

Effizienzsteigerung beim Remote-Laserschweißen durch optimierte Luftströmungsführung

Efficiency enhancement during remote laser welding by means of optimized air flow control

Jürgen Walter^a, Christian Hennigs^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-Laserschweißen, Schweißrauch, Luftströmungsführung, Einschweißtiefensteigerung
Remote laser welding, welding fumes, air flow control, welding depth increase

Zusammenfassung

Beim Remote-Laserschweißen metallischer Werkstoffe mit Faser- oder Scheibenlasern hoher Ausgangsleistung und Strahlqualität entstehen Schweißrauche, die sich unkontrolliert in den Bearbeitungsraum oberhalb des Werkstücks und damit auch in den Laserstrahlengang ausbreiten können. Da in den Rauchen typischerweise ein hoher Anteil ultrafeiner Partikel enthalten ist, 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, so dass die Laserleistungsdichte an der Werkstückoberfläche räumlich und zeitlich fluktuiert. Dies wirkt sich derart auf die Laserschweißnähte aus, dass generell die Einschweißtiefen deutlich abnehmen und im Nahtverlauf schwanken.

In dieser Arbeit werden Untersuchungen vorgestellt, mit denen durch gezielte Modifikation der Strömungsverhältnisse im Bearbeitungsraum zur effizienten Entfernung der Partikel eine signifikante Steigerung von Laserschweißnahtqualität und Prozessstabilität erzielt werden soll. Zu diesem Zweck erfolgen systematische Experimente zur Erfassung der Luftströmungen und Prozessemissionen sowie zu ihrer Beeinflussung mit Hilfe geeigneter Zuluft- und Abluftkomponenten. Außerdem werden durch den Abgleich der experimentellen Ergebnisse mit CFD-Simulationen die Grundlagen für ein erweitertes Prozessverständnis sowie eine Methodik zur theoretisch fundierten Optimierung der Strömungsführung geschaffen.

Einleitung

In jüngster Zeit werden Laserschweißprozesse an Stahl und Aluminium statt mit CO₂-Lasern verstärkt mit modernen, im Nahinfrarot-Spektralbereich (NIR) emittierenden Laserstrahlquellen hoher Ausgangsleistung (> 4 kW) und Strahlqualität wie Faser- oder Scheibenlasern im Remote-Verfahren realisiert (siehe z.B. Brockmann 2009, Oefele 2013, Lingner 2013). Dabei handelt es sich um eine schnelle, flexible Laserschweißvariante, bei der unter Nutzung großer Arbeitsabstände (oft > 1 m) zwischen Bearbeitungskopf und Werkstück Galvanometerscannersysteme zur Strahlableitung und -führung entlang der programmierten Bear-

beitungskontur eingesetzt werden. Trotz der großen Arbeitsabstände lässt sich dank der verfügbaren hohen Strahlqualitäten der Bereich des Tiefschweißens mit Leistungsdichten $> 1 \text{ MW/cm}^2$ (siehe z.B. Dausinger et al. 1988, Gref et al. 2001) erreichen. Im Zuge solcher Prozesse mit NIR-Lasern, die im Gegensatz zum Tiefschweißen mit CO_2 -Lasern (siehe z.B. Neumann et al. 2005) häufig ohne zusätzliches Schutzgas ausgeführt werden, kommt es infolge von Wechselwirkungen der NIR-Laserstrahlung mit den entstehenden Schweißrauch (Michalowski et al. 2007, Zäh et al. 2007, Katayama et al. 2009) zu einer signifikant reduzierten Nahtqualität. Die wichtigste Ursache dafür ist neben der Strahlungsabsorption durch Substanzen im Strahlengang die Rayleigh-Streuung an den ultrafeinen Partikeln (Durchmesser $< 100 \text{ nm}$ gemäß DIN EN 481), die von der über dem Werkstück turbulenten Luftströmung mitgeführt werden (siehe z.B. Greses et al. 2004, Kawahito et al. 2009). Dabei ist die Leistungsdichte der Streustrahlung umgekehrt proportional zur 4. Potenz der Wellenlänge λ der einfallenden Laserstrahlung. Betrachtet man Strahlung mit $\lambda \sim 1 \mu\text{m}$ im Vergleich zu Strahlung mit $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$, so ergibt sich allein aus der Wellenlängenabhängigkeit ein Verhältnis der Streuintensitäten von $10.000 : 1$, weshalb im Fall von CO_2 -Laserstrahlung Streueffekte an ultrafeinen Partikeln im Strahlengang vernachlässigbar sind, während Partikel im Fall von im NIR emittierenden Lasern die Strahlausbreitung merklich stören können. Die Instabilitäten des Remote-Laserschweißprozesses mit NIR-Lasern werden häufig schnell nach dem Prozessstart beobachtet. So gelingt das Durchschweißen bei Überlappschweißgeometrie oft bereits nach kurzen Schweißbahnlängen infolge des Leistungsverlusts in der Bearbeitungszone nicht mehr, was sich fatal auf die Nahtfestigkeiten auswirkt.

