



## Tiefziehen eines U-Profiles mit flüchtigen Medien als Schmierstoffersatz

Christoph Wörz<sup>1,\*</sup>, Ehsan Zahedi<sup>2</sup>, Georg Umlauf<sup>3</sup>, Mathias Liewald<sup>1</sup>, Rudolf Weber<sup>2</sup>, Thomas Graf<sup>2</sup>, , Günter E. M. Tovar<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 und gesetzliche Vorgaben führen zu gesteigerten Anforderungen an Schmierstoffe in der Blechumformung. Auch die Auswirkungen der Schmierstoffapplikation auf die Umwelt werden immer relevanter. Langfristig ist es das Ziel in der Blechumformung, die verwendete Schmierstoffmenge zu reduzieren, um zukünftig Blechbearbeitungen ohne Schmierstoffe durchführen zu können. Ausgehend vom Bestreben der Trockenumformung wird an der Universität Stuttgart ein neuartiges Verfahren zur Schmierung von Tiefziehprozessen mit flüchtigen Medien als Schmierstoffersatz entwickelt. Dieses Verfahren ermöglicht das Einbringen eines Zwischenmediums unter hohem Druck durch lasergebohrte Mikrolöcher in das tribologische System mit Verzicht auf nachfolgende, kostenintensive Reinigungsprozesse, da die flüchtigen Medien bei der Entspannung auf Umgebungsdruck rückstandslos verdampfen. In der ersten Forschungsphase lag der Schwerpunkt auf dem Nachweis der prinzipiellen Realisierbarkeit dieses neuen Ansatzes. Es konnte in Reibungsuntersuchungen gezeigt werden, dass das Einleiten von flüchtigen Medien in die Wirkfuge zwischen Blechwerkstoff und Werkzeug über lasergebohrte Mikrolöcher möglich ist. Gute Reibungswerte konnten mit flüssigem Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Stickstoff (N<sub>2</sub>) erzielt werden. In diesem Zwischenbericht werden weitere Reibungsuntersuchungen mit diesen beiden Medien vorgestellt. Schwerpunkt liegt hier auf der Auswahl der, in Bezug auf die Reibung, optimalen Gestaltung der Mikrobohrungen (Durchmesser, Düsenart und Anzahl) sowie auf umfangreichen Untersuchungen, wie diese Mikrolöcher mittels Laserbohren hergestellt werden können. Zudem wird ein neuer Prüfstand mit optischer Zugänglichkeit zur Wirkfuge beim Streifenziehen vorgestellt. Mit diesem Prüfstand kann der Aggregatzustand und das Ausströmverhalten des CO<sub>2</sub> untersucht werden. Diese Untersuchungen dienen als Grundlage für die erstmalige Umsetzung des neuen Ansatzes zur Trockenumformung in einem Tiefziehwerkzeug. Der Aufbau dieses Werkzeugs zum Tiefziehen eines U-Profiles wird hier detailliert vorgestellt. In ersten Versuchen wird gezeigt, dass ein Tiefziehen mit CO<sub>2</sub> als temporär wirkendes Schmiermittel möglich ist und dass dieser Ansatz nicht nur ein Ersetzen von mineralölbasierten Schmierstoffen zu ermöglichen scheint, sondern sogar eine Verbesserung des tribologischen Systems in Bezug auf auftretende Reibungskräfte in der Blechumformung bewirkt. Mit diesen Versuchen zur Umsetzung des neuen Tribosystems in einem Tiefziehwerkzeug wird somit, nach Aufzeigen der prinzipiellen Machbarkeit in der ersten Förderperiode, das nächste Teilziel zur Realisierung des Trockenumformens erreicht.

**Keywords:** Tiefziehen, Trockenumformung, Lasermikrobohren, Reibungsuntersuchungen

### 1 Einleitung

In der Blechumformung werden meist mineralölbasierte Schmierstoffe verwendet, um Reibung und Verschleiß in den Umformwerkzeugen zu verringern. Dabei sind bisweilen toxische Additive im Schmierstoff enthalten und außerdem müssen die umgeformten Bauteile für nachfolgende Prozessschritte kosten- und zeitintensiv gereinigt werden [1]. Aus diesen Gründen wirkt sich der Verzicht von Schmierstoffen schonend auf die Umwelt

sowie positiv auf die Wirtschaftlichkeit von Produktionsprozessen aus.

An der Universität Stuttgart wird daher in Kooperation der Institute für Umformtechnik (IFU), Grenzflächenverfahrenstechnik und Plasmatechnologie (IGVP) und Strahlwerkzeuge (IFSW) ein neuartiges Tribosystem für die Blechumformung entwickelt, bei dem auf konventionelle, ölbasierte Schmierstoffe verzichtet werden kann. Über lasergebohrte Mikrolöcher, die als eine Art

Düse fungieren, werden flüchtige Medien unter hohem Druck in die Wirkfuge zwischen Blechwerkstoff und Werkzeug eingeleitet, in der diese Medien temporär als Schmierstoff wirken und im Anschluss rückstandlos verdampfen. Bisher konnte in modellhaften Reibungsuntersuchungen gezeigt werden, dass sowohl CO<sub>2</sub> als auch N<sub>2</sub> sich sehr gut als temporär wirkendes Schmiermedium eignen.

Um das am besten geeignete Medium für die Anwendung in der Blechumformung zu finden, werden in diesem Bericht weitere Untersuchungen und deren Ergebnisse vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf dem besseren Verständnis der physikalischen Wirkmechanismen, die zu den hervorragenden Reibungseigenschaften bei der Verwendung dieser Medien im Streifenziehversuch führen. Hierfür wurde ein neuer Versuchsstand entwickelt und gebaut, bei dem durch ein Glas das Ausströmen des CO<sub>2</sub> aus den Mikrobohrungen während des Streifenziehversuchs beobachtet werden kann. Als Grundlage dafür wurde ein neues Werkzeug für die Streifenziehmaschine entwickelt, bei dem gehärtete Ziehbacken mit unterschiedlichen Formen der Mikrobohrungen (Anzahl, Düsenart und Durchmesser) verwendet werden können. Eine große Herausforderung ist dabei die prozesssichere Herstellung dieser definierten Laserbohrungen mit einer Bohrtiefe von 5,2 mm in den gehärteten Ziehbacken. Abschließend wird die erstmalige Umsetzung des neuen Ansatzes zur Trockenumformung in ein reales Tiefziehwerkzeug vorgestellt.

## 2 Konstruktion und Fertigung eines neuen Werkzeugs für Reibungsuntersuchungen in der Streifenziehmaschine

Zu Projektbeginn wurde ein Werkzeug für Reibungsuntersuchungen in der Streifenziehmaschine (Aufbau und Funktion, siehe Kapitel 3) entwickelt, um die prinzipielle Machbarkeit des neuen Ansatzes zur Trockenumformung erstmalig zu untersuchen. Es zeigte sich, dass flüssiges CO<sub>2</sub> über Mikrobohrungen in die Wirkfuge zwischen Blechwerkstoff und Werkzeug geleitet werden kann und dies zu niedrigen Reibungswerten führt. Auch gasförmiges N<sub>2</sub> kann mit diesem Werkzeug als Schmiermedium verwendet werden. Die Versuche mit diesem ungehärteten Werkzeug zeigten weiter, dass die Anzahl und die Form der Mikrobohrungen einen merklichen Einfluss auf die Reibungswerte haben [2].

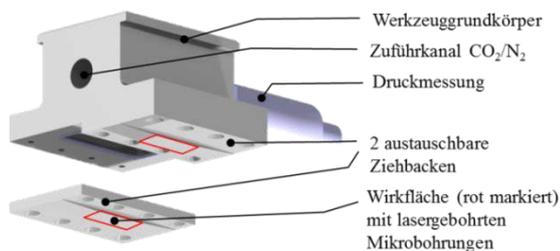


Abbildung 1: Detailansicht des neuen Streifenziehwerkzeugs mit austauschbaren Ziehbacken.

Um die umfangreichen Untersuchungen zu der Auswahl des am besten geeigneten Schmiermediums und der optimalen Form der Mikrobohrungen weiterführen zu

können, wurde ein neues optimiertes Streifenziehwerkzeug entwickelt (siehe Abbildung 1). Das Werkzeug besteht aus einem Grundkörper mit Zuführkanälen für das Wirkmedium, einer Vorrichtung zur Druckmessung und zwei gehärteten Ziehbacken aus 1.2379 (60+/-2 HRC), die über O-Ringe zum Grundkörper abgedichtet sind. Die Wirkfläche der Ziehbacke beträgt 20 mm x 10 mm (roter Rahmen in Abbildung 1), was für die beiden Ziehbacken eine Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Blech von insgesamt 400 mm<sup>2</sup> entspricht. Durch die geteilten Ziehbacken ergibt sich eine gleichmäßige Auflage der Werkzeugkontaktfläche auf dem Blechwerkstoff und damit ein reproduzierbares Reibverhalten mit geringeren Messstreuungen beim Streifenziehen. Zudem wird bei den geteilten Ziehbacken aufgrund ihrer kompakten Form der Verzug beim Härten reduziert, wodurch deren Herstellbarkeit verbessert wird. Auch wurden beim neuen Werkzeug dickere Ziehbacken mit 5,2 mm verwendet, um die elastische Auffederung der Werkzeugkontaktfläche durch den hohen Druck von 60 bar zu reduzieren und somit eine Verfälschung der Reibungswerte aufgrund einer veränderten Kontaktfläche auszuschließen.

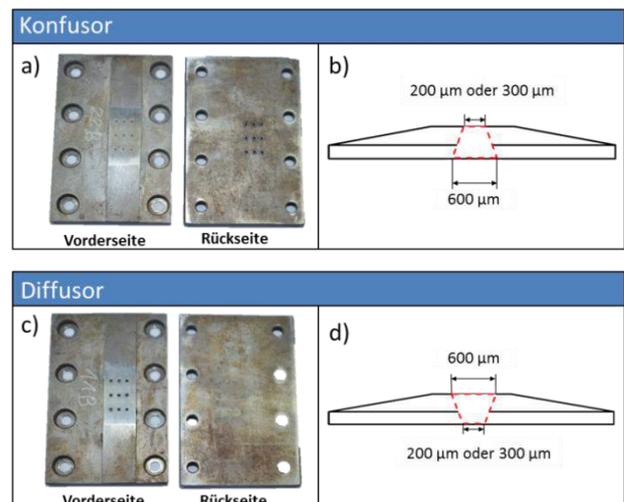


Abbildung 2: a) Beispiel für eine Ziehbacke mit 3x3 Mikrobohrungen als Konfusor b) Prinzipielle Darstellung für eine Mikrobohrung als Konfusor c) Beispiel für eine Ziehbacke mit 9 Mikrobohrungen als Diffusor d) Prinzipielle Darstellung eine Mikrobohrung als Diffusor.

