

Prozessgasführung mit verschiedenen Düsengeometrien am Laserschneidkopf für das Trennen von Mehrlagenstrukturen im Zuge von Rettungseinsätzen

Process gas guidance using various nozzle geometries with the laser cutting head for the cutting of multi-layer structures during rescue operations

Jürgen Walter, Johannes Böttcher, Christian Hennigs, Alexander Brodeßer, Michael Hustedt, Jörg Hermsdorf, Stefan Kaierle

Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, 30419 Hannover, Deutschland

Schlagworte: Laserschneiden, Schneiddüse, Mehrlagenstrukturen, Prozessgas, Rettung

Key words: laser cutting, cutting nozzle, multi-layer structures, process gas, rescue

Zusammenfassung

Bei einem schweren Unfall können schwerverletzte Personen im Unfallfahrzeug eingeschlossen werden. Sie müssen schnell gerettet werden, um ihre Überlebenschancen zu steigern. Typischerweise müssen dafür Bauteile, die hochfeste Stähle oder faserverstärkte Kunststoffe enthalten, durchtrennt werden. Dabei können mechanische Rettungsgeräte wie hydraulische Scheren an ihre Leistungsgrenzen gelangen. Um diese Rettungsgeräte zu ergänzen, wurde ein mobiles Laserschneidgerät für Rettungseinsätze entwickelt, das für die Rettungskräfte ein hohes Maß an Robustheit, eine leichte Handhabbarkeit und ein geringes Gewicht bietet.

Im Gegensatz zu typischen industriellen Laserschneidprozessen müssen im Zuge von Rettungseinsätzen häufig Mehrlagensysteme getrennt werden, welche auch Hohlräume enthalten können. Zudem kann der Abstand zwischen der Schneiddüse und dem Werkstück im Verlauf des Schneidprozesses bei einer solchen Rettungsmaßnahme erheblich variieren. Das für das Austreiben der Schmelze aus den Schnittfugen erforderliche Prozessgas muss diese Distanzen überwinden. Dies erfordert ein angepasstes Strömungskonzept für die Prozessgasführung, welches durch die Nutzung geeigneter Düsengeometrien realisiert werden soll. In dieser Arbeit werden experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Düsengeometrie auf das Schneidergebnis beim Laserschneiden von Mehrlagenstrukturen mit Hohlräumen diskutiert.

Einleitung

Ein alternatives Trennverfahren an verunfallten Fahrzeugen im Zuge von Rettungseinsätzen (Abb. 1) stellt das Laserschneiden dar, das allgemein mit einer großen Flexibilität bei der Konturgestaltung, einer guten Reproduzierbarkeit sowie einer im Prinzip kraftfreien Energieeinkommung verbunden ist. Dieses Verfahren ist für die unterschiedlichsten Werkstoffe geeignet, da es auf der Absorption der einfallenden Laserstrahlungsenergie und der damit verbundenen Umwandlung in Wärmeenergie beruht. Dabei ist es weitgehend unabhängig von der Materialfestigkeit, die bei den modernen zum Einsatz kommenden Werkstoffvarianten > 1.000 MPa sein kann. Durch eine kompakte Bauweise des Lasers und die Verwendung einer flexiblen Lichtleitfaser kann ein hohes Maß an Mobilität hergestellt werden (vgl. Bliedtner et al. 2013).



Abb. 1: Rettungseinsatz bei einem Unfallszenario im Straßenverkehr (Foto: Feuerwehr Dortmund).

In vorangegangenen Versuchen (Hennigs et al. 2018, Brodesser et al. 2018) wurden mit einem Versuchsträger für einen zu entwickelnden, modular aufgebauten, mobilen Laserbearbeitungskopf (LBK) die Grundlagen zum Laser-Mehrlagenschneiden erarbeitet. Systemparameter wie die Kollimier- und die Fokussierbrennweite sowie die Fokuslage wurden auf Basis der Versuchsergebnisse festgelegt. Für den Einsatzzweck des mobilen Laserrettungsgerätes zur Befreiung von Personen aus verunfallten Fahrzeugen ist es notwendig, ein zuverlässiges, sicheres und unkompliziertes System zur Verfügung zu stellen, das nur noch einige spezifische Möglichkeiten der Verstellung bietet. Entscheidend bei einem Rettungseinsatz ist stets die Zeit bis zur Befreiung der eingeschlossenen, verletzten Person. Je kürzer diese Zeit ist, desto größer sind die Überlebenschancen. Es muss also nicht nur gezeigt werden, dass z.B. eine Dachabnahme von einem Fahrzeug mit dem Lasersystem möglich ist, vielmehr sollte gleichzeitig die dafür benötigte Zeit so kurz wie möglich gehalten werden.

