

Optimierte Luftströmungsführung beim Remote-Laserstrahlschweißen. Teil I: Experimentelle Untersuchungen

Optimized airflow control during remote laser welding. Part I: Experimental studies

**Jürgen Walter^a, Christian Hennigs^a, Alexander Brodeßer^a, Michael Hustedt^a,
Stefan Kaierle^a, Madlen Borkmann^b, Achim Mahrle^b**

^a Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, 30419 Hannover

^b Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden

Remote-Laserstrahlschweißen, Schweißrauche, Luftströmungsführung,
Einschweißstiefensteigerung, Trajektorien von Schweißspritzern
Remote laser welding, welding fumes, air flow control, welding depth increase, trajectories of
weld spatters

Zusammenfassung

Die beim Remote-Laserstrahlschweißen metallischer Werkstoffe mit Faser- oder Scheibenlasern hoher Ausgangsleistung und Strahlqualität entstehenden Schweißrauche gelangen bei vielen in der Industrie genutzten Anlagenkonstellationen (offene, teilgeschlossene, vollständig gekapselte Prozesse) unkontrolliert in den Laserstrahlengang. Damit verbunden ist eine abnehmende und im Nahtverlauf schwankende Einschweißtiefe, größtenteils bedingt durch die Wechselwirkung mit dem hohen Anteil feiner und ultrafeiner Partikel. Insbesondere kommt es bei den verwendeten Laserwellenlängen im Nahinfrarot-Bereich zu verstärkter Rayleigh-Streuung. Infolge der turbulenten Strömungsverhältnisse oberhalb der Schweißprozesszone variieren die Partikelkonzentrationen und -verteilungen im Strahlengang, so dass die Laserleistungsdichte an der Werkstückoberfläche räumlich und zeitlich fluktuiert. Ziel der im Folgenden beschriebenen experimentellen Untersuchungen ist die Steigerung von Schweißnahtqualität und Prozesseffizienz beim Remote-Laserstrahlschweißen metallischer Werkstoffe. Neben der globalen Raumlüftung werden zur effizienten Entfernung der Schweißrauche und -spritzer aus dem Strahlengang geeignete Anpassungen der Zuluft-, Erfassungs- und Absaugkomponenten evaluiert. Damit werden Ansätze für eine optimierte und ressourcenschonende Strömungsführung im Bearbeitungsraum abgeleitet. Letztlich lässt sich auf diese Weise eine langzeitige Prozessstabilisierung erreichen und die Schweißgeschwindigkeit signifikant erhöhen.

Einleitung

Bei Schweißprozessen metallischer Werkstoffe mit modernen im Nahinfrarot-Spektralbereich (NIR) emittierenden Laserstrahlquellen hoher Strahlqualität (siehe z.B. Brockmann 2009, Oefele 2013, Lingner 2013) unter Nutzung langer Brennweiten (oft > 1 m) im High-Power-Bereich (bis zu 6 kW) kommt es durch eine Strahleinkopplung in die freigesetzten Prozessmissionen (Schweißrauche, flüchtige organische Verbindungen (VOCs) etc.) zu einer signi-

fikant reduzierten Schweißnahtqualität bis hin zu Fehlschweißungen infolge von Prozessabbrüchen (siehe z.B. Walter 2014, Scholz 2015). Weiterhin wird eine erhebliche Spritzerbildung beobachtet, was bei den zu fügenden Bauteilen zu Qualitätseinbußen führen kann. Diese Effekte treten häufig schnell nach dem Prozessstart auf. Bereits nach kurzen Schweißbahnlängen kann das Durchschweißen bei einer Überlappnaht infolge des Leistungsverlusts in der Bearbeitungszone unterbrochen werden, was sich in erheblichem Maße negativ auf die Nahtfestigkeiten auswirkt. Die genannten Defizite führen dazu, dass die Bauteile nicht den Qualitätsanforderungen der Kunden genügen.