Für die Ziehbacken wurden verschiedene Konfigurationen von Mikrobohrungen ausgewählt. Da beim Laserbohren von tiefen Löchern keine zylindrischen Bohrungen möglich sind, ergibt sich bei der Herstellung zwangsläufig die Düsenform Konfusor oder Diffusor. Wird von der Wirkfläche aus gebohrt, befindet sich der größere Öffnungsdurchmesser auf der Ziehfläche was bei der vorgegebenen Strömungsrichtung des Mediums der Düsenart Diffusor entspricht. Bei einem Konfusor wird mit den gleichen Einstellungen von der Rückseite aus gebohrt, so dass sich der kleinere Durchmesser am Austritt des Mediums befindet (siehe Abbildung 2). Der größere Durchmesser wird dabei bei allen Konfigurationen mit 600 µm gleichgehalten. Basierend auf den Erkenntnissen mit dem alten Versuchswerkzeug und den verfahrensbedingten Grenzen beim Laserbohren wurde als kleinerer Durchmesser 200 µm und 300 µm ausgewählt.

Die Anzahl der Mikrobohrungen pro Ziehbacke wurde festgelegt auf 3 (eine Reihe mit drei Bohrungen), 7 (eine Reihe mit sieben Bohrungen), 9 (drei Reihen mit je drei Bohrungen) und 21 (drei Reihen mit je sieben Bohrungen). Insgesamt stehen somit 16 verschiedene Werkzeuge zur Verfügung. Ein Werkzeug besteht dabei immer aus zwei Ziehbacken mit der gleichen Konfiguration. Die verschiedenen Werkzeugkonfigurationen sind in der nachfolgenden Tabelle nochmals zusammengefasst.

Tabelle 1: Übersicht über die verschiedenen Werkzeugkonfigurationen durch Variation der Mikrobohrungen

Düsenart	Konfusor	Diffusor		
Ø Klein	200 µm	300 µm		
Ø Groß	600 µm			
Anzahl der Bohrungen	3	7	9	21

## 2.1 Herstellung der Laserbohrungen mit unterschiedlichen Bohrungsgeometrien

Die Bohrungen wurden mit dem kw-class-ps Laser am IFSW und der Bohroptik GL Trepan der Firma GFH GmbH erzeugt. Die Strahlquelle ist ein Prototyp-System, welches am IFSW entwickelt wurde [3]. Während die Strahlquelle eine Pulsenergie von bis zu 2,2 mJ ermöglicht, bringt die Bohroptik GL Trepan den Strahl zum Rotieren, wobei das Strahlprofil während der Rotation mitgedreht wird. Neben der Strahlrotation ist auch eine Anstellung des Laserstrahls möglich. Dies ermöglicht die Erzeugung definierter Geometrien entlang der Achse des Bohrloches. In Tabelle 2 sind die Eigenschaften des Lasersystems sowie der Bohroptik zusammengefasst.

Tabelle 2: Eigenschaften des IFSW kw-class-ps Lasersystems sowie der GL Trepan Bohroptik.

Laserquelle	
Pulsdauer	10 ps
Wellenlänge	1030 nm
Max mittlere Leistung	650 W
Max. Pulsenergie	2,2 mJ
Pulsrepetitionsrate	300 kHz
Beugungsmaßzahl	< 1,3
Polarisation	Linear
Kollimierter Strahldurchmesser	5,2 mm
GL Trepan	
Umdrehungsgeschwindigkeit	0-30'000 rpm
Durchmesseränderung	0-1500 µm (für f=300 mm)
Anstellwinkeländerung	0°-4°

In diesem Bericht werden die Ergebnisse der Bohrungen mit verschiedenen Repetitionsraten in gehärtetem und ungehärtetem Werkzeugstahl (1.2379) vorgestellt. Eine plankonvexe Linse mit einer Brennweite von 220 mm wurde für die Fokussierung des Strahls auf 64 µm verwendet. Der Fokus wurde in die Mitte des 5,2 mm dicken Werkstücks gelegt. Die Rayleighlänge

des fokussierten Strahls von 3,07 mm ist dabei etwas kürzer als die Dicke der Probe. Ziel war es, Prozessparameter zu finden, welche eine hohe Qualität der Bohrung bei vergleichsweise hoher Bohrgeschwindigkeit liefern.

Ein für das Laserbohren wichtiger Parameter ist die Energiedichte des Laserstrahls, welche als Pulsenergie dividiert durch die bestrahlte Fläche definiert ist. Die Energiedichte des Laserstrahls sollte optimalerweise 5 bis 10-mal oberhalb der Abtragsschwelle des Materials liegen [4]. Zu Beginn des Bohrprozesses, an der Werkstückoberfläche, ist die bestrahlte Fläche gegeben durch die Querschnittfläche des Laserstrahls. Während der Zunahme der Lochtiefe im Laufe des Bohrprozesses vergrößert sich die bestrahlte Oberfläche auf der Innenseite des Bohrloches. Somit wird eine höhere Pulsenergie als zu Beginn des Bohrprozesses benötigt, um weiterhin eine optimale Fluenz sicherzustellen. Ein rampenförmiger Anstieg der Pulsenergie ist notwendig, um dies zu gewährleisten. Dies wurde bei der in Abbildung 3 dargestellten Bohrstrategie angewendet. Für die Werkzeuge sollten Bohrungen mit einem Eintrittsdurchmesser von 600 µm und einem Austrittsdurchmesser von 200 µm in 5.2 mm dickem Material erzeugt werden. Um den gewünschten Eintrittsdurchmesser von 600 µm zu erreichen, hat sich ein nomineller Durchmesser der Strahlrotation von 1000 µm durch die GL Trepan als passend erwiesen. Nach 2500 ms Bohrdauer wurde der Rotationsdurchmesser auf 400 µm gesenkt, um einen Austrittsdurchmesser von 200 µm zu erzielen.

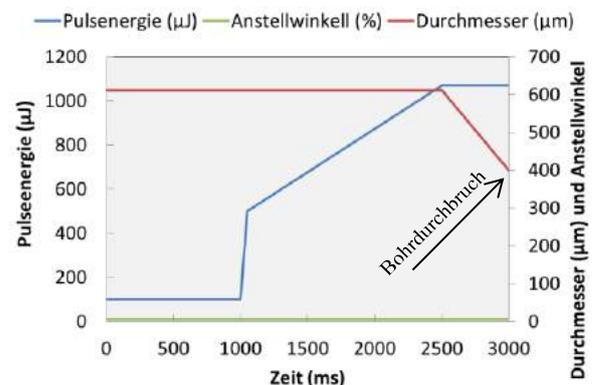


Abbildung 3: Prozessstrategie für die Herstellung der Mikrobohrung mit 600 µm / 200 µm für die Pulsenergie (blau), den Rotationsdurchmesser (rot) und einen konstanten Neigungswinkel von 0° (grün). Gebohrt wurde mit konstanter Repetitionsrate von 300 kHz und Rotationsgeschwindigkeit von 30'000 rpm. Der Pfeil zeigt den Zeitpunkt des Bohrdurchbruchs an.

Der Verlauf des Rotationsdurchmessers ist durch die rote Linie in Abbildung 3 dargestellt. Die Repetitionsrate und die Rotationsgeschwindigkeit wurden während des Bohrprozesses konstant gehalten (300 kHz und 30'000 rpm). Der schwarze Pfeil in Abbildung 4 kennzeichnet den Moment des Bohrdurchbruchs. Nach 3000 ms ist Probe komplett durchbohrt. Jede zusätzliche Einstrahlzeit oder Änderung des Rotationsdurchmessers führte anschließend zu einer Vergrößerung des Eintrittsdurchmessers.

Neben den Bohrungen mit 600 µm Eintritts- und 200 µm Austrittsdurchmesser wurden Bohrungen mit

600  $\mu\text{m}$  Eintritts- und 300  $\mu\text{m}$  Austrittsdurchmesser erzeugt. Für die Produktion dieser Mikrobohrungen wurde in der ersten Phase des Prozesses der maximale Neigungswinkel von  $4^\circ$  und ein Rotationsdurchmesser von 0  $\mu\text{m}$  verwendet. Die Prozessstrategie ist in Abbildung 4 veranschaulicht, in welcher die Pulsenergie, der Rotationsdurchmesser und der Anstellwinkel als Funktion der Prozesszeit zu sehen sind. Am Ende der ersten Phase konnte ein Austrittsdurchmesser von 300  $\mu\text{m}$  erzielt werden (gekennzeichnet durch einen schwarzen Pfeil in Abbildung 4). Der Eintrittsdurchmesser ist zu diesem Zeitpunkt mit 400  $\mu\text{m}$  jedoch noch nicht ausreichend groß. Daher wurde in einer zweiten Phase des Bohrprozesses der Rotationsdurchmesser zunächst auf 1400  $\mu\text{m}$  erhöht während der Laser ausgeschaltet war. Danach wurde der Laser wieder für 500 ms eingeschaltet um den geforderten Eintrittsdurchmesser von 600  $\mu\text{m}$  zu erzeugen.

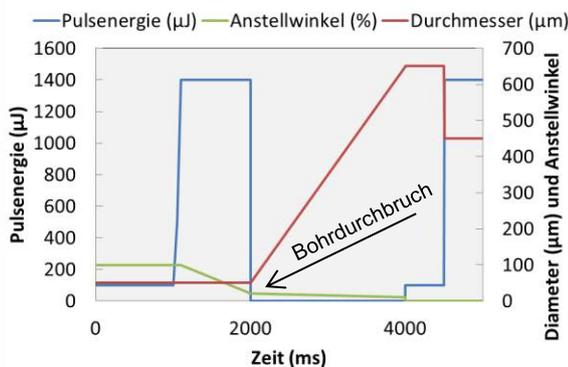


Abbildung 4: Prozessparameter für die Herstellung der Mikrobohrung mit 600  $\mu\text{m}$  / 300  $\mu\text{m}$ . Pulsenergie (blau), Rotationsdurchmesser (rot) und Neigungswinkel (grün). Gebohrt wurde mit konstanter Repetitionsrate von 300 kHz und Rotationsgeschwindigkeit von 30000 rpm. Der Pfeil zeigt den Zeitpunkt des Bohrdurchbruchs an.

