

## **Adaptierte Strömungsführung zur Steigerung von Prozessstabilität und Schweißnahtqualität beim Remote-Laserstrahlschweißen metallischer Werkstoffe**

### **Adapted air flow control to increase process stability and weld seam quality during remote laser beam welding of metallic materials**

**Jürgen Walter<sup>a</sup>, Christian Hennigs<sup>a</sup>, Alexander Brodeßer<sup>a</sup>, Michael Hustedt<sup>a</sup>, Stefan Kaierle<sup>a</sup>, Madlen Borkmann<sup>b</sup>, Achim Mahrle<sup>b</sup>, Eckhard Beyer<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, 30419 Hannover

<sup>b</sup> Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden

Remote-Laserstrahlschweißen, Schweißrauch, Luftströmungsführung, Prozessstabilität,  
Remote laser beam welding, welding fume, air flow control, process stability

#### **Zusammenfassung**

Laserstrahlquellen hoher Ausgangsleistung und Strahlqualität wie z.B. Faser- und Scheibenlaser begünstigen die Entwicklung von Schweißprozessen bei großen Arbeitsabständen, speziell im sogenannten Remote-Verfahren. Eine Herausforderung bei der Auslegung derartiger häufig ohne Schutzgase ausgeführter Schweißprozesse stellen störende Wechselwirkungen der Laserstrahlung mit den freigesetzten Prozessemissionen dar. Diese können zu signifikanten Qualitätseinbußen mit reduzierten Einschweißstiefen bis hin zu Fehlschweißungen führen. Weiterhin können die auftretenden Schweißrauche eine gesundheitliche Gefährdung für die Beschäftigten darstellen und im Dauerbetrieb Anlagenkomponenten derart verunreinigen, dass ein hoher Reinigungsaufwand entsteht. Folglich erfordern optimierte Konzepte für Remote-Laserstrahlschweißanwendungen unter industriellen Fertigungsbedingungen eine effiziente Luftströmungsführung innerhalb der Bearbeitungskabine. Adäquate Kriterien für eine optimal gestaltete Kabinenlüftung waren bisher jedoch nur unzureichend untersucht. Entsprechend werden hier Ergebnisse von Untersuchungen zu dieser Fragestellung vorgestellt, in denen basierend auf experimentellen und numerischen Methoden maßgebliche Zusammenhänge zwischen Prozess- und Steuergrößen erstmals auch quantitativ beschrieben sind. Exemplarisch wird das Konzept einer räumlichen Abtrennung des prozessnahen Bereiches vom Rest der Bearbeitungskabine diskutiert, mit welchem eine signifikante Effizienzsteigerung bei der Luftströmungsführung sowie eine wirtschaftlich relevante Reduzierung des erforderlichen Reinigungsaufwands erreicht werden kann.

#### **Einleitung**

Das Remote-Laserstrahlschweißen stellt eine moderne Laserstrahlschweißvariante dar, welche häufig in der blechverarbeitenden Industrie, z.B. der Automobilindustrie, zum Einsatz kommt (siehe z.B. Oefele 2012, Fysikopoulos et al. 2016, Roos und Schmidt 2014, Kah et al. 2013, Lu und Kujanpää 2013). Ein wesentliches Merkmal derartiger Prozesse ist der große Abstand zwischen dem Laserbearbeitungskopf mit einer Galvanometerscanner-Optik und

der tatsächlichen Prozesszone. Im Vergleich zum herkömmlichen Laserstrahlschweißen ist diese Technologie mit einer Reihe von Vorteilen verbunden, z.B. mit einer großen 2D- und 3D-Flexibilität, hohen Prozessgeschwindigkeiten sowie einer schnellen Laserstrahlpositionierung zwischen aufeinanderfolgenden Schweißpositionen. Um diese Vorteile optimal nutzen zu können, muss bei der Realisierung von Remote-Laserstrahlschweißprozessen häufig auf eine lokale Schutzgaszufuhr verzichtet werden. Daraus können störende, mit fortschreitender Prozesszeit stärker werdende Wechselwirkungen zwischen den im Strahlengang verbleibenden Schweißrauchen und der einfallenden Laserstrahlung resultieren, welche Schweißnahtqualität, Prozesszuverlässigkeit und Einschweißtiefe negativ beeinflussen können (siehe z.B. Greses et al. 2004, Michalowski et al. 2007, Shcheglov et al. 2013).