Ein vielversprechender Ansatz zur Beeinflussung von Prozessstabilität und Nahtqualität beim Laserschweißen ist die Anwendung von Unterdruck (Katayama et al. 2011, Longerich 2011, Börner et al. 2012). Tatsächlich gelingen durch Senkung des Umgebungsdruckes auf Werte um 1 hPa eine Prozessstabilisierung mit einer signifikanten Reduzierung der Dampfackel und der Ausbildung eines Metaldampfjets infolge des hohen Überdrucks im Keyhole sowie eine erhebliche Vergrößerung der Einschweißtiefe ohne verstärkte Porenbildung im Nahtwurzelbereich. Das Schweißverfahren ist demnach prädestiniert für Anwendungen im Dickblechbereich, jedoch werden technischer Aufwand und Prozesskosten erheblich gesteigert. Weiterhin nimmt die Prozessflexibilität ab. So ist die Größe bearbeitbarer Bauteile limitiert.

Ziel der in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen ist die Steigerung von Schweißnahtqualität und Prozesseffizienz beim Remote-Laserschweißen metallischer Werkstoffe durch Minimierung der Schweißrauche und -spritzer im Strahlengang mittels geeigneter Modifikation der Schweißanlage mit Zuluft-, Erfassungs- und Absaugkomponenten zur Entfernung der Emissionen möglichst nahe der Prozesszone. Damit werden Ansätze für eine optimierte und ressourcenschonende Strömungsführung abgeleitet. Letztlich lässt sich so eine langzeitige Prozessstabilisierung erreichen und die Schweißgeschwindigkeit signifikant erhöhen.

Zur Erreichung der Zielsetzung werden systematisch Gaszufuhrsysteme sowie Systeme für die gezielte Erfassung und Absaugung der Rauche und somit die Reinigung der Luft im Strahlengang hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bzw. Umsetzbarkeit in industriellen 3D-Remote-Laserschweißanlagen evaluiert. Aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen und Gestaltungsmöglichkeiten resultiert dabei jedoch ein Variationsfeld, das eine optimale Anlagenauslegung auf rein experimenteller Basis mit vertretbarem Aufwand verhindert. Parallel zu den experimentellen Arbeiten wird daher ein adäquates Anlagenmodell unter Nutzung einer Computational Fluid Dynamics (CFD) Software entwickelt, das eine Luftströmungssimulation in Schweißkabinen ermöglichen soll. Mittels Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien können maßgebliche Einflussgrößen identifiziert und Ideen für eine optimierte Strömungsführung abgeleitet werden. Des Weiteren lässt sich die Übertragbarkeit effizienter und erprobter Strömungsführungen auf geänderte Randbedingungen der Prozessführung, der Emissionen oder geometrischer Kenngrößen der Schweißkabinen virtuell testen. Durch den praktischen

Aufbau der aussichtsreichsten Systeme wird zum einen die generelle Funktion demonstriert und zum anderen die Prozesseffizienz bisheriger Remote-Bearbeitungsstationen optimiert.