## 2.2 Bohrungen in ungehärteten Stahl

Im Folgenden werden die Ergebnisse erster Bohrversuche mit verringerter Repetitionsrate vorgestellt. Dabei wurde bei Repetitionsraten von 15 kHz bis 100 kHz mit jeweils  $10^6$  Pulsen gebohrt. Es wurden ungehärtete Proben aus Werkzeugstahl 1.2379 mit einer Dicke von 5,2 mm für diese Versuche verwendet. Um die Tiefe und die Größe der Wärmeeinflusszone zu messen, wurden Querschliffe durch mechanisches Schleifen und Ätzen mit denselben Parametern, wie bei den gehärteten Proben, hergestellt. Die Querschliffe sind in Abbildung 5 dargestellt. Von links nach rechts steigt die Repetitionsrate. Aufgrund der unterschiedlichen Verstärkung bei verschiedenen Repetitionsraten variieren die Pulsenergien leicht.

Bei den geringen Repetitionsraten von 15 kHz und 30 kHz konnten die Proben mit  $10^6$  Laserpulsen nicht vollständig durchbohrt werden. Erst bei 60 kHz und 100 kHz konnten Durchgangsbohrungen erzeugt werden. Bei der Bohrung, welche mit Repetitionsraten  $\leq 60$  kHz hergestellt wurde, ist lediglich eine geringe Wärmeeinflusszone feststellbar. Die Wärmeeinflusszone ist nach dem Ätzen durch die orangefarbige Zone zu erkennen. Bei der Repetitionsrate von 100 kHz hat sich eine Wärmeeinflusszone von ca. 300  $\mu\text{m}$  auf beiden Weiten des Loches gebildet.

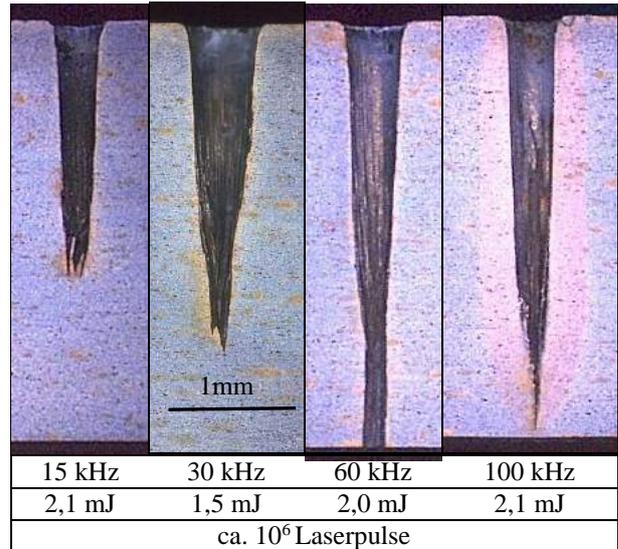


Abbildung 5: Form der erzeugten Mikrobohrungen bei verschiedenen Repetitionsrate. Bei hoher Repetitionsrate von 100 kHz, bildete sich eine Wärmeeinflusszone mit einem Durchmesser von 1 mm aufgrund von Wärmeakkumulation.

Dies zeugt von einer zunehmenden Auswirkung der Wärmeakkumulation. Diese entsteht dann, wenn das Material nicht genügend Zeit hat, zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen auf die Ausgangstemperatur abzukühlen. Die Wärmeakkumulation kann im schlimmsten Fall zur Folge haben, dass beim Eintreffen des nächsten Pulses die Oberfläche des Bohrloches noch flüssig ist. Das kann dazu führen, dass sich die Bohrung am Bohrgrund teilweise wieder schließt, wodurch der in Abbildung 5 deutlich verengte Teil am unteren Ende der Bohrung entstehen kann. Bei den geringeren Repetitionsraten (15 kHz und 30 kHz) hat sich insbesondere in der Nähe des Bohrgrunds ebenfalls eine kleine Wärmeeinflusszone gebildet. Da die Bohrtiefe nicht mehr zunimmt, sorgt die eingebrachte Energie lediglich für eine Aufwärmung des Materials.

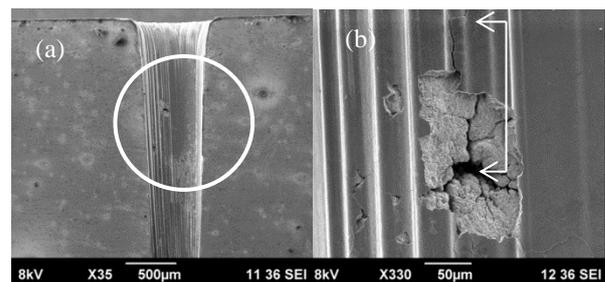


Abbildung 6: Mit einer Pulsenergie von 2,1 mJ und 60 kHz Repetitionsrate hergestellte Mikrobohrungen. Bild (a) zeigt die Übersicht, Bild (b) die Vergrößerung. Die herausgezogenen SLC fungieren als ein Risskeimbildungsort. Der Riss wuchs bis auf eine Länge von 150  $\mu\text{m}$  an (Pfeil).

Obwohl die Bildung der Wärmeeinflusszone bei geringen Repetitionsraten unterdrückt werden konnte, kann das Bestehen von „secondary large carbide“ (SLC) trotzdem als ein Ort für Risskeimbildung fungieren. In Abbildung 6 sind REM Aufnahmen der Bohrung, welche mit 60 kHz erzeugt wurde, abgebildet. Die SLC sind deutlich auf der geschliffenen Oberfläche, sowie an der Wand der Bohrung zu erkennen (weiß eingekreist, vergrößert in Abbildung 6 (b)). Die durch die herausgezogenen SLCs

entstandenen Poren fungierten als Ort der Risskeimbildung und der Riss breitete sich in verschiedenen Richtungen mit Längen bis zu ca. 150 µm aus (Mit Pfeil markiert).

In ein ungehärtetes Umformwerkzeug wurden 132 Mikrobohrungen mit einem Eintrittsdurchmesser von 600 µm und einem Austrittsdurchmesser von 200 µm mit der oben beschriebenen Strategie gebohrt. Da die Bohrungen schräg durch das Umformwerkzeug verlaufen, trifft der Laserstrahl mit einem Winkel von 35° auf die Oberfläche. Der Winkel, mit dem der Laserstrahl auf die gekrümmte Fläche auftritt, beträgt 26°. Die CNC-Maschine positioniert das Werkstück so, dass der Strahl stets auf der Oberfläche fokussiert war. Als Prozessgas wurde Stickstoff verwendet. Abbildung 7 zeigt die lasergebohrten Matrize und Blechhalter.

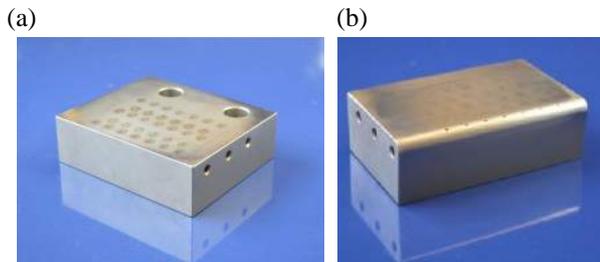


Abbildung 7: (a) Der gebohrte Blechhalter mit den abgewinkelten Mikrolöchern, (b) die gebohrte Matrize mit abgewinkelten Mikrolöchern in der gekrümmten Fläche.

### 2.3 Bohrungen in gehärteten Stahl

Mit den im Abschnitt 2.1 beschriebenen Parametern wurden mehr als 200 Durchgangsbohrungen in gehärteten Werkstücken erzeugt. Es stellte sich im Anschluss jedoch heraus, dass mehr als 80 % der Proben nach 72 h Risse aufwiesen. Einige der gerissenen Proben wurden mikroskopisch auf die Ursachen der Rissausbreitung hin untersucht.

In Abbildung 8 ist ein typisches Rissbild dargestellt. Polieren und ätzen der Proben mit Nital 3% für 35 s offenbart eine Wärmeinflusszone im Bereich der Bohrung von ca. 0.8 mm, wie in Abbildung 8 (a) zu erkennen ist.

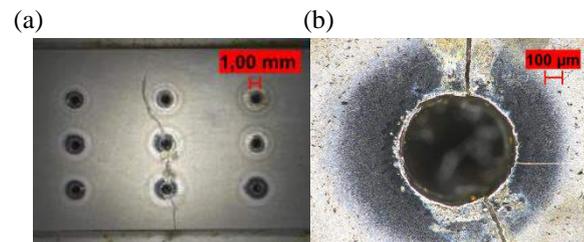


Abbildung 8: (a) Beispiel für eine gerissene Probe, (b) Vergrößerung von (a) zeigt Gefüge der Probe: „primary large carbides“ (PLC) sind durch dunkle Punkte erkennbar.

Der Rissursprung geht von den Bohrungen aus. Über diese Problematik, die bei dem verwendeten Stahl auftritt, wurde bereits in [5] berichtet. In Abbildung 8 (b) ist das Gefüge der Proben dargestellt. Dabei sind zahlreiche dunkle Stellen sichtbar. Aufgrund ihrer Form und Größe (unregelmäßig und mit einem Durchmesser von 20 µm bis 50 µm) handelt es sich hierbei wahrscheinlich um „primary large carbides“ (PLC), wie auch von [6] über das Gefüge von wärmebehandelten Stählen berichtet

wird. Allerdings können diese PLC nicht allein für die Rissausbreitung verantwortlich sein, wie in [7] bereits diskutiert wurde. Betrachtet man die Bruchzähigkeit dieses Stahls von  $20 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$  müsste die kritische Rissgröße, die zu einem Versagen der Proben führt, 110 µm betragen. Daher können die PLC nicht zur Rissausbreitung beitragen. Jedoch fungieren sie als ein Ort der Risskeimbildung. Daraus folgernd muss die geringe Bruchzähigkeit der Matrix für das Versagen verantwortlich sein. Unterstützt wird diese Annahme durch die Tatsache, dass bei der Laserbearbeitung mit denselben Prozessparametern kein Versagen bei den ungehärteten Proben auftrat, obwohl diese ungehärteten Proben dieselbe chemische Zusammensetzung und Karbidverteilung aufweisen.