Zur Verbesserung der Schweißnahtqualität, Erzielung höherer Prozessgeschwindigkeiten und signifikanten Reduktion der Schweißspritzerbildung werden Gebläse- und Gaszufuhrsysteme sowie Absaugsysteme für die gezielte Erfassung und Absaugung der Prozessemissionen zwecks Reinigung der Luft im Strahlengang sowie generell der Luft in der Bearbeitungskabine hinsichtlich Wirksamkeit und Umsetzbarkeit in Schweißanlagen systematisch im Experiment evaluiert. Durch die Konstruktion und den praktischen Aufbau geeigneter Systeme wird zum einen die generelle Funktion demonstriert und zum anderen die Prozesseffizienz geprüft und optimiert. Die Wirtschaftlichkeit der zu entwickelnden Systemkomponenten ist hierbei von entscheidender Bedeutung. Die gewonnenen Erkenntnisse werden weiterführend mit theoretischen Simulationen korreliert (Borkmann 2015).

Untersuchung existierender Laserstrahlschweißanlagen

Eine Bestandsaufnahme und Analyse typischer Bearbeitungsstationen für das Remote-Laserstrahlschweißen erfolgte an unterschiedlichen Anlagen in der Industrie. Aufgrund der ähnlichen Problemstellungen beim Schweißprozess wurden neben Remote-Anlagen auch Anlagen mit starrer Optik und langer Brennweite betrachtet.






Für eine gezielte Aufnahme der erforderlichen Daten wurde ein umfangreicher Fragenkatalog erstellt, der sich in die folgenden Bereiche gliedert:

- ▶ Erfassung der technischen und geometrischen Daten der Anlagen
- ▶ Erfassung der lokalen und globalen Zu- und Abluftgegebenheiten
- ▶ Erfassung der Prozessrandbedingungen anhand von Testschweißungen sowie existierende Probleme und Schweißnahtqualitäten

Im Detail wurden Angaben zu Anlage, Zuluft, Werkstoff und Werkstück, Optik, Laser, Handhabung, Absaugung, Abluftbehandlung, Zykluszeiten, Prozessbedingungen und eventuellen Problemen abgefragt. Nachfolgend sind wesentliche betrachtete Anlagen mit ihren Eckdaten aufgeführt (siehe Tab. 1). Aufgrund der extremen Größenunterscheide dieser Anlagen wurden drei Größenkategorien definiert:

< 10 m³ (nicht begehbar), 10 – 100 m³ (begehbar) und > 100 m³ (großer Raum/Werkhalle)

Tab. 1: Wesentliche bei Industriepartnern begutachtete Anlagen

Größenkategorie	< 10 m ³	10 – 100 m ³	10 – 100 m ³	> 100 m ³	> 100 m ³
Bild					
Größe	2,2 x 2,4 x 1,8 9,5 m³	3,5 x 3,6 x 3,8 16,4 m³	3,6 x 2,3 x 4,3 35,6 m³	5,0 x 5,6 x 7,0 196 m³	9,6 x 24,0 x 6,5 1498 m³
Handhabung	5-Achs-Portal	Roboter	6-Achs-Portal	Roboter	Roboterportal
Optik	starre Optik	Scanner	starre Optik	Scanner	starre Optik
Dimension	2,5D	3D	3D	3D	3D

Da es sich bei den meisten der Anlagen um Laboranlagen zur Demonstration bzw. für die Bauteilfertigung in geringeren Stückzahlen handelte, waren hiermit zwar grundlegende Untersuchungen möglich, jedoch spiegeln die Ergebnisse nur bedingt die realen Randbedingungen industrieller Anwendungen wider. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen soll die Liste daher noch ergänzt werden.