Bei einem klassischen Laserschneidprozess wird der Laserstrahl kontinuierlich mit vergleichsweise geringer Vorschubgeschwindigkeit relativ zum Werkstück bewegt, um das Material in der zu generierenden Schnittfuge über die Schmelz- bzw. Zersetzungstemperatur hinaus zu erhitzen. Gleichzeitig wird ein Prozessgasstrom mit einem hinreichend großen Druck typischerweise koaxial zum Laserstrahl auf das geschmolzene Material gelenkt, um es aus der Schnittfuge auszutreiben und so den Schneidprozess zu komplettieren. Einen großen Einfluss auf die Effizienz des beschriebenen Laserschneidprozesses hat die dabei verwendete Schneiddüse. Diese dient abgesehen von der exakten Positionierung des Prozessgasstrahls auf dem Bauteil zur Formung des Gasstrahls und trägt folglich wesentlich zum Austreiben der Schmelze aus der Schnittfuge bei.

Im Rahmen der technischen Unfallrettung muss der Laserschneidprozess an dicken Mehrlagenstrukturen, welche nicht nur verschiedene Werkstoffe mit entsprechend unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften, sondern auch Hohlräume enthalten können, unter Generierung mehrerer hintereinanderliegender Schnittfugen realisiert werden. Eine wesentliche Herausforderung dabei ist die Bereitstellung eines ausreichend hohen Prozessgasdruckes auch im Bereich tieferer Lagen. Erst dadurch kann die dort erzeugte Materialschmelze aus der Schnittfuge ausgetrieben werden, so dass eine vollständige Durchtrennung erzielt wird. Die Schnittqualität spielt im Zuge von Rettungseinsätzen keine nennenswerte Rolle.

Um die mit verschiedenen Prozessgasdüsen maximal erzielbaren Schnitttiefen zu ermitteln, wurde eine speziell für das Laser-Mehrlagenschneiden konstruierte Spannvorrichtung eingesetzt. Diese nimmt die zu schneidenden Bleche in einer fächerförmigen Anordnung auf und simuliert auf diese Weise das Vorkommen von variierenden Hohlräumen in einer realen Mehrlagenstruktur (vgl. Abb. 2). Mit der Vorrichtung wurden mit dem für den Rettungseinsatz entwickelten LBK an unterschiedlichen Werkstoffen Schneidversuche unter Verwendung

verschiedener Düsen durchgeführt. Genutzt wurde dafür ein Faserlaser von Coherent | Rofin mit einer Wellenlänge von 1.070 nm, einer maximalen Ausgangsleistung von 2,5 kW und einem Kerndurchmesser der Prozessfaser von 100 µm. Die Laserstrahlung wurde senkrecht von oben auf das liegende, fächerförmig angeordnete Blechpaket gelenkt. Neben der Düsengeometrie wurden der Düsendurchmesser, welcher maßgeblich den Volumenstrom bestimmt, sowie der Abstand Düse – Werkstück betrachtet. Die Versuchsergebnisse liefern wichtige Informationen hinsichtlich der Eignung der in Frage kommenden Düsenvarianten.



Abb. 2: Fächeranordnung von mittels Laser zu schneidenden Blechen (vgl. z.B. Hennigs et al. 2018).

Betrachtete Schneiddüsengeometrien

Die Schneiddüse stellt letztendlich das Bauteil am LBK dar, durch welches sowohl der Laserstrahl als auch das Prozessgas den LBK verlassen und anschließend auf das zu schneidende Werkstück treffen. Die Düsengeometrie bestimmt die Gasstrahlformung und somit den Druckverhältnisse an der Werkstückoberfläche. Sie beeinflusst folglich die Effizienz des Materialaustriebs aus der Schnittfuge. Die wichtigsten Eigenschaften des Gasstrahls sind seine Abmessungen, sein Impuls und seine Orientierung bezüglich der Wechselwirkungszone der Laserstrahlung mit dem aus der Schnittfuge zu entfernenden Material.