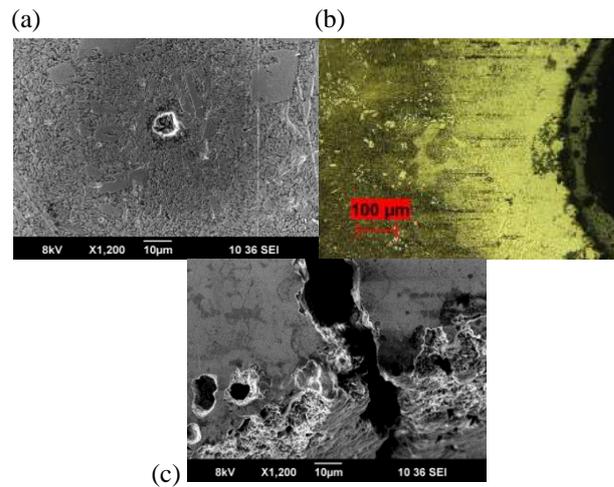


Abbildung 9: Mikro-Ausbrüche, welche um die Bohrwand herum angeordnet sind. Die Mikrobohrungen wurden mit 1,4 mJ Pulsenenergie und 300 kHz Repetitionsrate gebohrt. Der Durchmesser der Ausbrüche, welche durch herausgezogene „secondary large carbides“ (SLC) Partikel entstehen, beträgt ca. 10 µm.

Zusätzlich wurden Mikro-Ausbrüche gemessen, welche sich um die Bohrwand herum bildeten. Diese sind in Abbildung 9 (a)-(c) zu sehen, und haben einen Durchmesser von ungefähr 10 µm. Bei diesen Ausbrüchen handelt es sich vermutlich um Leerstellen, welche durch ein Herauslösen von „secondary large carbide“ (SLC) erzeugt wurden [8]. Die Ausbrüche sind an den Bohrwänden der Mikrolöcher zu finden, welche mit einer hohen Repetitionsrate von über 100 kHz erzeugt wurden. Sie können als potentieller Risskeimbildungsort fungieren. Neben den Metallurgischen Eigenschaften der verwendeten Legierung sind die thermischen Spannungen entscheidend, welche durch Wärmeakkumulation im Bauteil entstehen.

### 2.4 Wärmeakkumulation

Im Folgenden werden Untersuchungen zur Bestimmung der Grenzen, sowie Reduktion der Wärmeakkumulation beschrieben.

Eine der Hauptursachen für die Entstehung einer Wärmeinflusszone beim Laserbohren ist die sogenannte Puls-zu-Puls Wärmeakkumulation. Für jeden einzelnen Laserpuls wird ein Teil der absorbierten Energie für den Abtrag des Materials verwendet. Der Rest verbleibt im nicht abgetragenen Material als Wärme zurück und führt zu einer entsprechenden Temperaturerhöhung. Wenn die

Wärmeableitungsmechanismen (Wärmeleitung oder erzwungene Kühlung) weniger effektiv als die Einbringungsrate ist, führt dies zu einer Temperaturerhöhung im Werkstück [9]. Für gepulsten Energieeintrag und 2-dimensionale Wärmeleitung, wie sie bei einem tiefen Bohrloch angenommen werden darf, kann die Temperaturerhöhung als eine Funktion der Zeit berechnet werden über

$$\Delta T_{\text{Sum},2D}(t) = \frac{Q_{2D}}{\rho \cdot c_p \cdot 4 \cdot \pi \cdot \lambda_{th}} \cdot \sum_{N=1}^{N_p} \frac{\Theta\left(t - \frac{N-1}{f}\right)}{\left(t - \frac{N-1}{f}\right)} \cdot e^{-\frac{1}{4\left(t - \frac{N-1}{f}\right)} \cdot \left(\frac{x^2}{\lambda_{th}} + \frac{y^2}{\lambda_{th}}\right)} \quad (1)$$

Hierbei ist  $Q_{2D}$  der Anteil der absorbierten Energie, der im Material als Wärme zurückbleibt.  $\rho$ ,  $c_p$  und  $\lambda_{th}$  sind die Parameter für Dichte, spezifische Wärmekapazität und Temperaturleitfähigkeit.  $\Theta$  steht für die Heaviside-Funktion und  $N_p$  ist die Anzahl der Laserpulse. Das Ergebnis der Berechnung für die Temperaturerhöhung gerade vor dem Eintreffen des nächsten Pulses und im Koordinatenursprung ist in Abbildung 10 für 300 kHz (a) und 60 kHz (b) dargestellt.

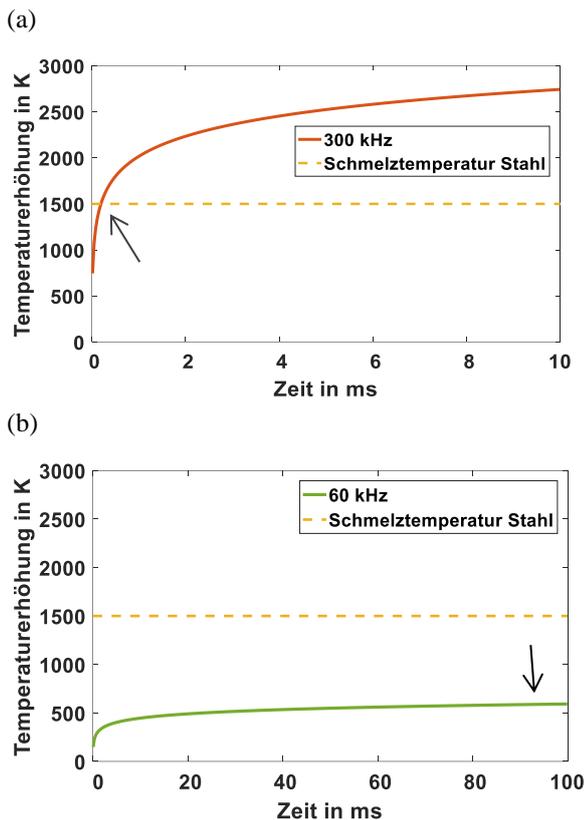


Abbildung 10: Berechnete Temperaturerhöhung durch Wärmeakkumulation als Funktion der Prozesszeit für eine Bohrtiefe von 1 mm bei einer Pulsenergie von 1,3 mJ mit 300 kHz (a) und 60 kHz (b).

Dabei wurde eine absorbierte Wärmemenge von 0,13 mJ bei einer Bohrlöchertiefe von 1 mm angenommen. Bei der Laser-Pulsfrequenz von 300 kHz überschreitet die Temperatur bereits nach 0,5 ms die Schmelztemperatur von Stahl (Pfeil in (a)), wohingegen bei 60 kHz eine Temperatur von 600 K nicht übersteigt.

Die Verwendung einer tiefen Repetitionsrate ist somit wesentlich zur Reduzierung bzw. Vermeidung der Wärmeeinflusszone. Die Experimente bestätigen die Modellrechnungen, wonach die Grenzfrequenz für die verwendeten Bohrparameter bei ca. 60 kHz liegt.

### 3 Untersuchungen zur Auswahl des richtigen Mediums für das Trockenumformen

Als flüchtiges Medium für den neuen Ansatz zur Trockenumformen eignen sich prinzipiell alle Stoffe, die bei Raumtemperatur und Atmosphärendruck in gasförmiger Form vorliegen. Zudem sollten sie ungiftig, nicht brennbar und möglichst kostengünstig zur Verfügung stehen. Neben diesen Grundvoraussetzungen ist jedoch die Schmierwirkung bei der Blechumformung als die wichtigste Eigenschaft zu nennen. In ersten Vorversuchen zeigte sich, dass durch die Verwendung von flüssigem  $\text{CO}_2$  bei einem Druck von 60 bar eine sehr gute Schmierwirkung im ebenen Streifenziehversuch erzielt werden konnte. Auch mit gasförmigem  $\text{N}_2$  konnten sehr niedrige Reibungswerte realisiert werden. [10]

Es wird vermutet, dass diese Reduktion zum einen durch eine Verringerung der real wirkenden Flächenpressung in der Wirkfuge aufgrund des hydrodynamischen Drucks durch das Ausströmen der Medien mit ca. 60 bar hervorgerufen wird. Zum anderen haben  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$  verglichen mit konventionellen Schmierstoffen eine sehr geringe Viskosität, wodurch sich eine niedrige innere Reibung ergibt. Zudem wird bei der Verwendung von  $\text{CO}_2$  davon ausgegangen, dass die Bildung von  $\text{CO}_2$ -Schnee eine reibungsreduzierende Wirkung hat.

Für die Auswahl des optimalen Mediums für das Tiefziehen ohne konventionelle Schmierstoffe ist es nun wichtig zu verstehen, welche physikalischen Wirkprinzipien bei den verschiedenen flüchtigen Stoffen zu einer reduzierten Reibung führen. Zudem soll untersucht werden, wie sich die unterschiedlichen Bohrungsgeometrien auf die Reibungswerte auswirken. Hierzu werden mit den neu entwickelten Ziehbacken (siehe Kapitel 2) Reibungsuntersuchungen für die beiden Medien durchgeführt. Weiter wird die Phasenumwandlung des flüssigen  $\text{CO}_2$  beim Ausströmen aus den Mikrobohrungen in einem neuen Versuchsstand mit optischer Zugänglichkeit genauer untersucht.

#### 3.1 Streifenziehversuche mit gasförmigem Stickstoff als Schmiermedium

Der ebene Streifenziehversuch ist ein Modellversuch, bei dem die Reibungswerte im Flanscbereich beim Tiefziehen untersucht werden können. Ein Werkzeug wird mit einer definierten Flächenpressung auf einen Blechstreifen gepresst, welche mit einer konstanten Geschwindigkeit unter dem Werkzeug durchgezogen wird. Dabei wird die Reibungskraft bei der Gleitreibung ermittelt. Zusammen mit der Normalkraft lässt sich daraus der Reibungswert  $\mu$  ermitteln. Abbildung 11 zeigt eine schematische Darstellung der Streifenziehvorrichtung. Eine genaue Beschreibung des Versuchsaufbaus ist in [11] zu finden.