Zur Prozesscharakterisierung anhand der Emissionen und der Kabinenströmung in Abhängigkeit von Schweiß-, Bauteil- und Werkstoffparametern wurden an den Anlagen 2 und 5 aus Tab. 1 experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Bedingt durch den laufenden Produktionsbetrieb der Anlage 2 (Fertigung einer Kleinserie) konnten dort jedoch nur sehr vereinfachte Messungen im Inneren der Bearbeitungskabine ohne Veränderung der Strömungsverhältnisse durchgeführt werden. Trotz eines enormen globalen Zuluftsystems mit einem Volumenstrom von etwa 7.500 m³/h in Verbindung mit lokal zum Prozess angeordneten Zuluftdüsen sowie mehreren AirKnifes zum Schutz der Optik sowie einer globalen Absaugung mit einem Volumenstrom von etwa 15.000 m³/h mussten die Schutzgläser mehrmals am Tag gereinigt bzw. ausgetauscht werden, weil im Verlauf der Produktion die Schweißnahtqualität stetig abnahm. Dies ist ein eindeutiges Indiz für die nicht optimalen Strömungsverhältnisse und die merkliche Kontamination der Luft im Bearbeitungsraum.

Mit der Anlage 5 wurden Edelstahl- und Baustahlbleche unter gezielter Variation der Strömungsverhältnisse blindgeschweißt. Parallel wurden bei laufender Absaugung Messungen der Partikelgrößenverteilungen und des Gesamtstaubs (siehe Erläuterungen im Abschnitt zu den partikelförmigen Prozessemissionen) sowie der Strömungsgeschwindigkeiten in der Prozesszone durchgeführt. Ohne zusätzliche Strömungselemente wurden in der Prozesszone Strömungsgeschwindigkeiten von ~ 0,2 m/s gemessen, mit einer ortsfesten Hallenheizung ergaben sich dort Werte von ~ 0,5 m/s und mit einem Gebläse ~ 5 m/s. Die Ergebnisse der Emissionsmessungen belegen, dass mit einer gerichteten Strömung ein höherer Erfassungsgrad erzielt werden kann. Dabei verschieben sich die Anzahlhäufigkeitsverteilungen offenbar zu kleineren Partikeldurchmessern.

Realisierung eines adäquaten Anlagenmodells zum Remote-Laserstrahlschweißen

Für die Umsetzung eines adäquaten Anlagenmodells für die grundlegenden Untersuchungen wurde eine kleine Kabine mit einem Volumen 1,6 m³ gewählt, die mit variablen Zu- und Abluftelementen ausgerüstet wurde (siehe Abb. 1).

Mittels eines Laserkopfes mit starrer Optik und langer Brennweite (600 mm) sowie einem Achssystem zum Verfahren der Probe kann der Prozess ortsfest durchgeführt werden. Somit lassen sich die Prozess- und Strömungsbedingungen für die Untersuchungen nahezu konstant halten. Der Gesamtaufbau wurde möglichst einfach gewählt, um leichter einen Abgleich der Realversuche mit den parallel durchgeführten Simulationen (Borkmann 2015) zu ermöglichen.

In den Aufbau sind Strömungsmesser in Form von Hitzdrahtsensoren (thermische Anemometer) sowie ein Doppel-Kamerasystem zur visuellen Erfassung und Analyse der Schweißspritzerbewegungen integriert (siehe Abschnitt zur Visualisierung der Strömung), um so die Beeinflussung der Strömungsgeschwindigkeiten vor allem im Strahlengang und die Ablenkung der Schweißspritzer durch die Variation der Zu- und Abluftelemente erfassen zu können. Die Emissionsmessungen erfolgen über existierendes Messequipment, welches über eine spezielle Probenahmestelle (Messzelle) in den Absaugkanal eingebunden wird.

Bei der Ausrüstung der Anlage wurde darauf geachtet, dass speziell vor dem Hintergrund der angestrebten problemlosen Nachrüstung existierender industrieller Anlagen die verwendeten Zu- und Abluftkomponenten einfach gehalten sind und so weit wie möglich auf kommerziell erhältliche Systeme zurückgegriffen wurde.