Experimentelle Arbeiten

Ausgehend von existierenden Remote-Laserschweißanlagen, die mit Strahlquellen einer Wellenlänge um $1\ \mu\text{m}$ (z.B. Faser- oder Scheibenlaser) arbeiten, wird der Istzustand von Laserschweißprozessen an unverzinktem und verzinktem Stahl, Aluminium sowie Kupfer zusammen mit emissionsbedingten Fertigungsproblemen erfasst. Zur Prozesscharakterisierung werden die Emissionen und Strömungsverhältnisse in den Bearbeitungskabinen im Detail unter Berücksichtigung relevanter Schweißprozess-, Bauteil- und Werkstoffparameter analysiert. Zu diesem Zweck werden Schweißversuche durchgeführt und die abgeleiteten Emissionen mittels einer mobilen Messstrecke (vergleiche den beispielhaften Aufbau in Abb. 1, siehe auch v. Alvensleben 2000) quantitativ bestimmt. Dabei wird eine Rohrleitung mit Messzellen für die Probenahmesonden, -krümmer und -röhrchen verwendet, die bezogen auf Durchmesser und knickfreie/bogenfreie Weglänge der VDI-Richtlinie 2066 genügt.



Abb. 1: Mobile Emissionsmessstrecke mit diversen Pumpen zur Probenahme und integriertem Electrical Low-Pressure Cascade Impactor (ELPI) zur Messung von Partikelgrößenverteilungen

Insbesondere für die Partikel in der Abluft ist gemäß VDI 2066 das Prinzip der isokinetischen (geschwindigkeitsgleichen) Probenahme anzuwenden. Dabei wird aus dem Abgasstrom mittels einer Probenahmesonde ein Teilstrom entnommen und zum Planfilterkopf geführt, indem durch definiertes Absaugen die gleiche Strömungsgeschwindigkeit wie außerhalb der Sonde eingestellt wird. Auf diese Weise wird verhindert, dass die Probenahme das Messergebnis verfälscht: Im Fall der hyperkinetischen Probenahme, bei der die Geschwindigkeit am Sondereingang größer als die Strömungsgeschwindigkeit im Abgasstrom ist, wird Abgas angesaugt, das die Sonde hätte umströmen müssen. Aufgrund ihrer Trägheit können nicht alle Partikel der Umlenkung folgen, weshalb der gemessene Staubgehalt zu niedrig ist. Demgegenüber erfolgt bei der hypokinetischen Probenahme die Absaugung mit einer Geschwindigkeit, die kleiner als die Strömungsgeschwindigkeit im Abgasstrom ist. Die Partikel im Abgas können der ihnen an der Probenahmesonde aufgezwungenen Änderung der Strömungsrichtung nicht folgen und gelangen in die Sonde. Dementsprechend ist der gemessene Staubgehalt zu hoch. Der Fehler bei zu großer Absauggeschwindigkeit ist geringer als bei im

gleichen Maße zu niedriger Absauggeschwindigkeit (Baumbach 1993). Das für Staubemissionsmessungen zulässige Verhältnis der Gasgeschwindigkeiten von abgesaugtem Teilstrom zu Hauptvolumenstrom (sog. isokinetisches Verhältnis) bewegt sich gemäß VDI 2066 zwischen 95% und 115%.

Die in den Emissionsmessungen gewonnenen Ergebnisse für die Partikelgrößenverteilung und die Massenkonzentration der Gesamtaerosole lassen sich zur Auslegung von Verfahren zur Beeinflussung der Partikelbewegung in einer gegebenen Strömung nutzen. Dabei spielt die Trägheit der Partikel in Abhängigkeit von der Masse bzw. Größe (Kenngröße aerodynamischer Durchmesser d) eine entscheidende Rolle: Während sich ultrafeine Partikel ($d < 0,1 \mu\text{m}$) und Feinstaub ($0,1 \mu\text{m} \leq d < 10 \mu\text{m}$) leicht mit der Strömung bewegen, neigt Grobstaub ($d \geq 10 \mu\text{m}$) zur Sedimentation, womit die nach unten gerichtete Geschwindigkeitskomponente zunimmt.

Ergänzend zu den Emissionsmessungen werden durch ortsaufgelöste Vermessung mit Hilfe eines Arrays aus Prandtl'schen Staurohren oder thermischen Anemometern die realen Strömungsverhältnisse ermittelt und an ausgewählten Prozessen die Schweißspritzerbewegungen mit Hochgeschwindigkeitskameras dokumentiert.