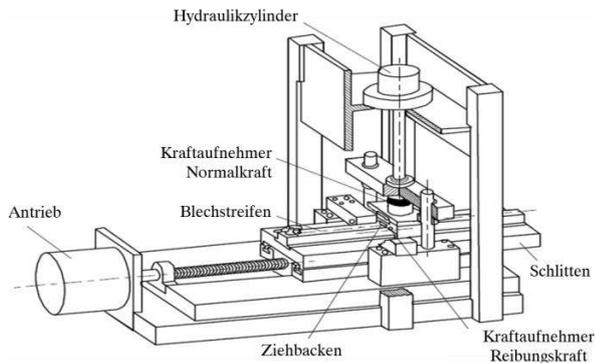


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Streifenziehvorrichtung zur Ermittlung der Reibungszahl

Bei diesem Modellversuch wird die elastische und plastische Verformung des Blechwerkstoffes, welche im realen Tiefziehprozess auftritt, nicht berücksichtigt. Dennoch eignet sich dieser Versuch sehr gut, um vor allem qualitativ den Einfluss von verschiedenen Faktoren gezielt miteinander vergleichen zu können.

Aus diesem Grund wurde mit diesem Versuch der Einfluss der Mikrobohrungen auf die Reibungswerte genauer analysiert. Die in Kapitel 2 vorgestellten 16 unterschiedlichen Werkzeuge kamen hierzu zum Einsatz. Wie beschrieben, variiert dabei die Anzahl der Mikrobohrungen zwischen 3, 7, 9 und 21 je Ziehbacke. Die Durchmesser der Mikrobohrungen betragen 200  $\mu\text{m}$  und 300  $\mu\text{m}$ . Als Düsenart kommen sowohl Konfusoren als auch Diffusoren zum Einsatz. Als flüchtiges Medium wurde in einer ersten Versuchsreihe  $\text{N}_2$  mit einem Druckniveau von 60 bar eingesetzt. Das Druckniveau entspricht der Versuchsreihe mit  $\text{CO}_2$ , bei der das flüssige  $\text{CO}_2$  mit einem Druck von 60 bar aus dem Gasbehälter entnommen wird. Alle Streifenziehversuche wurden mit einem elektrolytisch verzinkten Blechwerkstoff DC05 durchgeführt. Für diese Versuche wurden Flächenpressungen zwischen 5 und 15 MPa gewählt, die Ziehgeschwindigkeit betrug konstant 100 mm/s. Jeder Versuch wurde dreimal wiederholt.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe sind in Abbildung 12 in einem Haupteffektdiagramm zusammengefasst. In blau sind die Ergebnisse mit einer Flächenpressung von 5 MPa dargestellt, in grün die mit 15 MPa. Die Punkte im Diagramm entsprechen den Mittelwerten aller Versuche, die die jeweilige Konfiguration aufweisen. So ergibt sich der Reibungswert von 0,03 für die Düsenart Diffusor bei einer Flächenpressung von 5 MPa aus dem Mittelwert aller Versuche, bei dem ein Diffusor mit dieser Flächenpressung eingesetzt wurde, unabhängig von der Anzahl der Mikrobohrungen und deren Durchmesser.

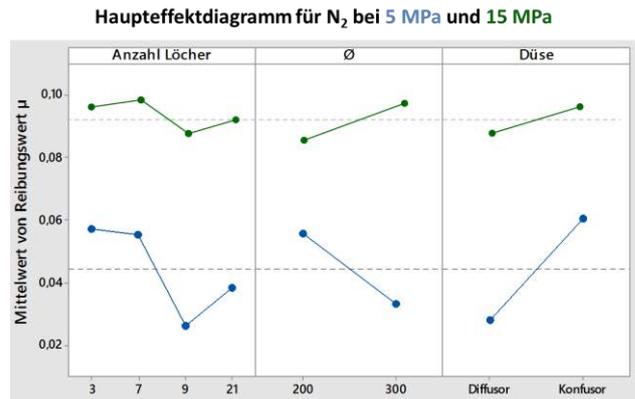


Abbildung 12: Im Streifenziehversuch ermittelte Reibungswerte  $\mu$  bei 5 MPa (blau) und 15 MPa (grün) Flächenpressung und einer Ziehgeschwindigkeit von 100 mm/s mit  $\text{N}_2$  als Schmiermedium. Die Reibungswerte stellen Mittelwerte für die jeweiligen Konfigurationen dar.

Somit lässt sich der Haupteffekt eines Einflussfaktors einfach darstellen. Es zeigt sich, dass die Düsenart Diffusor unabhängig von der Flächenpressung zu niedrigen Reibungswerten führt. Beim Durchmesser der Mikrobohrungen ist eine Wechselwirkung mit der Flächenpressung zu erkennen. Bei niedriger Flächenpressung scheint ein Durchmesser von 300  $\mu\text{m}$  von Vorteil, bei großer Flächenpressung ein Durchmesser von 200  $\mu\text{m}$ . Interessant erscheint, dass bei einer Flächenpressung von 15 MPa die Anzahl der Bohrungen nicht bedeutend ist. Im Gegensatz dazu sinken bei einer Flächenpressung von 5 MPa die Reibungswerte vor allem bei 9 Mikrobohrungen sehr stark. Bei 21 Bohrungen nehmen sie wieder etwas zu. Dies könnte unter anderem am Druckabfall des Gases liegen, der durch die große Austrittsöffnung entsteht. Druckmessungen zeigen, dass der Druck bei 21 Bohrungen je Ziehbacke deutlich unterhalb 60 bar fällt. Somit ist bei der Auslegung eines Tiefziehwerkzeugs darauf zu achten, dass die Größe der Zuführkanäle im Werkzeug auf die Anzahl der Mikrobohrungen ausgelegt ist, um einen zu starken Druckabfall zu vermeiden.

Insgesamt zeigen die Versuche, dass mit reinem Stickstoff als Schmiermedium sehr niedrige Reibungswerte erzielt werden können. Dafür ist die Düsenform Diffusor zu bevorzugen. Da die Anordnung mit 3x3 Mikrobohrungen deutlich bessere Ergebnisse liefert als jene mit 1x7, ist auf eine flächige Anordnung der Bohrungen zu achten. Als nächster Schritt werden weitere Versuche mit einem höheren Druckniveau des  $\text{N}_2$  durchgeführt.

### 3.2 Streifenziehversuche mit flüssigem Kohlendioxid als Schmiermedium

Um die Schmierwirkung von  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$  direkt miteinander vergleichen zu können, wurden die beiden Versuchsreihen mit identischen Versuchsbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Reibungsuntersuchungen mit flüssigem  $\text{CO}_2$  sind in Abbildung 13 zusammengefasst.

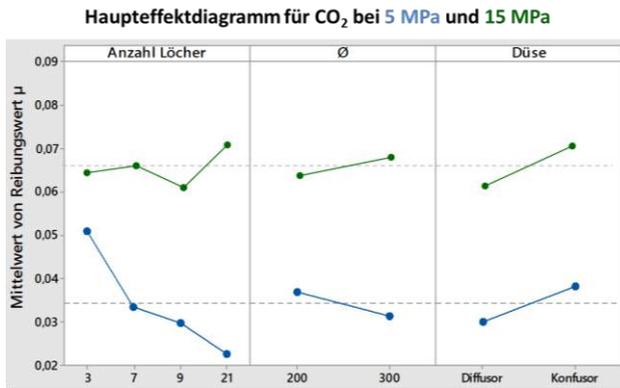


Abbildung 13: Im Streifenziehversuch ermittelte Reibungswerte  $\mu$  bei 5 MPa (blau) und 15 MPa (grün) Flächenpressung und einer Ziehgeschwindigkeit von 100 mm/s mit CO<sub>2</sub> als Schmiermedium. Die Reibungswerte stellen Mittelwerte für die jeweiligen Konfigurationen dar.

Die Auswirkungen der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Reibungswerte sind prinzipiell sehr ähnlich zu den Ergebnissen mit N<sub>2</sub>. Der Diffusor liefert niedrigere Reibungswerte als der Konfusor. Auch der Einfluss der Düsendurchmesser in Abhängigkeit der Flächenpressung ist sehr ähnlich. Jedoch sind die Reibungswerte nochmals deutlich geringer als bei der Verwendung von N<sub>2</sub>. Bei einer Flächenpressung von 15 MPa wird ein Reibungsmittelwert für alle Versuche von 0,067 (dargestellt durch die grau gestrichelte Linie im Diagramm) im Vergleich zu 0,092 bei N<sub>2</sub> erzielt. Bei 5 MPa Flächenpressung beträgt der Mittelwert sogar nur 0,035 (bei N<sub>2</sub> 0,045). Auffällig bei der Verwendung von CO<sub>2</sub> ist, dass bei niedriger Flächenpressung mit zunehmender Lochanzahl die Reibungswerte reduziert werden. Bei der Versuchsdurchführung entstand die Vermutung, dass dies unter anderem mit einer verstärkten Trockeneisbildung bei diesen Versuchsbedingungen zusammenhängen könnte. Um diese Annahme untersuchen zu können und das Reibungsverhalten generell bei der Verwendung von CO<sub>2</sub> besser zu verstehen, ist es notwendig, das Ausbreitungsverhalten des CO<sub>2</sub>-Stroms in der Wirkfuge zu kennen. Mit der bisher bestehenden Anlage ist dieser Erkenntnisgewinn jedoch nicht möglich.

### 3.3 Versuchstand mit optischer Zugänglichkeit zur Wirkfuge

Ein Ziel der gemeinsamen Forschungsarbeiten des IFU und IGVP war es daher, eine Streifenziehmaschine zu entwickeln, bei der eine optische Zugänglichkeit in die Wirkfuge hergestellt werden kann. Es sollte somit mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera möglich sein, das Ausströmverhalten des flüssigen CO<sub>2</sub> beim Austritt aus den lasergebohrten Mikrobohrungen sichtbar zu machen. Die Besonderheit der neuen Anlage besteht darin, dass der Blechstreifen durch ein 20 mm dickes Borosilikatglas ersetzt wurde.