Abb. 3 zeigt einige gängige Düsenformen für das Laserschneiden. Konische Einlochdüsen sind die am häufigsten verwendeten Schneiddüsen. Nicht zuletzt sind sie die am einfachsten und somit am günstigsten zu produzierenden Düsen. Deutlich besser für die Erzielung hochqualitativer Schneidergebnisse eignen sich Lavaldüsen oder konisch-divergente Düsen. Sie treiben die Schmelze effektiver aus der Schnittfuge aus als konische Düsen. Beide Düsenarten haben einen konischen Teil vor der Engstelle (sog. Gurgel) und einen divergenten Teil am Düsenauslass. Somit ist der Durchmesser des Strömungskanal am Düsenausgang signifikant größer als an der engsten Stelle, welche dem Innendurchmesser entspricht. Dadurch expandiert der Gasstrahl schon innerhalb der Düse und erreicht hier bei korrekter Auslegung Überschallgeschwindigkeit. Am Düsenausgang wird ein nahezu paralleler Gasstrahl mit hohem Maximaldruck geformt. Für die konisch-divergenten Düsen können ähnliche Eigenschaften wie für die Lavaldüsen angenommen werden (vgl. z.B. Hügel und Graf 2009).

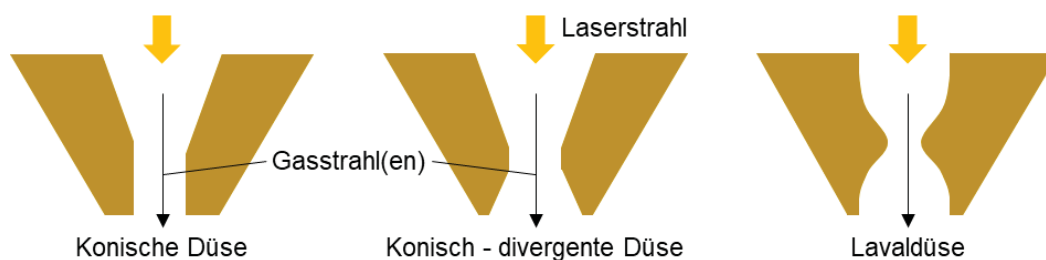


Abb. 3: Skizze der Geometrien unterschiedlicher Schneiddüsen in Anlehnung an Hügel und Graf 2009. Die konisch-divergente Düse und die Lavaldüse ähneln sich.

Ermittlung des am Werkstück anliegenden Druckprofils des Gasstrahls

Vor der Durchführung von Schneidversuchen mit den unterschiedlichen Düsen wurden mit einer Druckmessplatte (Pinhole mit darunter positioniertem Drucksensor, vgl. Brodesser et al. 2018) ortsaufgelöste Druckprofile der Düsen aufgenommen. Diese geben Aufschluss über die jeweilige Gasstrahlformung und die im Gasstrahl generierten Druckverhältnisse. Durch Abfahren in X-, Y- und Z-Richtung konnten 3D-Modelle erstellt werden. Als Prozessgas wurde Druckluft eingesetzt. Insgesamt wurden 6 verschiedene Düsen betrachtet: drei konisch-divergente und drei konische Düsen mit Innendurchmessern von jeweils 1,8 mm, 2,5 mm und 3,0 mm. Um einen sinnvollen Vergleich zwischen den einzelnen Düsen herzustellen, wurden zunächst Druckprofile bei einem Abstand Düse – Werkstück von 1,5 mm ermittelt. Für jede der 6 betrachteten Düsen wurde ein Kesseldruck von 5 bar eingestellt. In Abb. 4 sind die gemessenen Druckprofile als Falschfarbendiagramme dargestellt (vgl. dazu die Druckskala auf der rechten Seite). In der oberen Zeile sind die Profile der konischen Düsen, von links nach rechts mit 1,8 mm – 3,0 mm Innendurchmesser, zu sehen. Die Gasstrahlen haben mit 3,2 bar – 3,5 bar jeweils einen ähnlichen Maximaldruck. Gut zu erkennen ist die Verbreiterung des Gasstrahlquerschnitts mit zunehmendem Innendurchmesser. Alle drei Druckprofile sind annähernd gaußförmig. Der Maximaldruck liegt mittig im Gasstrahl vor. Das Profil hat im Fall der 2,5 mm Düse einen Durchmesser von etwa 2 mm. Die im obersten Blech erzeugte Schnittfuge hat, bedingt durch den effektiven Durchmesser des dort bereits geringfügig defokussierten Laserstrahls, eine Breite von ca. 0,6 mm. Eine ideale Prozessgasdüse würde ein Druckprofil in Form eines „spitzen“ Gaußprofils erzeugen, dessen Durchmesser in der Größenordnung der Schnittfugenbreite liegt. Somit wäre sicherzustellen, dass nahezu das gesamte Prozessgas in die Schnittfuge eindringt und für den Austrieb der Schmelze in Strahlrichtung zur Verfügung steht.