Eine Luftströmung kann sowohl lokal als auch global beeinflusst werden. Eine lokale Beeinflussung erfolgt bei Laserbearbeitungsprozessen nahe der Prozesszone, um diese Zone bzw. den Bereich darüber unmittelbar von Emissionen in Form von Partikeln und ggf. anorganischen und organischen Gasen sowie von Schweißspritzern freizuhalten bzw. um eine Schutzgasatmosphäre zu erzeugen, sowie nahe der Laseroptik, um diese vor Verschmutzung zu bewahren. Dabei wird z.B. Stickstoff oder Druckluft in definierter Weise über Düsen (quer oder koaxial zur Strahlausbreitungsrichtung) bzw. über sogenannte Crossjets (quer zur Strahlausbreitungsrichtung) eingeblasen. Darüber hinaus kann lokal über nahe der Prozesszone angeordnete Öffnungen abgesaugt werden. Globale Strömungen werden eingesetzt, um die Luft bzw. Atmosphäre im Bearbeitungsraum bzw. in der Bearbeitungskabine gezielt und effizient zu führen, z.B. in Richtung globaler Absaugkanäle. Aktiv zum Einsatz kommen hier z.B. Ventilatoren oder Gebläse für die Zuluft und Pumpen für die Abluft. Mit passiven Elementen wie z.B. Leitblechen lässt sich die Strömungsrichtung gezielt beeinflussen.

Die Prozessemissionen werden mehr oder weniger gut von der Strömung mitgerissen und auf diese Weise aus der Prozesszone entfernt. Um dabei möglichst alle Partikel gezielt ablenken oder abbremsen bzw. impaktieren oder zur Sedimentation bewegen zu können, müssen die zur Strömungsbeeinflussung eingesetzten Systeme aufgrund der unterschiedlichen Partikelgrößen und -geschwindigkeiten genügend hohe Strömungsgeschwindigkeiten erzeugen, damit unabhängig von Partikelgeschwindigkeit und -richtung genügend Energie für die erforderliche Änderung des Partikelimpulses zur Verfügung steht.

Die ersten durchgeführten Versuche, bei denen ein großflächiges Stahlblech-Bauteil mit dem Laser im Remote-Verfahren geschweißt wurde, ergaben bei Einsatz global angeordneter Gebläse, die in der Bearbeitungskabine eine nicht näher definierte gerichtete Luft-Querströmung oberhalb der Prozesszone erzeugten, eine deutliche Tendenz zur Prozessstabilisierung und Schweißnahtqualitätssteigerung. Der Strahleintritt in die Laserbearbeitungskabine erfolgte hier bei einem Arbeitsabstand von über einem Meter durch das Kabinendach.

Für den direkten Vergleich wurden die Gebläse abgeschaltet, so dass lediglich eine leichte Umwälzung der Luft innerhalb der Kabine erfolgte. Eine zunehmende Erhöhung der Konzentration der Emissionen konnte sowohl visuell als auch messtechnisch nachgewiesen werden und äußerte sich direkt in den Schweißergebnissen bzw. der Nahtqualität.

Die Wirkungsweise der durch die Gebläse erzeugten gerichteten Strömung ist in der Bildsequenz in Abb. 2 veranschaulicht. Die Emissionen im Strahlengang oberhalb der Prozesszone können durch eine solche Maßnahme sichtbar verringert werden, was sich in den Bildern anhand der partiell entrauchten Zone und der beobachtbaren Ablenkungen der

Schweißspritzer erkennen lässt. In diesem Fall wurde keine gezielte Absaugung der Prozessemissionen vorgenommen und die strömungsbedingten Verwirbelungen direkt an der Spanntechnik wurden ebenfalls nicht explizit untersucht.