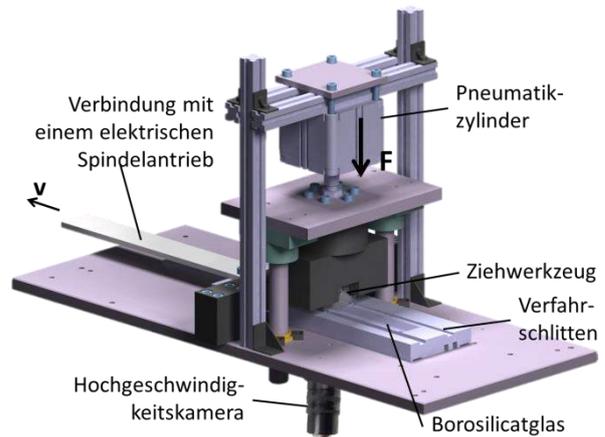
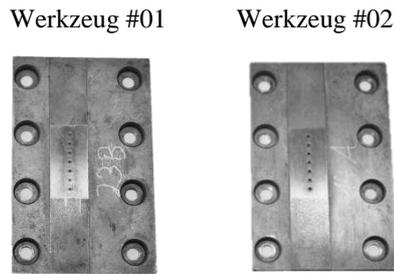


Abbildung 14: Gesamtansicht des neu konstruierten Streifenziehversuchsstandes mit optischer Zugänglichkeit.

Die bereits bestehende Auslegung für die Zuführung des flüssigen CO<sub>2</sub> wurde von der bestehenden Anlage übernommen. Zum Einsatz kommt hier eine CO<sub>2</sub>-Gasflasche mit Steigrohr. In der Gasflasche herrscht ein Druck von 57 bar, wobei sich die flüssige Phase auf Grund der größeren Dichte sich unter der gasförmigen Phase befindet. Durch das Steigrohr wird flüssiges CO<sub>2</sub> direkt bis unter das Mikroloch gefördert. Beim freien Ausströmen erfolgt am Lochaustritt der Mikrobohrungen eine Expansion des flüssigen CO<sub>2</sub> auf Atmosphärendruck ( $T = 293,15 \text{ K}$ ;  $p = 1013 \text{ mbar}$ ), es bildet sich das sogenannte Trockeneis. Anschließend sublimiert das Trockeneis sofort in die Gasphase. Die Expansion erfolgt dabei adiabatisch, es kommt zu einer Temperaturänderung. Dieser Vorgang ist als Joule-Thomson-Effekt bekannt und beschreibt die infinitesimalen Änderungen von Druck und Temperatur. Diesen Veränderungen liegen maßgeblich die van-der-Waals-Kräfte (Bindungsenergien zwischen Atomen bzw. Molekülen) zu Grunde. Da diese Kräfte stoffspezifisch sind, ergibt sich ein stoffspezifischer Joule-Thomson-Koeffizient. Für CO<sub>2</sub> liegt dieser bei 1,1 bis 1,6 K/bar [12]. Wird das CO<sub>2</sub> am Düsenaustritt frei auf Atmosphärendruck expandiert, so kühlt sich das CO<sub>2</sub> auf  $-78,5^\circ\text{C}$  ab und es bildet sich weißes Trockeneis. Die Ausbreitung des Trockeneises in der Wirkfuge wird mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet und ausgewertet.

Als Werkzeug in der neuen Streifenziehmaschine kommen die in Kapitel 2 vorgestellten Ziehbacken zum Einsatz. Zunächst wurden zwei verschiedene Paare von Ziehbacken im neuen Streifenziehversuchsstand untersucht (siehe Tabelle 3). Die lasergebohrten Mikrolöcher in den Werkzeugen wurden am IFSW mit dem Lasersystem TruMicro5050 hergestellt. Das Verfahren zum Herstellen der Bohrungen ist im Kapitel 2.1 beschrieben. Technisch bedingt verlaufen die Bohrungen konisch durch das Werkzeug. Dadurch können prinzipiell zwei Düsenarten in das Werkzeug gebohrt werden. Beim Werkzeug #01 handelt es sich um einen sogenannten Konfusor. Die Löcher im Werkzeug #02 werden als Diffusor durchströmt.

Tabelle 3: Übersicht der verwendeten Ziehbacken mit unterschiedlichen Lochgeometrien.



Düsenart	Konfusor	Diffusor
Eintrittsdurchmesser	600 µm	200 µm
Austrittsdurchmesser	200 µm	600 µm
Lochanzahl	7x1	7x1

Bei einem Diffusor gibt es eine allmähliche Querschnittserweiterung (von 200 µm auf 600 µm) in Strömungsrichtung. Nach dem Gesetz für die Massenerhaltung

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} = \rho * v * A \quad (2)$$

und

$$\Delta M_{1,2} = \rho * \Delta V_{1,2} = \text{const.} \quad (3)$$

verringert sich dabei die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  und somit die kinetische Energie. Diese Energie wird in Druck umgewandelt. Bei einem verlustfreien Diffusor ohne Rohrreibungsverluste ist der Druck am Bohraustritt größer als beim Eintritt. Beim Konfusor hingegen kommt es in Strömungsrichtung zu einer Verringerung des Strömungsquerschnitts (von 600 µm auf 200 µm), das Fluid wird beschleunigt bei abfallenden Drücken.

Der optische Streifenziehversuch soll Aufschluss darüber geben, welche Kombination aus Düsenart und Durchmesser der Mikrobohrungen genügend Trockeneis bildet, um den Reibungswert in der Blechumformung ausreichend zu verändern. Die Auswertung mittels der Hochgeschwindigkeitskamera beschränkt sich lediglich auf die Unterscheidung zwischen Diffusor und Konfusor, sowie der Flächenpressung (5 und 15 MPa). Die Anzahl der Mikrobohrungen in der Wirkfläche ist mit 7 x 1 immer konstant.

Wie in Kapitel 3.2 vermutet wird, soll ein höherer Anteil an Trockeneis die Reibungswerte im Streifenziehversuch weiter reduzieren können. Das an den Düsenöffnungen produzierte Trockeneis erscheint in den Kameraaufnahmen weiß. Es wurden dazu die aufgenommenen Schwarz-Weiß-Bilder der Hochgeschwindigkeitskamera mit der Software ImageJ nach dem Weißanteil pro definierter Fläche ausgewertet. Für die Auswertung wurden lediglich Bilder während der Verfahzeit von etwa 1,2 Sekunden verwendet.

Generell generiert jede der untersuchten Düsenformen und Lochanzahlen eine spezifische Menge an Trockeneis. Ein Diffusor bildet dabei mehr CO<sub>2</sub>-Schnee unabhängig von den untersuchten Flächenpressungen als ein Konfusor. Je höher die Flächenpressung ist, desto weniger CO<sub>2</sub>-Schnee kann sich bilden.

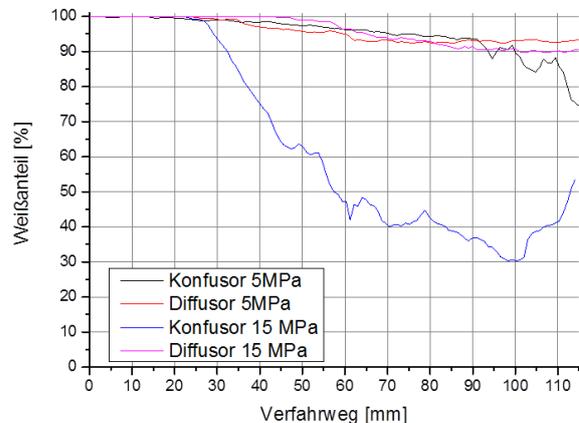


Abbildung 15: Darstellung des Weißanteils über die gesamte Wirkfläche von 10 x 20 mm in Abhängigkeit des Verfahwegs von insgesamt 115 mm, Verfahrgeschwindigkeit: ca. 100 mm/s.

Vor der Bewegung (siehe  $x=0$  in Abbildung 16) sammelt sich das ausströmende Trockeneis abhängig von der Flächenpressung und der Düsenform an den Rändern der Wirkfläche. Damit steht es nicht mehr als Schmiermittel für den Ziehprozess zur Verfügung. Eine Ausnahme bildet der gesammelte CO<sub>2</sub>-Schnee am unteren Rand, da dieses Trockeneis während der Bewegung wieder in die Wirkfläche gezogen wird. Deutlich sichtbar ist, dass sobald die Bewegung beginnt, der Weißanteil pro Fläche teilweise drastisch absinkt (siehe Abbildung 16).

Verfahrweg  $x$  in mm ( $v = 100$  mm/s)

$x = 0$     $x = 5$     $x = 10$     $x = 15$     $x = 57,5$     $x = 115$

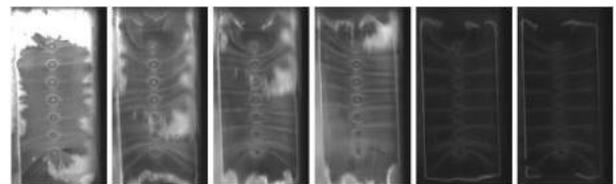


Abbildung 16: Weißanteil in der Wirkfläche während der Bewegung für einen Konfusor bei 15 MPa Flächenpressung.

Ein Grund dafür ist die entstehende Reibungswärme, welche bewirkt, dass sich weniger CO<sub>2</sub>-Schnee bildet. Das Kamerabild erscheint dadurch dunkler. Das Verhältnis zwischen der festen und gasförmigen Phase verschiebt sich in Richtung der gasförmigen Phase. Aus dem p-T-Diagramm [13] für CO<sub>2</sub> ist ersichtlich, dass festes CO<sub>2</sub> durch Erwärmung direkt in die Gasphase sublimiert und nicht das flüssige Phasegebiet durchläuft.

Neben der optischen Auswertung wurden für die in Tabelle 3 beschriebenen Werkzeuge die Reibungszahlen ermittelt. Es soll möglichst eine Korrelation zwischen dem Weißanteil in der Wirkfläche und der Reibungszahl hergestellt werden können.

Es ergibt sich eine starke Abhängigkeit zwischen Reibungswert und Flächenpressung. Bei niedriger Flächenpressung ist die Reibungszahl entsprechend gering.