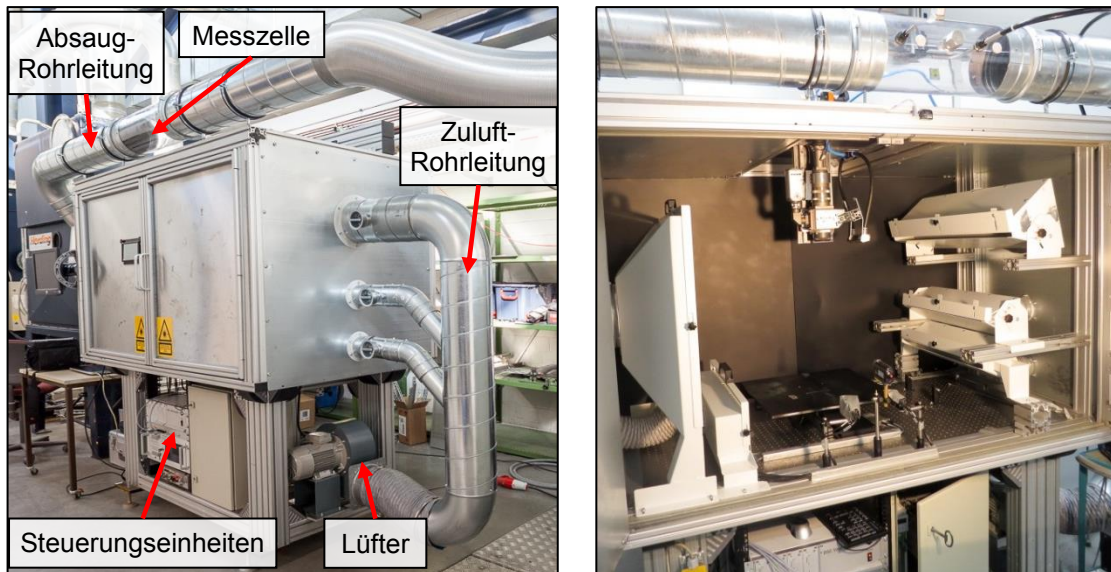


Abb. 1: Aufbau des Anlagenmodells mit Zu- und Abluftsystemen sowie Mess- undameratechnik

Visualisierung der Strömung

Neben der rein qualitativen Visualisierung der Strömung mittels Nebelgenerator können die Trajektorien von Schweißspritzern aus dem Keyhole der Prozesszone mit Hilfe eines speziell aufgebauten stereoskopischen Kamerasystems (siehe Abb. 2) bestimmt werden.

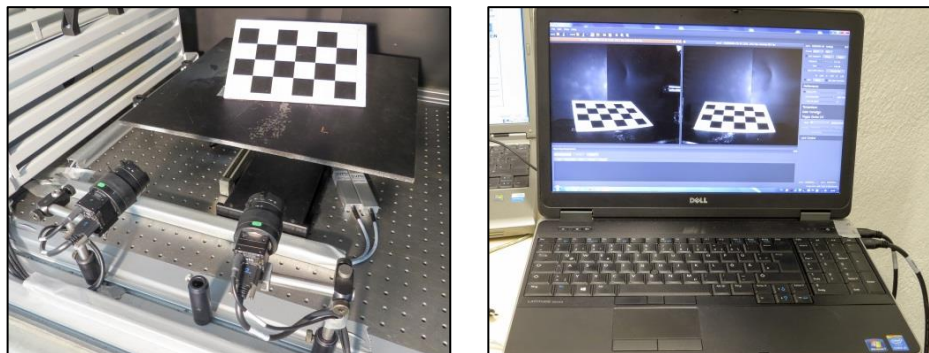


Abb. 2: Kamerasystem zur Bestimmung der Trajektorien von Schweißspritzern. Das im linken Bild im Bereich der Prozesszone platzierte Schachbrettmuster dient der Kalibrierung der Auswertesoftware im Hinblick auf die Bestimmung der 3-dimensionalen Koordinaten.

