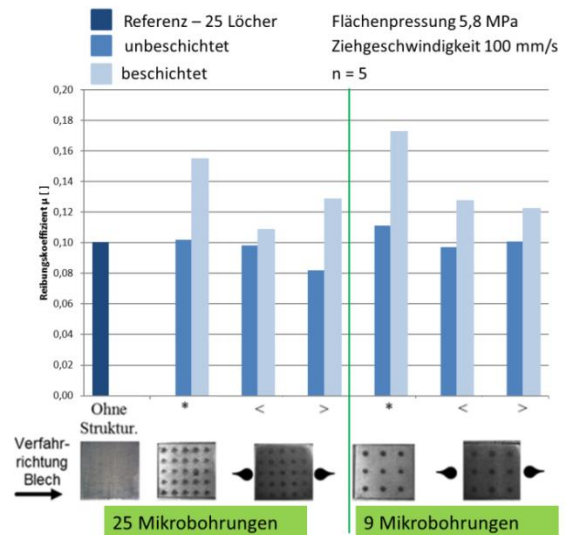


Abbildung 10: Mittelwert der Reibungszahl für verschiedene Prozessparameter im Vergleich zu beschichteten und unbeschichteten Proben.

Die plasmamodifizierten Wechselplättchen konnten nicht den gleichen Reibwert erreichen wie die unbeschichteten Proben. Jedoch gab es bei den neu hergestellten Wechselplättchen deutliche Wärmeeinflusszonen um die Bohrlöcher herum, es bildeten sich während der Laserbearbeitung Erhöhungen von 20 µm. Diese Erhöhungen führen dazu, dass die Kontaktfläche minimiert wird und sich der Reibwert erheblich erhöht. Allerdings konnte durch mikroskopische Aufnahmen nachgewiesen werden, dass trotz Abnutzung der Siliziumnitritschicht diese Schicht in den Vertiefungen der Strukturen erhalten bleibt.

**Ausblick**

In den nächsten Monaten der zweiten Förderperiode wird in Kooperation zwischen dem IFU und dem IGVP eine optisch zugängliche Streifenziehmaschine konstruiert und gefertigt. Mit dieser Anlage wird es dann möglich sein, mittels der Hochgeschwindigkeitskamera die Vorgänge in der Wirkfuge zwischen Werkzeug und Werkstück zu beobachten und den Einfluss der Strukturen zu verifizieren. Desweiteren wird am IGVP aufbauend auf den ersten Versuchen die unterstützende Wirkung der plasmamodifizierten Oberfläche weiter untersucht. Am IFSW wird eine weitere Erhöhung der Materialdicke bis zu 30 mm angestrebt, um die tiefste mögliche Bohrung zu demonstrieren und gleichzeitig die nötige Festigkeit für die Werkzeuge zu gewährleisten.

Weitere Untersuchungen müssen folgen, um die Phänomene, welche die Ausdehnung der Wärmeeinflusszone bestimmen, besser zu verstehen. Um die Effizienz des Bohrprozesses zu erhöhen, muss die tatsächliche Form und Tiefe der Kapillare bekannt sein. Weiterhin wird der Einfluss von Mikrolöchern auf das Verhalten von flüssigem CO<sub>2</sub> beim durchströmen als Diffusor näher beleuchtet und untersucht.

### 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. Zudem bedankt sich das IGVP für Bereitstellung der beschichteten Proben bei Herrn Hasselbruch von der Stiftung Institut für Werkzeugtechnik (IWT) in Bremen und Herrn Stucky am Dortmunder OberflächenCentrum (DOC). Ein Dank gilt außerdem Frau Monika Bach vom IGVP Stuttgart, für die hilfreichen Diskussionen und die fachliche Unterstützung.

### Referenzen

- [1] M. Liewald, T. Graf, T. Hirth, M. Singer, A. Feuer, E. Zahedi, G. Umlauf, Tribosysteme für die Kaltumformung auf der Basis von flüchtigen Schmiermedien und laserstrukturierten Oberflächen, *Dry Metal Forming OAJ FMT 1*, (2015).
- [2] M. Liewald, T. Graf, T. Hirth, C. Wörz, S. Boley, E. Zahedi, G. Umlauf, Tribosysteme für die Kaltumformung auf der Basis von flüchtigen Schmiermedien und laserstrukturierten Oberflächen, *Dry Metal Forming OAJ FMT 2*, (2015).
- [3] S. M. Klimentov, T. V. Kononenko, P. A. Pivovarov, S. V. Garinov, V. I. Konov, A. M. Prokhorov, D. Breitling, and F. Dausinger, The role of plasma in ablation of materials by ultrashort laser pulses, *Quantum Electron.* **31**(5), 378–382 (2001).
- [4] J.-P. Negel, A. Voss, M.A. Ahmed, D. Bauer, D. Sutter, A. Killi, T. Graf, 1.1 kW average output power from a thin-disk multipass amplifier for ultrashort laser pulses. *Opt. Lett.* **38** (24), 5442–5445 (2013).
- [5] S. Nolte, C. Momma, H. Jacobs, A. Tünnermann, B.N. Chichkov, B. Wellegehausen, H. Welling, Ablation of metals by ultrashort laser pulses, *J. Opt. Soc. Am. B* **14**, 2716 (1997).