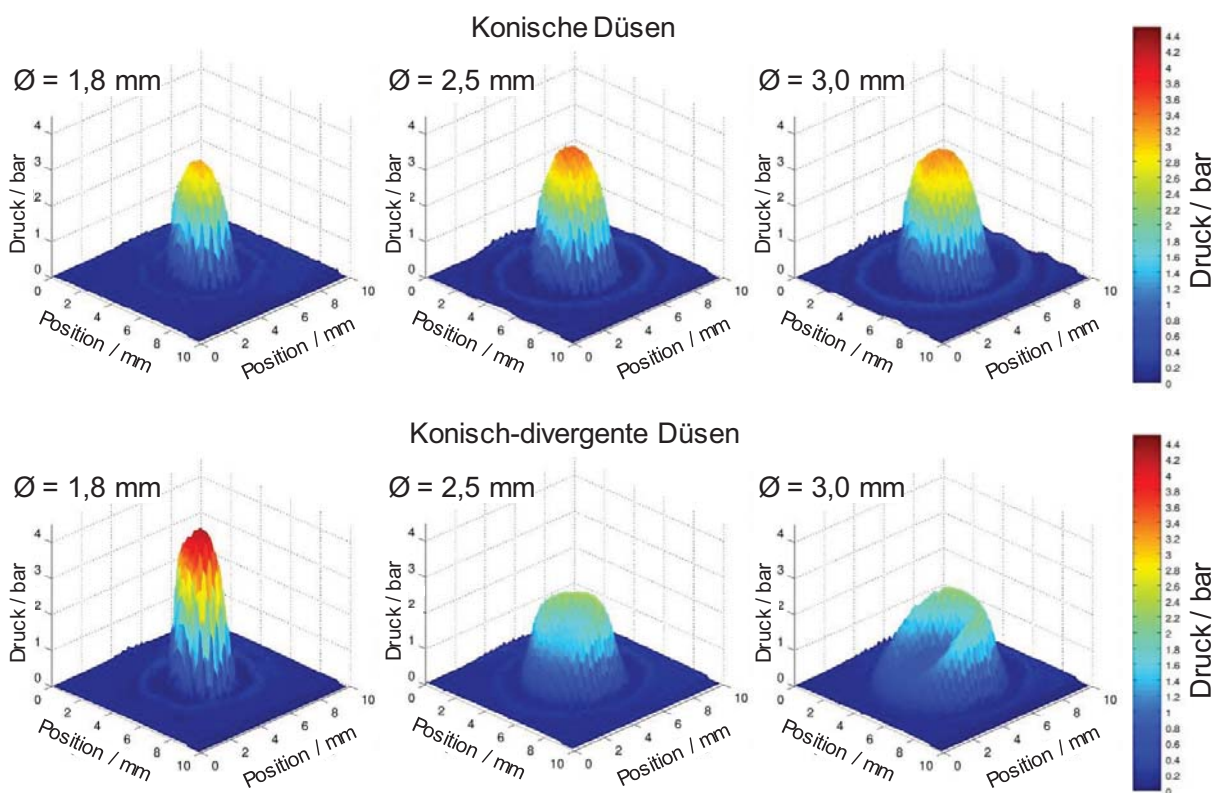


Abb. 4: Druckprofile der konischen (oben) und konisch-divergenten Düsen (unten) als Falschfarbendiagramme (vgl. die Druckskala rechts) bei einem Abstand Düse – Werkstück von 1,5 mm.

Das Druckprofil der konisch-divergenten Düse mit einem Durchmesser von 1,8 mm zeigt einen deutlich spitzeren Verlauf als das Druckprofil der entsprechenden konischen Düse. Der Maximaldruck von etwa 4,2 bar ist auch um ca. 1 bar größer als der Druck der konischen Düse. Die Druckprofilmessungen an der 2,5 mm und der 3,0 mm Schneiddüse zeigen sowohl hinsichtlich der Form als auch hinsichtlich des Maximaldrucks signifikant schlechtere Ergebnisse als bei den konischen Vergleichsdüsen. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die Düsenform hier jeweils durch mechanische Bearbeitung der ursprünglichen konischen Düse erzeugt wurde und eine vorherige Auslegung auf einen bestimmten Betriebsdruck nicht stattgefunden hat. In einem solchen Fall kommt es beim Betrieb zum Strömungsabriss und der Gasstrahl kollabiert (vgl. Szymczyk 2017, Körner 2006). Daraus resultieren dann Druckprofile, wie sie für die 2,5 mm und die 3,0 mm konisch-divergente Düse in Abb. 4 zu sehen sind. Ein paralleler Gasstrahl kann sich nicht aufbauen und es bilden sich keine Überschallgebiete aus.