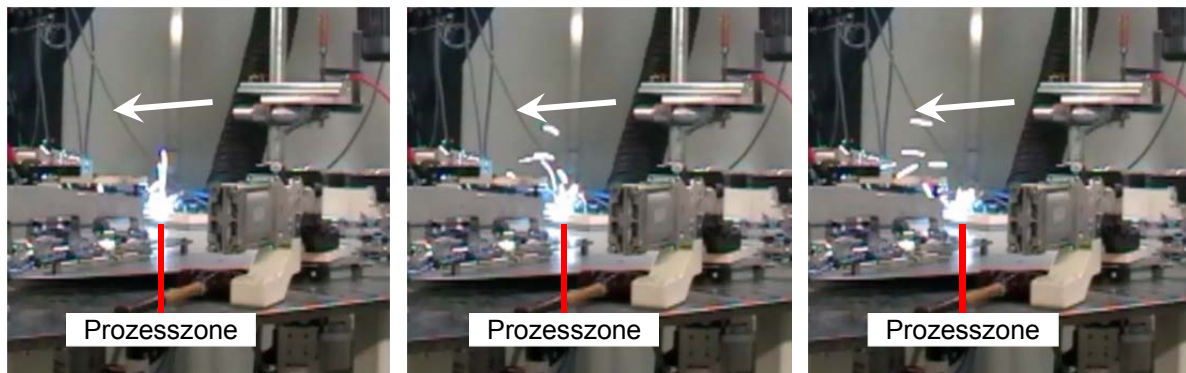


Abb. 2: Bildsequenz (25 Hz) zur Veranschaulichung der Reduzierung der Schweißrauche im Strahlengang oberhalb der Prozesszone während eines Remote-Laserschweißprozesses mit einem Faserlaser (Ausgangsleistung 4 kW), erkennbar an der Ablenkung der Schweißspritzer; die Pfeile geben die ungefähre globale Strömungsrichtung an, die durch die Gebläse erzeugt wurde

Der positive Einfluss einer durch Gebläse erzeugten gerichteten Kabinenquerströmung auf die Nahtqualität wurde anhand der metallurgischen Untersuchung von im Remote-Verfahren erzeugten Laserblindschweißungen, bei denen eine rechteckige Kontur abgefahren wurde, nachgewiesen. Abb. 3 zeigt Querschliffe durch entsprechende Proben ohne (Mitte) bzw. mit gerichteter Strömung (rechts). Mit eingeschalteten Gebläsen ergab sich demnach eine Erhöhung der Einschweißtiefe um ca. 75% gegenüber dem Prozess ohne Gebläse.

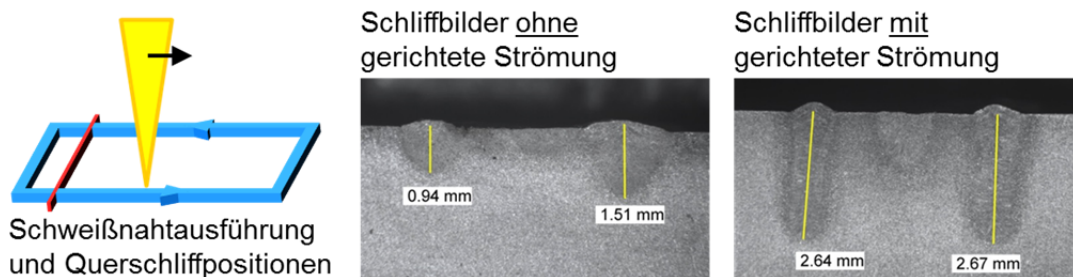


Abb. 3: Auswirkung einer globalen Querströmung auf die Nahtqualität beim Remote-Laserschweißen von Baustahl (Blindschweißungen), $P_{\text{Laser}} = 4 \text{ kW}$, $d_{\text{Fokus}} = 600 \mu\text{m}$, $f_{\text{Fokus}} = 600 \text{ mm}$

Um modifizierte bzw. neue Konzepte der Strömungsführung systematisch zu testen und zu optimieren, wird ein adäquates experimentelles Anlagenmodell für das Remote-Laserschweißen realisiert. Zu diesem Zweck wird mit ausgewählten Werkstoffen an einem Musterbauteil mit partieller 3D-Kontur ein Schweißprozess experimentell nachgestellt, an welchem in einem Bezugsversuch ebenfalls die Strömungsverhältnisse analysiert werden (vgl. Abb. 4). Aufbauend auf den virtuell erprobten Konzepten für eine effiziente Strömungsführung werden alternative Gaszufuhr- und Emissionserfassungskomponenten gebaut und in den Anlagenmodellbau integriert. In Laserschweißversuchen unter systematischer Variation relevanter Strömungsparameter werden die modifizierten realen Strömungsverhältnisse in der Anlage global bzw. lokal im Vergleich zum Ausgangszustand erfasst. Die experimentellen Ergebnisse werden anhand der erzielten Schweißnahtcharakteristika im Vergleich zum Ausgangszustand bewertet und mit den Simulationsergebnissen korreliert. Weiterhin wird der Einfluss auf Redeposite auf Vorrichtungen und Bearbeitungsoptiken untersucht.