Mit zwei Highspeed-Kameras lassen sich Bilderserien des Laserschweißprozesses aus unterschiedlichen Blickrichtungen mit einer Frequenz von bis zu 400 Hz aufnehmen. Unter Nutzung einer speziell entwickelten Software werden dann offline die in den einzelnen Bildsequenzen sichtbaren Lichtflecke detektiert, die räumlichen und zeitlichen Positionen mit den beiden Kameraperspektiven korreliert und die Trajektorien (Flugbahnparameter und Geschwindigkeiten) der einzelnen Spritzer errechnet. Abb. 3 zeigt zwei Aufnahmen des gleichen Schweißprozesses aus unterschiedlichen Perspektiven. Die grünen Kreise heben die durch die Software detektierten Schweißspritzer hervor. Die nachträglich in die Bilder eingebrachten schwarzen Rechtecke dienen dazu, die sehr helle Prozesszone für die Auswertung zu maskieren.

Geplant ist, die aus den Trajektorien der einzelnen Partikel errechneten Flugbahnen in einem 3-dimensionalen Diagramm auszugeben. Die Beträge der Geschwindigkeit sollen hierbei über den jeweiligen Bahnverlauf mittels Farbcodierung veranschaulicht werden.

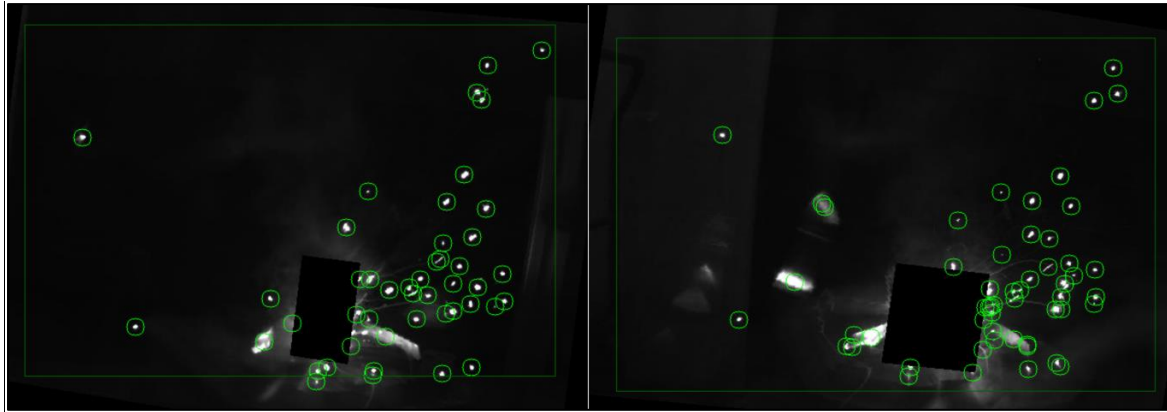


Abb. 3: Von der Software detektierte Schweißspritzer (grün markiert) in einer Momentaufnahme zweier Kameras aus unterschiedlichen Perspektiven

Das Verfahren ist limitiert auf die Detektion von Spritzern, deren Lichtflecke in den Aufnahmen ein ausreichend hohen Helligkeitskontrast aufweisen. Somit können „kalte“ Spritzer bzw. Spritzer, die sich im Flug abkühlen, nur bis zu einem gewissen Grad detektiert werden.

Analyse der partikelförmigen Prozessemissionen

Die Messung der Prozessemissionen im Abluftstrom und in der Bearbeitungskabine dient als Indikator für die Wirksamkeit der zur Strömungsbeeinflussung eingesetzten Systeme. Aufgrund der unterschiedlichen Partikelgrößen und -geschwindigkeiten müssen genügend hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Bearbeitungsraum erzeugt werden, damit unabhängig von Partikelgeschwindigkeit und -richtung genügend Energie für die erforderliche Änderung des Partikelimpulses zur Verfügung steht.

Um zu verhindern, dass die Probenahme das Messergebnis verfälscht, wird gemäß VDI 2066 (VDI 2006) im Abluftkanal das Prinzip der isokinetischen (geschwindigkeitsgleichen) Probenahme angewendet. Dabei wird aus dem Abluftstrom mittels einer entgegen der Strömungsrichtung gerichteten Probenahmesonde ein Teilvolumenstrom entnommen, indem durch definiertes Absaugen in der Öffnung der Probenahmedüse die gleiche Strömungsgeschwindigkeit wie außerhalb der Sonde eingestellt wird.