Einfluss des Abstands Düse – Werkstück auf den anliegenden Druck

Um einen Bezug zur realen Anwendung bei der Personenrettung herzustellen, ist zu berücksichtigen, dass sich der Abstand Düse – Werkstück beim Schneiden z.B. einer Fahrzeugsäule ändert, denn nach einem Verkehrsunfall ist von starken Verformungen des Bauteils mit entsprechenden Oberflächenunebenheiten auszugehen. Dazu wird der Druck in der Mitte des Gasstrahls als Funktion des Abstands Düse – Werkstück (Position in Z-Richtung) gemessen. Aus den Ergebnissen kann zum einen abgeleitet werden, bei welchem Abstand der größte Druck am Werkstück anliegt, zum anderen ist ersichtlich, welche Düse sich am besten für die beschriebenen Anforderungen im realen Einsatz eignet, weil der Druck in Z-Richtung nicht zu stark schwankt. In Abb. 5 sind die Druckkurven für die 6 hier betrachteten Düsen abgebildet.

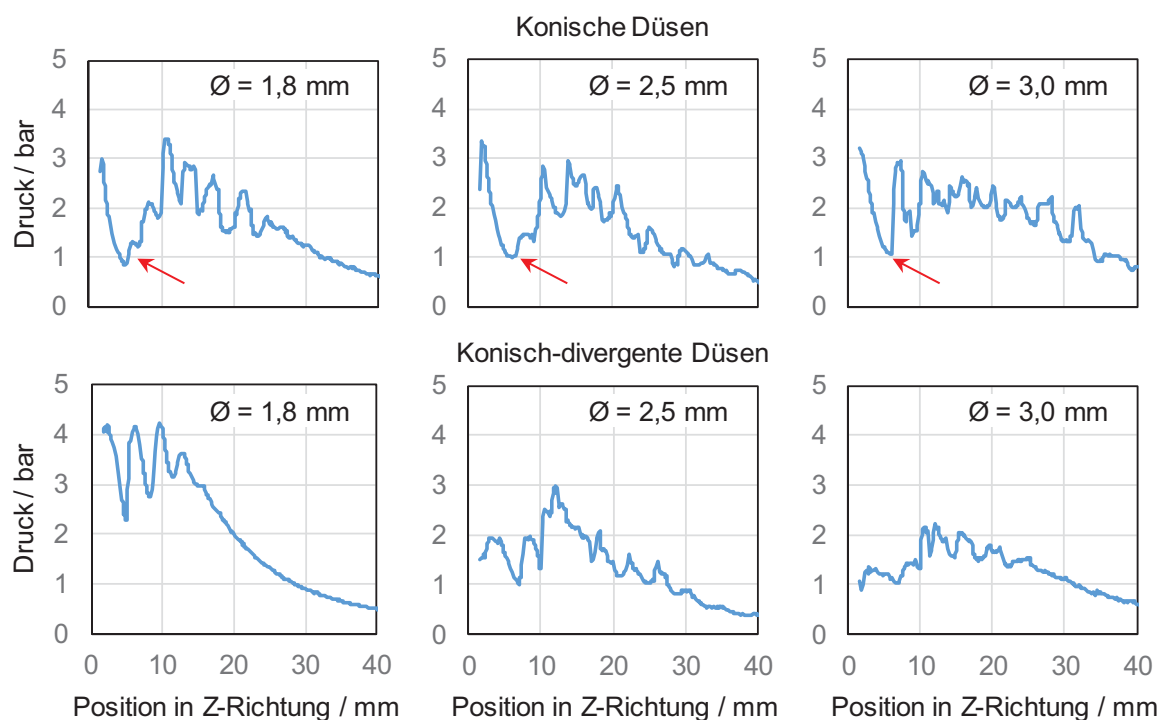


Abb. 5: Druck in der Mitte des Gasstrahls als Funktion der Position in Z-Richtung für die 6 betrachteten Schneiddüsen (obere Reihe: konische Düsen, untere Reihe: konisch-divergente Düsen, Düsendurchmesser jeweils 1,8 mm, 2,5 mm und 3,0 mm).