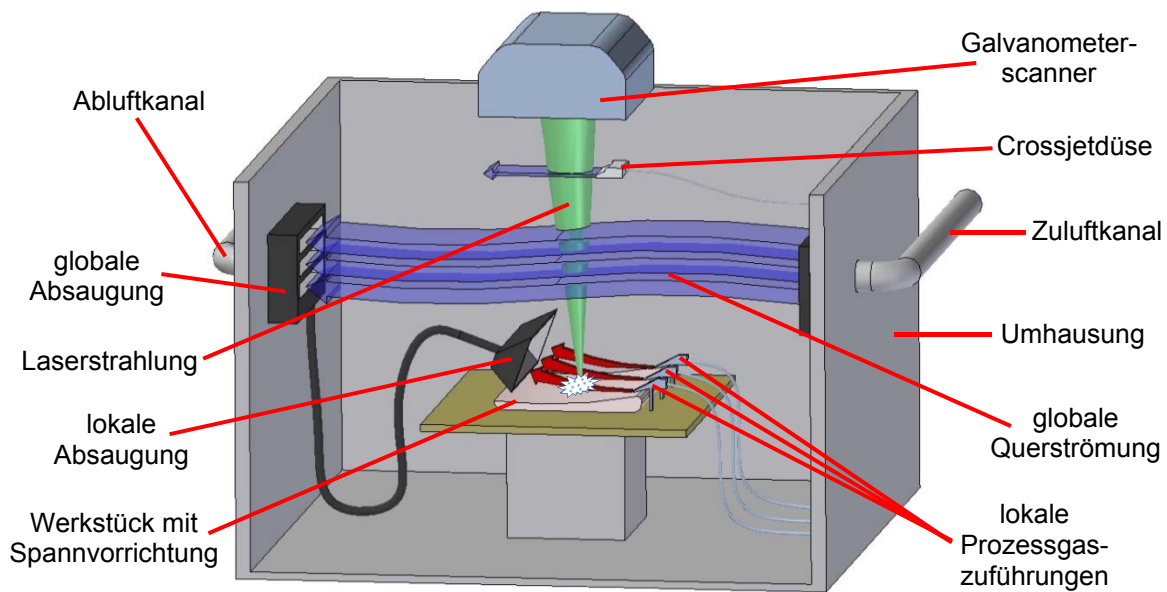


Abb. 4: Remote-Laserschweißanlage (Anlagenmodell) mit verschiedenen Einrichtungen (Crossjets, Prozessgaszuführungen, Absaugöffnungen) zur Luftströmungsführung

Fluiddynamische Simulationen

Für die Einbindung der CFD-Simulationstechnik in die beschriebenen experimentellen Untersuchungen ist die Entwicklung adäquater Simulationsmodelle für Bearbeitungsstationen zum Remote-Laserschweißen erforderlich. Dafür wird zunächst ein geometrisches Ersatzmodell erstellt. Damit werden Vernetzungsstrategien für unterschiedliche Simulationsszenarios getestet und implementiert. Anhand der ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten an Luftein- und -auslässen lassen sich Randbedingungen für die mathematische Beschreibung der Geschwindigkeitsprofile über die zur Verfügung stehenden Strömungsquerschnitte ableiten. Durch Analyse der globalen Raumluftrömungen werden zudem ansatzweise die Vereinfachungen des geometrischen Ersatzmodells auf ihre Zulässigkeit überprüft. Zur Berücksichtigung der freigesetzten Emissionen wird für das Simulationsmodell weiterhin eine äquivalente Volumenstromquelle definiert, unter deren Verwendung verschiedene Modellierungsansätze bzgl. ihrer rechentechnischen Realisierbarkeit erprobt werden können.

Parallel zur Realisierung des experimentellen Anlagenmodells erfolgt die Entwicklung des mathematisch-physikalischen Modells zur Raumluftrömungssimulation. Die Kenngrößen und Abmessungen des geometrischen Modells werden mit der experimentell vorgesehenen Bearbeitungsbahn des Laserstrahls festgelegt. Durch eine Korrelation der theoretischen Ergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen aus dem Bezugsversuch kann schließlich eine Validierung des theoretischen Modells durchgeführt werden.