Für die gravimetrische Auswertung, d.h. zur Bestimmung der absoluten Masse der aufgefangenen Partikel, wird zwecks Probenahme der isokinetisch erzeugte Teilvolumenstrom einem Planfilterkopf zugeführt, wobei das Filtermedium sowohl vor als auch nach der Messung gewogen wird. Die Partikelgrößenverteilung der emittierten Aerosole wird mit einem elektrischen Niederdruckkaskadenimpaktor (ELPI) ermittelt. Das Messprinzip dieses Geräts beruht darauf, dass die mittels einer separaten Probenahmesonde isokinetisch aus dem Abluftstrom abgezweigten Partikel abhängig von ihrer Massenträgheit in hintereinandergeschalteten Impaktorstufen in verschiedene Fraktionen separiert und detektiert werden. Für die Detektion in einer bestimmten Impaktorstufe spielt der aerodynamische Partikeldurchmesser d_{aero} eine entscheidende Rolle. Er ist definiert als der Durchmesser eines kugelförmigen Partikels mit der Dichte 1 g/cm^3 , der dieselbe Sinkgeschwindigkeit in Luft aufweist wie das betrachtete Partikel. Aufgrund ihrer geringen Trägheit bewegen sich ultrafeine Partikel ($d < 0,1 \mu\text{m}$) sehr leicht mit der Strömung und gelangen im Kaskadenimpaktor weit nach unten. Feinstaub ($0,1 \mu\text{m} \leq d < 10 \mu\text{m}$) wird bereits früher, d.h. auf den mittleren und oberen Impaktorstufen, detektiert. Grobstaub ($d \geq 10 \mu\text{m}$) neigt zur Sedimentation, weshalb die Partikel eine signifikante nach unten gerichtete Geschwindigkeitskomponente aufweisen. Abb. 4 zeigt eine typische Partikelgrößenverteilung der von einem Laserschweißprozess von Baustahl abgesaugten Prozessemissionen. Deutlich zu erkennen ist, dass in den Aerosolen

die relativ wenigen großen Partikel den größten Teil der Masse ausmachen, während die Partikelanzahlverteilung vor allem von kleinen Partikeln mit aerodynamischen Durchmessern $< 0,3 \mu\text{m}$ dominiert wird. Diese kleinen Partikel können aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Trägheit turbulenten Strömungen gut folgen, so dass sie sich bei nicht optimalen Strömungsverhältnissen im Bearbeitungsraum verteilen und somit die Ausbreitung der Laserstrahlung stören.

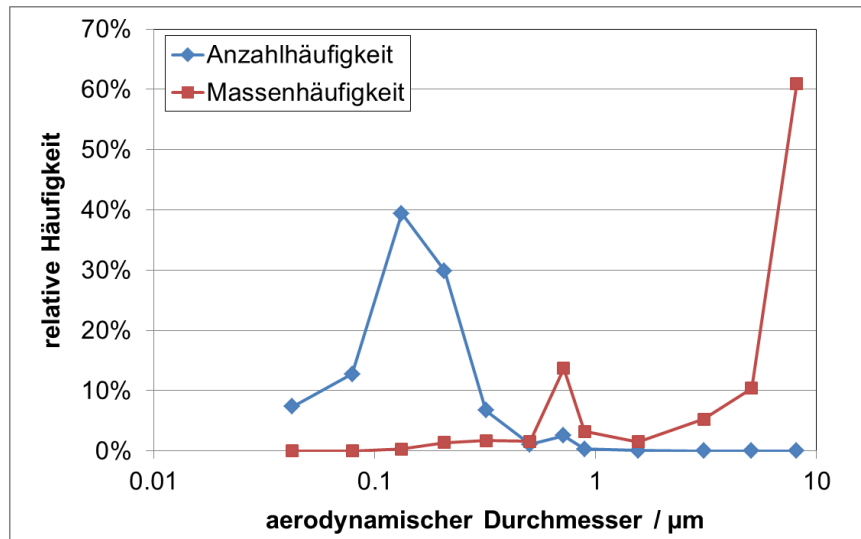


Abb. 4: Typische Partikelgrößenverteilung in der Abluft eines Blindschweißprozesses in Baustahl (S235JR) mittels Faserlaser (eingestellte Leistung 1 kW, Vorschubgeschwindigkeit 1 m/min)