Bei den konischen Düsen ist nach einem Druckmaximum bei minimalem Abstand (hier: 1,5 mm) ein starker Druckabfall zu erkennen. Der Druck steigt vor allem bei der 1,8 mm und

der 2,5 mm Düse nur langsam wieder an. Mit zunehmendem Abstand ist ein periodischer Verlauf erkennbar, wobei der mittlere Druck stetig abfällt. Das periodische Verhalten des Druckes entsteht aufgrund der Ausbildung von Verdichtungsstößen bzw. sog. Mach'schen Scheiben, in denen Überschallgeschwindigkeit herrscht (vgl. z.B. Oertel et al. 2015). Nachteilig ist bei konischen Düsen aufgrund des relativ breiten Druckminimums im Bereich eines Abstandes Düse – Werkstück von etwa 5 mm (vgl. die Pfeile in Abb. 5, obere Reihe) das Laserschneiden in diesem Abstandsbereich, welcher jedoch für den praktischen Einsatz des mobilen LBKs im Zuge von Rettungseinsätzen besonders wichtig ist. Wie entsprechende Druckprofilmessungen zeigen, hat sich im weiteren Verlauf des Freistrahls die Gasströmung bereits so weit aufgeweitet, dass lediglich ein geringer Volumenstrom durch eine Schnittfuge resultieren würde.

Repräsentativ für das Verhalten der konisch-divergenten Düsen wird der Druckverlauf in der Gasstrahlmitte bei Verwendung eines Düsendurchmessers von 1,8 mm analysiert. Hier ist ein periodisches Verhalten mit stark ausgeprägten Mach'schen Scheiben schon im Bereich kleiner Düsenabstände von der Werkstückoberfläche zu erkennen. Dabei bleibt der mittlere Druck auf den ersten 10 bis 15 mm näherungsweise konstant auf einem hohen Niveau. Erst danach kommt es zu einem stärkeren Druckabfall. Das Auftreten der Mach'schen Scheiben unmittelbar hinter dem Düsenausgang belegt die periodische Ausbildung von Überschall- und Unterschallgebieten im Gasstrahl sofort nach dem Verlassen der Schneiddüse (vgl. Hügel und Graf 2009). Da sich dementsprechend kleine Unebenheiten in den zu schneidenden Teilen und damit verbundene variierende Abstände Düse – Werkstück bei sorgfältig ausgelegten konisch-divergenten Düsen bzw. vergleichbare Lavaldüsen weniger stark auswirken, sind diese Düsen für den Einsatz im Rettungswesen theoretisch den konischen Düsen vorzuziehen.

Schneidversuche mit unterschiedlichen Schneiddüsen

Um den Einfluss der Düsenform auf das Schneidergebnis zu evaluieren, wurden mit den 6 hier betrachteten Düsen Schneidexperimente an Blechen in der oben beschriebenen Fächeranordnung bei einer Laserleistung von 2,5 kW durchgeführt. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug jeweils 200 mm/min, der Abstand Düse – Werkstück lag bei 1,5 mm. Geschnitten wurden Bleche aus hochfestem, feuerverzinktem Automobilstahl (HCT600X, vgl. z.B. STAHL0 2014) mit einer Dicke von 1,2 mm. Mit jeder Düse werden 10 Versuche durchgeführt. Gemessen wurde jeweils die maximal erzielte Schnitttiefe. Diese wurde als der maximale Abstand einer durchgehenden Schnittfuge im untersten Blech (ohne Berücksichtigung der Schnittqualität) von der Oberseite des obersten Bleches in der Fächeranordnung definiert. Wie in Abb. 6 zu sehen ist, liegen die Schnitttiefen aller betrachteten Schneiddüsen für die gegebenen Prozessparameter zwischen ca. 33 mm und 38 mm für ein fünflagiges Blechpaket.

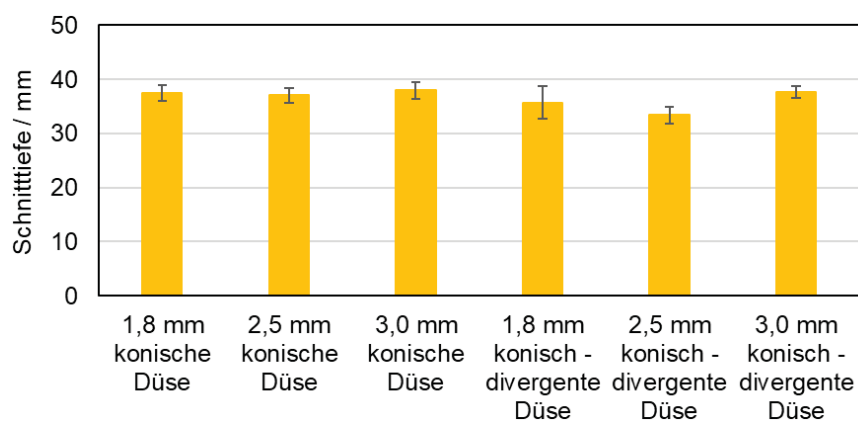


Abb. 6: Maximale Schnitttiefe beim Laser-Mehrlagenschneiden mit 6 unterschiedlichen Schneiddüsen.