Jedoch fällt der Unterschied zwischen den Düsenarten bei konstanter Flächenpressung nicht so stark aus. Ein Grund liegt darin, dass durch Rostbildung bei der Lagerung sowie durch Schmutzpartikel einzelne Mikrolöcher verstopft wurden. In Folge dessen wurden während der Versuche mit der Streifenziehmaschine nicht mehr alle Löcher durchströmt. Somit ergibt sich eine Verfälschung der ermittelten Reibungswerte. Generell lässt sich sagen, dass eine Verstopfung der Bohrungen eher bei der Düsenart Konfusor als bei der des Diffusors auftreten. Bei Untersuchungen mit einem Lochdurchmesser von mindestens 300  $\mu\text{m}$  traten diese unerwünschten Nebeneffekte bisher nicht auf.

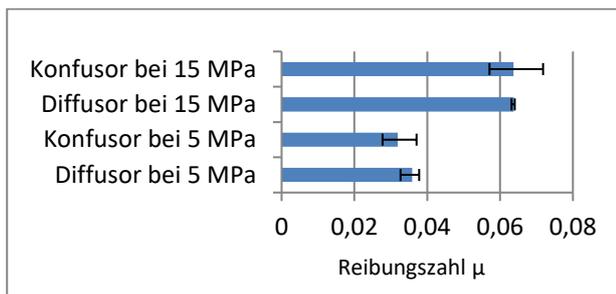


Abbildung 17: Reibungszahl im Streifenziehversuch für unterschiedliche Flächenpressungen und Düsenarten.

Der neue Versuchstand mit optischer Zugänglichkeit eignet sich besonders, um die detaillierten Strömungsverhältnisse in der Wirkfuge erstmal sichtbar zu machen. Es konnte gezeigt werden, welche Phasenumwandlungen während der Bewegung in einem ebenen Streifenziehversuch stattfinden und dass sich Diffusoren als Zuführkanäle in einem Umformwerkzeug prinzipiell besser eignen als Konfusoren. Der Grund dafür liegt in der Menge des Trockeneises. Damit verbunden ist eine Senkung der Reibungszahl. In weiteren Versuchen soll durch die Optimierung der Bohrungsanordnung ein gleichmäßiges Ausströmmuster in der Wirkfuge erreicht werden.

#### 4 Tiefziehen eines U-Profiles mit flüchtigen Medien als Schmierstoffersatz

Für die erstmalige Umsetzung des neuen Ansatzes zur Trockenumformung in einem Tiefziehwerkzeug wurde mit dem U-Profil zunächst eine sehr einfache Geometrie gewählt. Die Herausforderung besteht in der Auslegung der Ventile, der Ventilsteuerung und der Zuführungskanäle für das Medium bei einem Druck von 60 bar sowie das Laserbohren der Mikrolöcher.

In Abbildung 18 ist eine schematische Schnittdarstellung der Werkzeugaktivteile zu sehen. Das Werkzeug besteht aus je zwei Blechhaltern und Matrizen, die jeweils mit drei Zuführungskanälen für  $\text{CO}_2$  bzw.  $\text{N}_2$  ausgestattet sind. Über Mikrobohrungen wird das flüchtige Medium dann in die Wirkfuge zwischen Blechhalter und Blech sowie zwischen Matrize und Blech eingebracht. Der Durchfluss in jedem Zuführungschanal kann dabei mit einem Ventil gesteuert werden. Da die Relativbewegung zwischen Stempel und Blechwerkstoff sehr gering ist, erfolgt in der derzeitigen Ausbaustufe des Werkzeugs keine Schmierung an dieser Stelle.

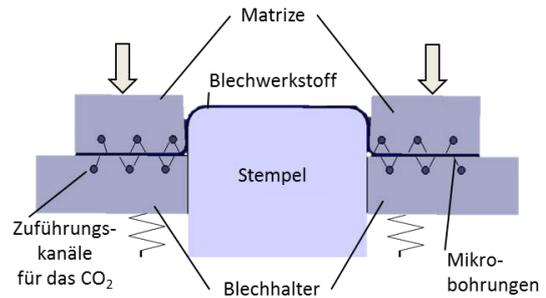


Abbildung 18: Schematische Schnittdarstellung der Werkzeugaktivteile für das Ziehen eines U-Profiles mit flüchtigen Medien als Schmierstoffersatz.

In Abbildung 19 ist der Blechhalter nochmals vergrößert dargestellt. Der Blechhalter wird über zwei Schrauben am Werkzeugunterteil befestigt. Die Zuführungskanäle haben einen Durchmesser von 4 mm und einen Abstand von 5 mm von der Oberfläche. Für das Laserbohren sollte der Abstand von der Oberfläche möglichst gering sein, für die Festigkeit des Werkzeugs und zur Vermeidung von elastischer Deformation möglichst groß. Somit stellt dieser Wert einen Kompromiss zwischen Herstellbarkeit und Festigkeit des Werkzeugs dar. Belastungssimulationen mit der Software Ansys zeigen, dass bei dieser Geometrie keine Beeinträchtigung der Festigkeit bzw. durch Deformation aufgrund der hohen Belastungen während des Umformvorgangs zu erwarten sind. Auch die Anzahl der Zuführungschanäle stellt einen Kompromiss dar. Um bei fortschreitendem Blecheinzug offene Mikrobohrungen abschalten zu können, sollten möglichst viele Kanäle vorhanden sein. In Bezug auf den Aufwand und den Platzbedarf für die Anbringung der Ventile, die Ventilsteuerung sowie die Festigkeit des Werkzeugs sollten es dagegen möglichst wenig Kanäle sein. Ausgehend von diesen Überlegungen und den Erfahrungen aus den Voruntersuchungen wurden die Anzahl der Kanäle auf 3 festgelegt. Der Abstand zwischen den Kanälen beträgt 20 mm. Am vorderen und hinteren Ende sind die Kanäle mit einem Gewinde versehen, so dass sie auf der einen Seite mit einem Verschlussstopfen verschlossen werden können. Auf der anderen Seite dient das Gewinde zur Anbringung der Zuführungsleitung zu den Ventilen. Basierend auf den Ergebnissen aus den Streifenziehversuchen wurde als Düsenart ein Diffusor gewählt mit einem Durchmesser von 200  $\mu\text{m}$  am Übergang zum Zuführungschanal und 600  $\mu\text{m}$  auf der Austrittsseite zum Blech. Weiter wurde für den Abstand zwischen den Mikrobohrungen mit 10 mm ein hoher Wert gewählt. Bei den Werkzeugen für die Streifenziehversuche betrug dieser Abstand maximal 7,5 mm. Die Ergebnisse der Untersuchungen mit optischer Zugänglichkeit zur Wirkfuge zeigen, dass eine versetzte Anordnung der Reihen sinnvoll ist, da so das Abströmverhalten aus den Mikrobohrungen verbessert wird. Somit ergibt sich pro Blechhalter eine Anzahl von 33 Mikrobohrungen. Bei der gewählten Blechbreite von 70 mm und einer Auflagefläche des Bleches auf der Blechhalterseite von 35  $\text{cm}^2$  erhält man durchschnittlich 0,94 Mikrobohrungen pro  $\text{cm}^2$ .

(a)

(b)

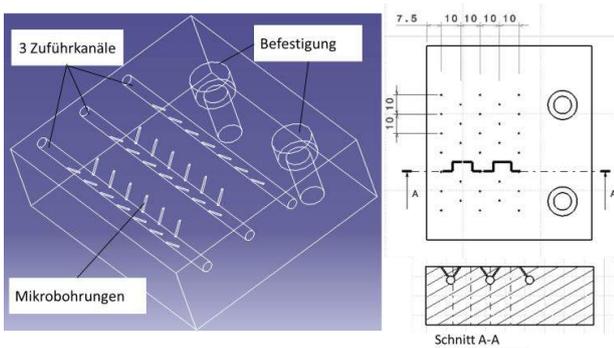


Abbildung 19: (a) Drahtgittermodell des Blechhalters, (b) Anordnung der 33 Mikrobohrungen auf der Oberfläche des Blechhalters.

In Abbildung 20 ist die Matrize sowie die Anordnung der Mikrobohrungen darauf dargestellt. Wie bei der Konstruktion des Blechhalters sind auch hier drei Zuführkanäle in das Werkzeug eingebracht, welche die 33 Mikrobohrungen mit CO<sub>2</sub> versorgen. Die Mikrobohrungen auf der ebenen Fläche haben auch hier einen Abstand von 10 mm zueinander. Eine Reihe von Mikrobohrungen befindet sich im Bereich des Radius bei 15°. Diese Anordnung von nur einer Reihe im Radius wurde gewählt, um an dieser Stelle nur kurz bei Beginn des Tiefziehprozesses ein freies Ausströmen des Mediums zu gewährleisten. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass das Medium durch das Blech weiter in den Radius gezogen wird. Die Matrize wird über zwei Passstifte und zwei Schrauben am Werkzeugoberteil befestigt. Unterhalb des Radius befindet sich eine Bohrung zur Anbringung einer Temperaturmessung im Werkzeug.

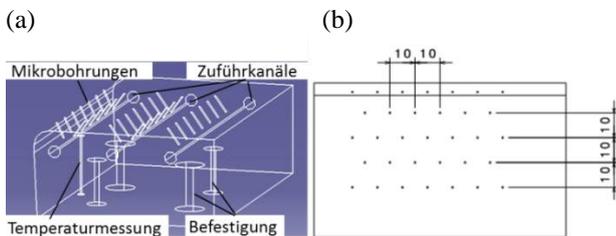


Abbildung 20: (a) Drahtgittermodell der Matrize, (b) Anordnung der 33 Mikrobohrungen auf der Oberfläche der Matrize.