Die in den Emissionsmessungen unter Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit gewonnenen Ergebnisse für die Partikelgrößenverteilungen und die Massenkonzentrationen der Gesamtaerosole lassen sich zur Auslegung von Verfahren zur Beeinflussung der Partikelbewegung in einer gegebenen Strömung nutzen. Dafür soll in weiteren systematischen Versuchen eine Korrelation mit den Schweißergebnissen z.B. in Form der Einschweißstiefen erfolgen.

Versuchsreihen mit dem Anlagenmodell

Das Anlagenmodell ermöglicht durch den flexiblen Aufbau die systematische Variation der Strömungsverhältnisse durch Zu- und Abschalten einzelner Zuluft- und Abluftsysteme sowie Regelung des Volumenstroms und Neigung der Zuluftdüsen. Darüber hinaus können leicht weitere Strömungssysteme wie Flachdüsen, AirKnifes o.ä. implementiert werden. Grundsätzlich wurde ein Verhältnis der Volumenströme von Zuluft und Abluft < 1 gewählt, um im Bereich eines geringen Unterdrucks zu bleiben. Überdruck würde bedeuten, dass Prozessemissionen unkontrolliert aus Öffnungen der Kabine gedrückt werden.

Aktuell werden Schweißversuche durchgeführt, um die Einflüsse der veränderten Strömungsverhältnisse auf die Entfernung der Emissionen aus dem Strahlengang sowie die Ausbildung der Schweißnähte grundlegend zu ermitteln und somit das Prozessverständnis zu erhöhen. Das Hauptbewertungskriterium stellt dabei die erzielte Einschweißtiefe im Vergleich zu Probeschweißungen ohne aktive Kabinenströmung dar. Weiterhin werden die Messwerte für die Prozessemissionen hinsichtlich der absoluten Masse und der Partikelgrößenverteilung, die Ablenkung der Schweißspritzer durch Auswertung der Trajektorien, die Strömungsgeschwindigkeiten im Bearbeitungsraum und Videomitschnitte des Prozesses zur visuellen Bewertung herangezogen und miteinander korreliert. Auf diese Weise wird eine Datenbasis für die Korrelation mit den Simulationen (Borkmann 2015) generiert.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Für grundlegende Untersuchungen zur Optimierung der Strömungsführung bzw. der Komponenten zur definierten Strömungsführung beim Remote-Laserstrahlschweißen wurde eine Versuchsanlage aufgebaut, in der globale und lokale Zuluft- und Absaugsysteme variabel eingestellt werden können. Damit soll der Laserschweißprozess in zukünftigen Untersuchungen hinsichtlich der Einschweißtiefe und der Prozessstabilität optimiert werden.

Die zur Beurteilung der Effizienz der erzeugten Strömungen erforderlichen Messmethoden und -systeme sind in einfacher Weise in das Anlagenmodell implementiert. Hierzu zählen die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mittels eines elektrischen Niederdruck-Kaskadenimpaktors (ELPI) und die Strömungsmessung mittels eines thermischen Anemometers (Hitzdrahtsensors) in einer speziellen Messzelle im Abluftkanal. Außerdem lassen sich die Strömungen im Inneren der Kabine, speziell im Bereich des Laserstrahlengangs, mit weiteren Hitzdrahtsensoren messen. Zur Beurteilung der Ablenkung und Entfernung der Rauche aus dem Strahlengang und der Kabine steht außerdem eine optische Kamera zur Verfügung. Schließlich wurde speziell zur Bestimmung der Trajektorien der aus der Prozesszone geschleuderten Schweißspritzer ein stereoskopisches Kamerasystem inkl. Auswertesoftware entwickelt und implementiert.