Offenbar liefert die laut Theorie optimale Düse, die konisch-divergente Düse mit einem Durchmesser von 1,8 mm, bei den Schneidtests schlechtere Ergebnisse als die drei konischen Düsen, welche nahezu gleiche Ergebnisse erzielt haben. Insbesondere die konisch-divergente Düse mit einem Durchmesser von 2,5 mm liefert signifikant geringere Schnitttiefen, was mit dem gemessenen Druckprofil korreliert. Ein eindeutiges Optimum der für das Laser-Mehrlagenschneiden zu verwendenden Düse lässt sich aus dieser Versuchsreihe nicht ermitteln.

Die optische Beurteilung der geschnittenen Bleche zeigt ein generelles Problem im Zusammenhang mit der Auswertung der Schneidversuche auf. Innerhalb der Schnittfugen, gerade in tieferen Blechlagen bei wachsenden Schnitttiefen, bildeten sich während des Schneidprozesses in unregelmäßigen Abständen Bereiche mit erstarrter Schmelze aus. Das aufgeschmolzene Material wird dort also nicht mehr vollständig aus der Schnittfuge getrieben, sondern lagert sich unkontrolliert auf einer der unteren Blechlagen ab. Daraus resultiert an den Stellen der Ablagerungen eine deutlich größere Blechdicke, so dass der Laserstrahl mehr Energie zum Aufschmelzen des Materials benötigt. Somit kann es zu einer Unterbrechung des Schnittes kommen, wodurch die gemessene maximale Schnitttiefe signifikant beeinflusst wird. Abb. 7 zeigt ein entsprechendes Blech aus einem der durchgeführten Versuche.

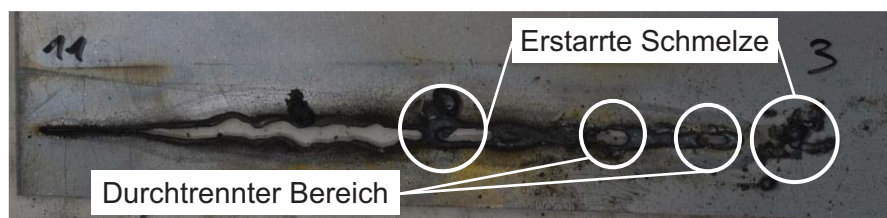


Abb. 7: Lichtbild eines geschnittenen Bleches mit erstarrter Schmelze in der Schnittfuge.

In der Abbildung sind mehrere Bereiche mit erstarrter Schmelze zu erkennen. Im Anschluss an diese Bereiche wurde das Blech jeweils wieder durchtrennt, bis schließlich die maximale Schnitttiefe erreicht war. Das lässt vermuten, dass das Blech auch auf ganzer Länge bis zum Maximum hätte durchtrennt werden können, wenn die Schmelze vollständig abgeflossen wäre. Die Problematik der sich ablagernden Schmelze auf den unteren Blechlagen ist offenbar darauf zurückzuführen, dass der Gasstrahl aufgrund seiner Divergenz nach Durchtritt durch jede Blechlage eine starke Druckverringerung und Verwirbelung erfährt. Je kleiner Gasstrahldivergenz und -verwirbelung sind, desto mehr Gas kann entsprechend einem größeren Volumenstrom durch die Schnittfuge hindurchtreten und desto besser kann die Schmelze aus einer darunter liegenden Wechselwirkungszone ausgetrieben werden. Eine mögliche Lösung der Problemstellung ist neben der weiteren Verbesserung des Gasströmungsprofils durch Wahl einer besser geeigneten Düsengeometrie (z.B. Verwendung von auf den Betriebsdruck ausgelegten Lavaldüsen), die Schnittfuge durch den Einsatz eines Lichtwellenleiters mit größerem Kerndurchmesser zu verbreitern. Ergänzende Versuche bei senkrechter Anordnung der Bleche und entsprechend horizontaler Lasereinstrahlung haben gezeigt, dass die Schwerkraft die unkontrollierte Ablagerung von aus einer Schnittfuge ausgetriebener Schmelze im Bereich der dahinter liegenden Wechselwirkungszone effektiv verhindern kann.