Wie in Abbildung 21 dargestellt, ist jeder einzelne Zuführkanal über einen flexiblen Leitungsschlauch mit einem Ventil verbunden, welches an einem Verteilerblock verschraubt ist. Der Verteilerblock ist wiederum mit der CO<sub>2</sub>-Gasflasche verbunden. Die insgesamt 12 Ventile werden über eine selbst entwickelte Ventilsteuerung gesteuert. Mit der Messsoftware Catman von HBM können die einzelnen Ventile individuell zu- und abgeschaltet werden. Als Steuergröße wird der Wegverlauf des Pressenstößels verwendet. Kurz vor Beginn des Aufsetzens des Stempels auf den Blechwerkstoff werden alle Ventile geöffnet. Im Folgenden werden mit zunehmenden Blecheinzug die Ventile nacheinander von außen nach innen abgeschaltet, um ein freies Ausströmen des CO<sub>2</sub> zu verhindern. Durch Einbau eines Sensors zur Messung des Platineinlaufs, kann mit der Ventilsteuerung auch der Einzug als Steuergröße verwendet werden. Zudem bietet der in Abbildung 22 gezeigte Aufbau die Möglichkeit, zukünftig eine Regelung der Ventile, z.B. über den Plati-

neneinlauf als Regelgröße, umzusetzen und so die Reibung während des Tiefziehprozesses lokal anzupassen. Mit der Druckmessung zur Überprüfung des Druckabfalls im System und einem Durchflussmessgerät zur Bestimmung des CO<sub>2</sub>-Verbrauchs sowie eines Dehnmessstreifen zur Messung der Stempelkraft sind weitere Sensoren in der Versuchseinrichtung im Einsatz.

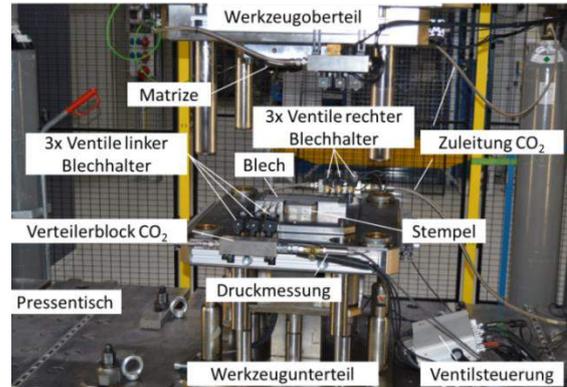


Abbildung 21: In einer Servopresse eingebautes Werkzeug zum Tiefziehen eines U-Profiles mit CO<sub>2</sub> als Schmierstoffersatz.

Das Werkzeug wurde auf einer Servopresse der Firma Aida mit einer maximalen Presskraft von 6300 kN eingesetzt. Die ersten Versuche wurden trocken, mit dem mineralölbasierten Referenzschmierstoff Wisura ZO3368 und mit CO<sub>2</sub>-Schmierung mit einer Geschwindigkeit von 5 Hub/min und einer Blechhalterkraft von 50 kN durchgeführt. Als Blechstreifen, welcher eine Länge von 225 mm und Breite von 70 mm aufwies, wurde der gleiche elektrolytisch verzinkte Blechwerkstoff DC05 wie in den Streifenziehversuchen eingesetzt.

Bei dem ersten Test des neuen Werkzeuges konnte ohne Schmierung kein U-Profil gezogen werden (siehe Abbildung 22 (a)). Auf der einen Seite wurde das Blech geklemmt und der Einzug geschah nur einseitig. Auch der Versuch, die Ausgangslage des Blechs um mehrere Millimeter zu verändern und somit die Flächenpressung auf der geklemmten Seite zu reduzieren war nicht erfolgreich. Selbst bei Verwendung des Referenzschmierstoffes mit einer Menge von 1,5 und 3 g/m<sup>2</sup> stellte sich kein zufriedenstellendes Ergebnis ein. Mithilfe von Tuschiefarbe wurde daher die Auflagefläche des Werkzeugs auf der Platine und die damit verbundene lokale Verteilung der Flächenpressung im Werkzeug bestimmt. Es zeigte sich eine ungleichmäßige Verteilung, welche zu dem Klemmen des Blechwerkstoffes führte. Normalerweise wird daher das Druckbild im Bereich der Blechhaltung solange homogenisiert, bis ein korrekter Einlaufweg der Platine zu Gutteilen führt. Vor dieser Einarbeitung wurde jedoch zunächst die Anwendung des neuen Tribosystems mit CO<sub>2</sub> als temporär wirkendes Schmiermedium erprobt. Bereits bei der ersten Anwendung konnte ein U-Profil gezogen werden (siehe Abbildung 22 (b)).





Abbildung 22: (a) Trocken und mit (b) CO<sub>2</sub>-Schmierung gezogenes U-Profil.

Dieses Ergebnis bestätigt somit die im Streifenziehversuch ermittelten, niedrigen Reibungswerte bei der Verwendung von CO<sub>2</sub> als Schmiermedium. Selbst bei einem nicht eingearbeiteten Werkzeug mit ungleichmäßigen Kontaktzuständen werden damit gute Ergebnisse erzielt. Dies bestätigt die hervorragenden Möglichkeiten des neuen Ansatzes, wodurch nicht nur eine gleichwertige Substitution von mineralölbasierten Schmierstoffen möglich scheint, sondern sogar eine Verbesserung des tribologischen Systems in der Blechumformung. Mit diesen Versuchen zur Umsetzung des neuen Tribosystems in einem Tiefziehwerkzeug wird somit, nach Aufzeigen der prinzipiellen Wirkungsweise in der ersten Förderperiode, das nächste Teilziel zur Realisierung des Trockenumformens erreicht.

## Ausblick

In den nächsten Monaten werden am IFU umfangreiche Untersuchungen mit dem in Abbildung 22 gezeigten Tiefziehwerkzeug durchgeführt. Nach dem Einarbeiten des Werkzeugs werden die verschiedenen Tribosysteme bei unterschiedlichen Prozessbedingungen genauer miteinander verglichen. Weiter wird die Ventilsteuerung optimiert und Versuche mit Stickstoff durchgeführt. Die Erfahrungen aus den Versuchen mit der einfachen Werkzeuggeometrie fließen dann direkt in die Auslegung des Werkzeugs zur Herstellung eines Rechtecknapfes. Eine besondere Herausforderung liegt hierbei in dem Einbringen der Laserbohrungen in die Radien im Eckbereich des Tiefziehwerkzeugs. Zudem wird am IFSW weiter untersucht, mit welchen Bohrstrategien und Prozessparametern rissfrei in gehärtetem Werkzeugstahl gebohrt werden kann. Am IGVP werden mittels COMSOL Simulationen zum Durchströmen der lasergebohrten Mikrolöcher mit flüchtigen Medien durchgeführt. Ziel soll es sein, die Entwicklung des Drucks und der Temperatur des Fluids während der Durchströmung und nach dem Austritt aus dem Mikroloch vorherzusagen. Im Mittelpunkt steht dabei der Phasenübergang des Kohlendioxid von der flüssigen zur gasförmigen bzw. festen Phase während der Expansion im Austrittsbereich der Bohrung. Dadurch soll eine optimale Anordnung der Mikrobohrungen hinsichtlich Verteilung und Lochdurchmesser gefunden

werden. Zudem werden Untersuchungen zur Temperaturentwicklung beim Ausströmen von Kohlendioxid aus einem Mikroloch in den nächsten Wochen am IGVP im Druckreaktor durchgeführt. Diese Messungen sollen neben den Simulationen Aufschluss über den tatsächlichen Temperaturverlauf auf der Materialoberfläche und im Material geben. Somit soll eine Kaltversprödung des Materials durch den Einsatz von flüssigen CO<sub>2</sub> als Schmiermittel gänzlich ausgeschlossen werden.

## 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] F. Vollertsen, F. Schmidt: Dry Metal Forming: Definition, Chances and Challenges. Int. J. Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology 1/1 (2014) 59-62.
- [2] M. Singer, M. Liewald, Evaluation of different influencing factors in dry sheet metal forming with vaporizing CO<sub>2</sub> used as lubricant, in: Applied Mechanics and Materials, Vol. 794 (2015), pp. 53-58.
- [3] J. P. Negel et al., "1.1 kW average output power from a thin-disk multipass amplifier for ultrashort laser pulses," Optics Letters, vol. 38, no. 24, pp. 5442-5445, Dec 2013.
- [4] B. Neuenschwander, B. Jaeggi, M. Schmid, and G. Hennig, "Surface structuring with ultra-short laser pulses: Basics, limitations and needs for high throughput," Physics Procedia, vol. 56, pp. 1047-1058, 2014.
- [5] H. H. Menke, "Service Failure of a Die Insert Made From AISI D2 Tool Steel," in Handbook of Case Histories in Failure Analysis, vol. 1, K. A. Esakul, Ed.: ASM International, 1992.
- [6] M. Yaso, S. Hayashi, S. Morito, T. Ohba, K. Kubota, and K. Murakami, "Characteristics of Retained Austenite in Quenched High C-High Cr Alloy Steels," Materials Transactions, vol. 50, no. 2, pp. 275-279, Feb 2009.
- [7] P. Muro, S. Gimenez, and I. Iturriza, "Sintering behaviour and fracture toughness characterization of D2 matrix tool steel, comparison with wrought and PM D2," Scripta Materialia, vol. 46, no. 5, pp. 369-373, Mar 11 2002, Art. no. Pii s1359-6462(01)01253-2.
- [8] E. Hong, B. Kaplin, T. You, M.-s. Suh, Y.-S. Kim, and H. Choe, "Tribological properties of copper alloy-based composites reinforced with tungsten carbide particles," Wear, vol. 270, no. 9-10, pp. 591-597, Apr 4 2011.
- [9] R. Weber, T. G. P. Berger, V. Onuseit, M. Wiedenmann, C. Freitag, and A. Feuer, "Heat accumulation during pulsed laser materials processing," Optics Express, vol. 22, no. 9, pp. 11312-11324, May 5 2014.
- [10] C. Woerz, M. Liewald, M. Singer: Investigation of Tribological Conditions in the Strip Drawing Test Using Liquid CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> as a Volatile Lubricant, "Proceed. of 7th ICTMP, ISBN: 978-616-92565-0-2, pp.140-148, (2016).
- [11] M. Singer, M. Liewald, A. Feuer: Development of a new ecological lubrication system for sheet metal forming based on CO<sub>2</sub> in liquid, in: Key Engineering Materials, Vol 651-653 (2015), pp. 480-485.
- [12] Atkins, Peter W, „Physikalische Chemie“, ISBN: 978-3527332472 (2004).
- [13] ChemicalLogic Corporation, <http://www.chemicallogic.com/Pages/default.aspx> (2015).