Die Raumluftrömung in bestehenden Bearbeitungsstationen aktuell realisierter Anwendungen wird unter Berücksichtigung der installierten Raumluftechnik und der detektierten Prozessemissionen simuliert. Das Simulationsmodell wird hierbei um die eingesetzten lokal oder global angeordneten Raumlufkomponenten für die Kabinenzuluft und -abluft sowie um die zum Schutz der Bearbeitungsoptiken eingesetzten Vorrichtungen erweitert. Im Ergebnis exemplarisch ausgeführter Berechnungen wird der Einfluss der globalen Raumluftrömung sowie lokal angeordneter Komponenten auf die Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse in der Prozesszone quantifiziert und bewertet.

Im Rahmen computergestützter Sensitivitätsanalysen zur Identifizierung der Haupteinflussgrößen und Parameterstudien zur Optimierung des Anlagendesigns werden verschiedene

Raumluftkonzepte hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Strömungsverhältnisse virtuell erprobt. Auf diese Weise werden alternative Konzepte für eine effiziente Strömungsführung abgeleitet. Ausgehend von der Korrelation zwischen Theorie und Experiment erfolgt eine Anpassung der relevanten Simulationsparameter zur weiteren Optimierung. Ergänzend werden zur Demonstration und Qualifizierung von als aussichtsreich angesehenen Raumluftkonzepten die Besonderheiten der Strömungsführung anhand der durchgeführten Simulationsrechnungen, ggf. nach Anpassung an die speziellen Randbedingungen, im Vergleich zu bisher eingesetzten Standardlösungen in industriellen Remote-Laserschweißanlagen dargestellt.

Schlussfolgerungen

Im Zuge von Remote-Laserschweißuntersuchungen mit NIR-Laserstrahlung wurde gezeigt, dass Rayleigh-Streuung und Absorption an ultrafeinen Partikeln die Prozessstabilität und Schweißnahtqualität negativ beeinflussen können. Gezielte Analysen von ausgewählten Remote-Laserschweißanlagen und -prozessen sowie Messungen der Prozessemissionen und der Strömungsverhältnisse sollen das Prozessverständnis signifikant erhöhen. Die Simulation im CFD-Verfahren wird als zentrales Werkzeug eingesetzt, um zusätzliche Strömungselemente für Anlagen virtuell zu testen. Anschließend werden diese Elemente im praktischen Versuch gezielt im Hinblick auf ihre Funktionalität überprüft und die Effizienz der getroffenen Maßnahmen sowie das Verbesserungspotenzial im Hinblick auf die Ablenkung bzw. die Entfernung der Prozessemissionen aus dem Strahlengang anhand der Analyse hergestellter Remote-Laserschweißnähte demonstriert.

Letztlich sollen auf Basis der Arbeiten die Strömungsverhältnisse in existierenden und neuen Remote-Laserschweißanlagen gezielt angepasst werden, um Prozessstabilität und Nahtqualität zu optimieren. Dies birgt einen erheblichen ökonomischen Nutzen für die Anwender des Verfahrens. Insgesamt kann die Anlageneffizienz durch höhere Schweißgeschwindigkeiten, die zu einer Reduzierung der Taktzeiten und einer Steigerung des Durchsatzes führen, und geringere Ausschussraten deutlich erhöht werden. Außerdem lassen sich durch einen schnelleren Schweißprozess bzw. eine geringere erforderliche Laserleistung bei gleichbleibender Einschweißtiefe die Energiekosten senken. Durch die höhere Prozessstabilität in Verbindung mit geringeren Rauchkonzentrationen im Bearbeitungsraum vereinfachen sich Anlageneinrichtung und -reinigung, was mit kürzeren Anlagentotzeiten verbunden ist. Zusätzlich reduziert sich der personelle und technische Aufwand für die Bauteilnachbearbeitung, da weniger Bauteile mit unzureichender Qualität hergestellt werden. Alle genannten Faktoren resultieren in einer Verringerung der Herstellungs- bzw. Bauteilkosten und entsprechend höheren Gewinnmargen für die Anwender der Remote-Laserschweißtechnologie.