Fazit

Ziel der hier dargestellten Untersuchungen war, den Prozess des Trennens mehrlagiger Werkstoffstrukturen mittels Laserstrahlung unter Verwendung eines für Rettungseinsätze aufgebauten mobilen Lasergerätes zu entwickeln. Dabei wurde speziell der Einfluss der Düsengeometrie auf die erzielbare maximale Schnitttiefe evaluiert. Anhand der Messung von Druckprofilen

der Gasströmung an verschiedenen Düsen wurde gefolgert, dass eine konisch-divergente Düsengeometrie für die komplexen Anforderungen des Mehrlagenschneidens, z.B. an einer Fahrzeugsäule, besser geeignet ist als eine einfache konische Geometrie. Bei korrekter Auslegung der konisch-divergenten Düse bleibt der Druck im Gasstrahlzentrum in einem Bereich bis > 10 mm hinter dem Düsenausgang auf einem vergleichsweise hohen Niveau, so dass Oberflächenunebenheiten zu trennender Strukturen besser ausgeglichen werden können. In den durchgeführten Schneidversuchen konnte bislang eine Korrelation zwischen den maximal erzielbaren Schnitttiefen und der Ausprägung des Druckprofils nicht hergestellt werden. Bei der Versuchsauswertung wurde beobachtet, dass sich aus einer Schnittfuge ausgetriebene Schmelze unkontrolliert im Bereich der darunter liegenden Wechselwirkungszone ablagert, was die vollständige Durchtrennung des unteren Bleches verhindert. Zukünftig sollen Schneidversuche bei senkrechter Anordnung der Bleche sowie horizontaler Lasereinstrahlung unter Verwendung größerer Faserkerndurchmesser zwecks Verbreiterung der Schnittfugen durchgeführt werden. So soll die Prozessgasströmung in tiefere Lagen erleichtert werden.

Dankesworte

Die hier beschriebenen Arbeiten wurden zu wesentlichen Teilen im Rahmen des Verbundvorhabens "LaserRettung" (Innovatives Lasersystem zur Rettung bei komplexen Unfallszenarien) durchgeführt. Dieses Vorhaben (Nr. 13N14140 – 13N14146) wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme „Zivile Sicherheit – Innovative Rettungs- und Sicherheitssysteme“, welche Teil des Programms „Forschung für die zivile Sicherheit 2012 – 2017“ der Bundesregierung ist, gefördert. Hierfür sei dem BMBF ausdrücklich gedankt. Das Verbundvorhaben wird vom Laser Zentrum Hannover e.V., namentlich Herrn Dr.-Ing. Stefan Kaierle, koordiniert. Die Autoren danken den Verbundpartnern Coherent | ROFIN, Institut für Feuerwehr- und Rettungswesen der Feuerwehr der Stadt Dortmund, LASERVISION, SGE Spezialgeräteentwicklung, voestalpine eifeler Lasertechnik und Weber Hydraulik für ihre wertvolle Unterstützung.

Literatur

Bliedtner, J., Müller, H., Barz, A., 2013: „Lasermaterialbearbeitung: Grundlagen – Verfahren – Anwendungen – Beispiele“, Carl Hanser Verlag, München.

Brodesser, A., Hennigs, C., Pfaff, A., Grafe, R., Hustedt, M., Kaierle, S., 2018: „Demonstration of a mobile laser cutting system for complex rescue operations“, Proc. 37th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO), 14.–18. Oktober 2018, Orlando, FL, USA, Artikel #1305, 10 Seiten.

Hennigs, C., Brodesser, A., Grafe, R., Hustedt, M., Kaierle, S., 2018: „Mobile laser cutting system for complex rescue operations“, Proceedings of SPIE 10525, High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems VII, pp. 1052509-1-1052509-10.

Hügel, H., Graf, T., 2009: „Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren“, Vieweg+Teubner, Wiesbaden.

Oertel, H., Böhle, M., Reviol, T., 2015: „Strömungsmechanik für Ingenieure und Naturwissenschaftler“, Springer Fachmedien, Wiesbaden.

STAHL Stahlservice GmbH & Co. KG, 2014: „STAHL – Wir liefern Stahl vom laufenden Band: Leistungsprogramm“, Unternehmensbroschüre, Dillenburg, abgerufen aus dem Internet am 17.06.2019: https://www.stahlo.de/downloads/Stahlo_Leistung_2014_D_72dpi_Ansicht.pdf.

Szymczyk, J. A., 2017: „Vorlesungsskript zur Fluidmechanik II“, Hochschule Stralsund, Stralsund.

Körner, H., 2006: „Entwicklung, Konstruktion und Adaption von Zweigaslavalldüsen zum Laserbrennschneiden für ein Laserhandschneidsystem“, Studienarbeit, Laser Zentrum Hannover e.V., Hannover.