Es wird angenommen, dass die im Experiment beobachteten Effekte in erster Linie durch Wechselwirkungen in Form von Absorption und Streuung der einfallenden Laserstrahlung an den feinen und ultrafeinen Partikeln in der Schweißrauchfahne hervorgerufen werden (Kawahito et al. 2008). Dies kann zu signifikanten Schwankungen der einfallenden Laserstrahlleistung auf der Werkstoffoberfläche führen und entsprechend die Einschweißtiefe im Verlauf der Naht in kaum vorhersagbarer Weise reduzieren. Folglich kommt es zu einer Verringerung der Schweißnahtqualität und zur Entstehung von Schweißnahtfehlern. Die genannten Effekte werden vor allem beim Einsatz moderner hochbrillanter Festkörperlaser als Energiequellen für das Laserstrahlschweißen beobachtet. Diese Laserarten sind z.B. aufgrund ihrer hohen Stahlqualität und ihrer Faserführbarkeit vorteilhaft im Vergleich zu CO<sub>2</sub>-Lasern einsetzbar und bestens für Remote-Laserstrahlschweißanwendungen geeignet. Allerdings ist Festkörperlaserstrahlung aufgrund der kurzen Emissionswellenlänge im Bereich um 1 µm wesentlich empfindlicher für Streueffekte (siehe z.B. Matsunawa und Ohnawa 1991, Kapadia et al. 1996). Folglich müssen Maßnahmen ergriffen werden, um störende Wechselwirkungen zwischen der Laserstrahlung und den Schweißrauchen zu verhindern. Ein einfacher Ansatz zur Erreichung dieses Ziels ist, die Schweißrauche aus dem Strahlengang der einfallenden Laserstrahlung mit einem Gebläse bzw. Ventilator herauszublasen. Jedoch kann diese Lösung nicht in einfacher Weise im Rahmen der industriellen Serienfertigung angewendet werden, da die Schweißrauche auch in definierter Weise aus der Bearbeitungsstation entfernt werden müssen, um eine potenziell gesundheitsgefährdende Kontamination der Luft am Arbeitsplatz sowie eine Verschmutzung optischer Elemente und zugänglicher Oberflächen im Bearbeitungsraum bzw. der bearbeiteten Bauteile zu vermeiden. Aus diesem Grund ist es erforderlich, Gesamtkonzepte für eine effektive Luftströmungskontrolle in Bearbeitungsstationen für Remote-Laserstrahlschweißanwendungen zu entwickeln und umzusetzen, um den genannten Anforderungen zu genügen.

Das vorrangige Ziel der hier beschriebenen Untersuchungen war entsprechend die Entwicklung erfolgversprechender Konzepte für eine optimierte Luftströmungsführung in Bearbeitungsstationen für industrielle Remote-Laserstrahlschweißanwendungen. Die erarbeiteten Lösungen sollen die Stabilität der Schweißprozesse gewährleisten und die resultierenden Schweißnahtqualitäten steigern. Gleichzeitig sind die entwickelten Konzepte darauf ausgerichtet, die Einhaltung der Grenzwerte für Gefahrstoffe in der Luft am Arbeitsplatz zu erleichtern bzw. potenzielle Gefahrstoffkontaminationen zu vermeiden. Schließlich soll die Umsetzung der Konzepte dazu beitragen, den für die Reinigung von optischen Komponenten bzw. der Bearbeitungsstationen erforderlichen Aufwand deutlich zu senken bzw. die Reinigungs- und Wartungsintervalle signifikant zu verlängern. Es ist offensichtlich, dass eine effektive Luftströmungsführung einen wichtigen Beitrag zur Senkung der Produktionskosten leisten kann. Die genannten Aspekte wurden mit Hilfe einer Kombination aus theoretischen und experimentellen Untersuchungen adressiert. Die durchgeführten Experimente geben Auf-

schluss über die grundlegenden Anforderungen an einen zuverlässigen Laserstrahlschweißprozess mit maximierten Einschweißiefen, während die theoretischen Arbeiten Einsichten in die komplexen Verhältnisse und Abhängigkeiten im Zusammenhang mit der Kontrolle der Luftströmungen im Bearbeitungsraum bei Remote-Laserstrahlschweißanwendungen liefern.

## Experimentelle Arbeiten

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden zunächst die wesentlichen Abhängigkeiten zwischen den Prozessparametern, den Luftströmungsbedingungen und den Schweißergebnissen ermittelt. Zu diesem Zweck wurde eine Versuchsanlage aufgebaut, mit der praktische Laserstrahlschweißversuche unter definierter Variation der Luftströmungsverhältnisse durchgeführt werden konnten. Diese Versuchsanlage ist in Abb. 1 dargestellt (Außen- und Innenansicht). Sie hat ein Volumen von etwa 1,6 m<sup>3</sup> und ist mit einer Reihe von justierbaren Strömungsführungskomponenten ausgestattet. Dazu gehören lokale und globale Flachstrahldüsen für die Luftzufuhr, lokale und globale Ablufffassungseinrichtungen sowie ein sog. Airknife zum Schutz der Bearbeitungsoptik vor Verschmutzung. Jede dieser Komponenten erlaubt diverse Einstellungen hinsichtlich der räumlichen Position und Ausrichtung sowie des hindurchtretenden Volumenstroms. Die lokalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Anlage können mit Hitzdrahtsensoren (thermischen Anemometern) bestimmt werden. Mit einer einfachen Videokamera können die Schweißrauchfahnen direkt beobachtet werden. Weiterhin wurde ein Stereokamerasystem zur Prozessbeobachtung an den Versuchsaufbau adaptiert, mit welchem sich die Trajektorien (Flugbahn und Geschwindigkeit) der Schweißspritzer für die jeweils eingestellten Luftströmungsverhältnisse ermitteln lassen. Zusätzlich wurde in den Aufbau eine Möglichkeit zur Messung der massen- und anzahlbezogenen Partikelgrößenverteilung in der erfassten Prozessabluft mittels eines elektrischen Niederdruckkaskadenimpaktors (ELPI<sup>TM</sup>, Dekati Inc., Finnland) integriert. Mit diesem Gerät wurden die Auswirkungen der während der Schweißversuche durchgeführten Änderungen der Luftströmungsverhältnisse auf die erfassten Prozessemissionen bewertet.