Das Simulationstool kann nicht nur für die individuelle und effiziente Auslegung kommerzieller Remote-Laserschweißanlagen, sondern auch für konventionelle Materialbearbeitungsprozesse genutzt werden, um eine günstige und gleichzeitig effiziente Luftströmungsführung zu realisieren. Dementsprechend ist durch die Umsetzung der Untersuchungsergebnisse ein technologieübergreifender Nutzen zu erwarten.

Dankesworte

Die Arbeiten werden gemeinsam vom Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH) und vom Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) Dresden im Rahmen des IGF-Forschungsprojektes „Prozessstabilität beim Remote-Laserschweißen“ (RemoStAad), IGF-Nr. 18149 BG, durchgeführt. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die finanzielle Förderung über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) und dem Forschungskuratorium

Maschinenbau e.V. (FKM) im VDMA sowie der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS für die Betreuung des Projektes. 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

- v. Alvensleben, F., Goede, M., Walter, J., 2000:** „Abtragen mit Laserphotonen – Arbeits- und Umweltschutz bei industriellen Abtragverfahren“, Verbundprojekt, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Nr. 13N7078/1, final report, Laser Zentrum Hannover e.V., Hannover
- Baumbach, G., 1993:** „Luftreinhalung“, 3. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg
- Börner, C., Krüssel, T., 2012:** „Unter Tiefdruck“, ifs-Report, Institut für Füge- und Schweißtechnik, Technische Universität Braunschweig, Band 1/2012, S. 6-8
- Brockmann, R., 2009:** „Kriterien für die Einführung des Laserschweißens in den Produktionsprozess“, MM – Maschinenmarkt – Das IndustrieMagazin, Heft 19, S. 24-26
- Dausinger, F., Beck, M., Rudlaff, T., Wahl, T., 1988:** „On coupling mechanisms in laser processes“, Proc. 5th International Conference on Lasers in Manufacturing (LIM5), Stuttgart, S. 177-185
- DIN EN 481:1993-09:** „Arbeitsplatzatmosphäre – Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel“, Deutsche Fassung der EN 481:1993, Beuth Verlag, Berlin
- Gref, W., Ruß, A., Leimser, M., Dausinger, F., Hügel, H., 2001:** „Thin disc laser – a new tool for welding“, Proc. 1st International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LiM), München, S. 38-47
- Greses, J., Hilton, P.A., Barlow, C.Y., Steen, W.M., 2004:** „Plume attenuation under high power Nd:Yttrium-Aluminium-Garnet laser welding“, Journal of Laser Applications, Band 16, Nr. 1, S. 9-15
- Katayama, S., Oiwa, S., Matsumoto, N., Mizutani, M., Kawahito, Y., 2009:** „Fundamentals of fiber laser remote welding and deep penetration welding“, Proc. 5th International WLT Conference on Lasers in Manufacturing (LiM), München, S. 829-835
- Katayama, S., Abe, Y., Mizutani, M., Kawahito, Y., 2011:** „Deep Penetration Welding with High-Power Laser under Vacuum“, Transactions of JWRI, Band 40, Nr. 1, S. 15-19
- Kawahito, Y., Kinoshita, K., Matsumoto, N., Katayama, S., 2009:** „Visualization of refraction and attenuation of near-infrared laser beam due to laser-induced plume“, Journal of Laser Applications, Band 21, Nr. 2, S. 96-101
- 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
- Longerich, S., 2011:** „Untersuchung zum Laserstrahlschweißen unter Vakuum im Vergleich mit dem Elektronenstrahlschweißen“, Dissertation, Aachener Berichte Fügetechnik, Aachen
- Michalowski, A., Heß, A., Ruß, A., Dausinger, F., 2007:** „Plume attenuation under high power Yb:YAG laser material processing“, Proc. 4th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LiM), München, S. 357-361
- Neumann, S., Thomy, C., Seefeld, T., Vollertsen, F., 2005:** „Distortion minimization and shielding gas flow optimisation in CO₂-laser remote welding of steel“, Proc. 24th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2005), Miami/FL, LIA – Laser Institute of America Publication, Band 98, S. 992-1000
- 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
- Zäh, M.F., Munzert, U., Oefele, F., 2007:** „Robot based remote-laser-welding without scanner optics“, Proc. 4th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LiM 2007), München, S. 429-436