Erste Untersuchungen zeigten, dass sowohl globale als auch lokale Zuluftsysteme zum effektiven Freihalten des Strahlengangs von emittierten Rauchen erforderlich sind, um so Störungen durch Rayleigh-Streuung und Absorption an kleinen Partikeln zu vermindern. Weiterhin konnte die Relevanz eines Verhältnisses der Volumenströme von Zuluft und Abluft < 1 bestätigt werden, so dass sich unkontrollierte Freisetzungen von Emissionen durch Überdruck in der Bearbeitungskabine vermeiden lassen.

In laufenden Experimenten werden die ermittelten Einschweißtiefen mit den Prozessemissionen, den Trajektorien der Schweißspritzer, den unmittelbaren (visuellen) Beobachtungen des Bearbeitungsprozesses und den variablen Strömungsbedingungen korreliert. Außerdem werden die experimentellen Untersuchungen mit den parallel durchgeführten Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen abgeglichen. Für eine möglichst gute Vergleichbarkeit der gemessenen Emissionen müssen die Erfassungsgrade definiert für die unterschiedlichen Einschweißtiefen bestimmt werden, da die freigesetzte Menge an Emissionen von der Größe des Schmelzbads im Metall abhängt. Die Ergebnisse sollen schließlich dazu beitragen, das Prozessverständnis zu erhöhen und die Strömungsführung hinsichtlich verbesserter Schweißnahtqualitäten zunächst für das betrachtete Anlagenmodell zu optimieren. Darauf basierend ist die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf industrielle Anlagen geplant, um den Nutzen für interessierte Anwender der Remote-Laserstrahlschweißtechnologie von metallischen Werkstoffen sicherzustellen.

Dankesworte

Das IGF-Vorhaben 18149 BG des Forschungskuratoriums Maschinenbau e.V. (FKM) im VDMA sowie der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert, wofür die Autoren herzlich danken. Darüber hinaus danken die Autoren der ROFIN-SINAR Laser GmbH, Hamburg, für die Obmannschaft sowie allen beteiligten Industriepartnern für die Kooperation bei den in dieser Arbeit beschriebenen experimentellen Untersuchungen.

Literatur

Borkmann, M., Mahrle, A., Walter, J., Hennigs, C., Hustedt, M., Kaierle, S., 2015: „Optimierte Luftströmungsführung beim Remote-Laserstrahlschweißen. Teil II: Numerische Untersuchungen“, 23. Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“ 8. – 10. September 2015, Dresden, zur Veröffentlichung vorgesehen

Brockmann, R., 2009: „Kriterien für die Einführung des Laserschweißens in den Produktionsprozess“, MM – Maschinenmarkt – Das IndustrieMagazin, Heft 19, S. 24 – 26

Lingner, M., 2013: „A large scale remote welding system as an alternative for robot guided scanners“, Proc. European Automotive Laser Applications (EALA) 2013, 14. Europäische Fachkonferenz, Bad Nauheim, S. 197 – 206

Oefele, F., 2013: „Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen“, Dissertation, Technische Universität München, Forschungsberichte IWB, Band 267, Herbert Utz Verlag, München

VDI 2066, 2006/1994: „Messen von Partikeln – Staubmessung in strömenden Gasen“, Blatt 1: „Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung“, Blatt 5: „Fraktionierende Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren – Kaskadenimpaktor“, VDI/DIN-Handbuch „Reinhaltung der Luft“, Band 4: „Analysen und Messverfahren“, Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Beuth Verlag, Berlin

Scholz, T., Dickmann, K., Ostendorf, A., Uphoff, H., Michalewicz, M., 2015: „Effect of process parameters on the formation of laser-induced nanoparticles during material processing with continuous solid-state lasers“, J. Laser Appl. 27 (3), S. 032001

Walter, J., Hennigs, C., Hustedt, M., Kaierle, S., Borkmann, M., Mahrle, A., 2014: „Effizienzsteigerung beim Remote-Laserschweißen durch optimierte Luftströmungsführung“, 22. Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“ 9. – 11. September 2014, Karlsruhe, Paper 49, S. 49-1 – 49-8