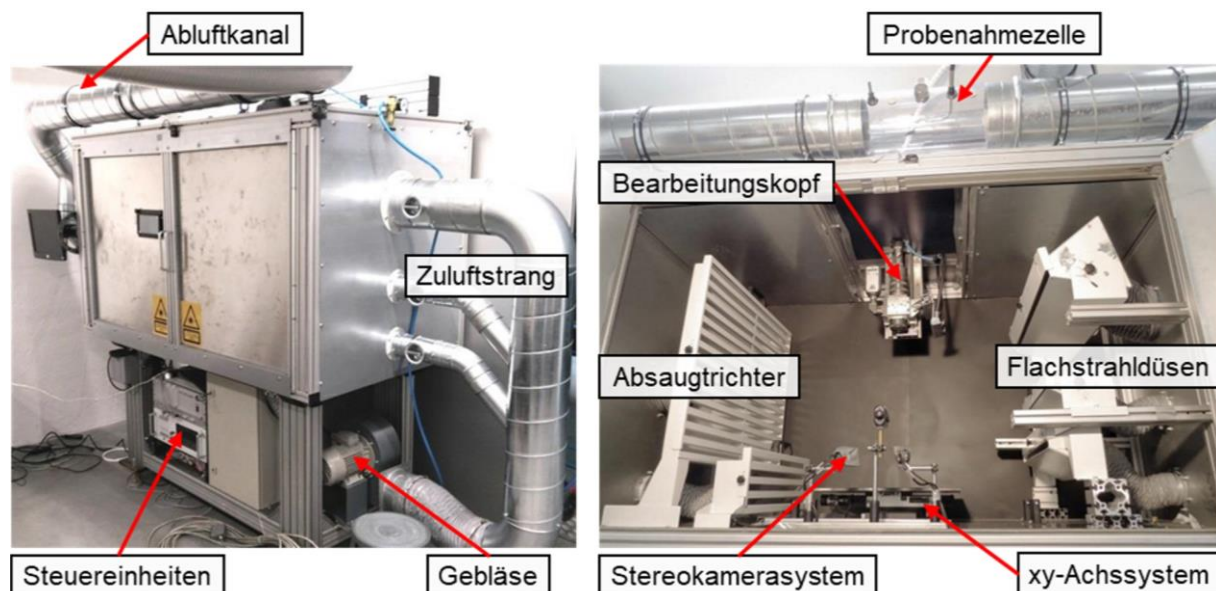


Abb. 1: Für Laserstrahlschweißversuche aufgebaute Versuchsanlage mit verschiedenen Komponenten für eine gezielten Luftströmungsführung (links: Außenansicht, rechts: Innenansicht) (siehe auch Hustedt et al. 2016).

Unter Verwendung eines Multimode-Faserlasers mit einer optischen Ausgangsleistung von 4 kW und einem Fokusbereich von 300 µm wurden auf 10 mm dicken Proben von Baustahl 1.0036 Blindschweißnähte erzeugt. Für diese Experimente wurden verschiedene Konfigurationen der installierten Zuluft- und Abluftkomponenten getestet, um die Auswirkungen der geänderten Luftströmungsverhältnisse auf Prozessstabilität und Einschweißtiefe zu evaluieren. Im Vergleich zu einem Prozess ohne Luftströmungen in der Kabine konnte über die Luftströmungsführung eine Steigerung der Einschweißtiefe auf ca. 250% erreicht werden. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass Luftströmungsgeschwindigkeiten von 1 – 2 m/s wenige Zentimeter oberhalb der Prozesszone ausreichend sind, um die unter diesen Versuchsbedingungen maximal mögliche Einschweißtiefe zu erzielen. Dagegen führten Luftströmungsgeschwindigkeiten unterhalb von 1 m/s zu einem instabilen Schweißprozess mit verringerten und schwankenden Einschweißstiefen entlang der Schweißnaht. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Höhe der Schweißrauchfahne im Strahlengang einen wesentlichen Einfluss auf die Einschweißtiefe hat. Für die gegebene Schweißkonfiguration ist demnach eine Schweißrauchfahne bis zu einer Höhe von ca. 15 cm über der Prozesszone weitgehend tolerierbar und führt zu keiner nennenswerten Beeinflussung der Einschweißtiefe. Übersteigt die Höhe der Schweißrauchfahne diesen Wert, kann es allerdings zu stark störenden Wechselwirkungen mit der Laserstrahlung und zu einer deutlichen Verringerung der Einschweißtiefe kommen. In Abb. 2 sind Aufnahmen von Schweißprozessen ohne und mit eingeschalteter Kabinenströmung sowie die zugehörigen Querschliffbilder der generierten Schweißnähte gezeigt.

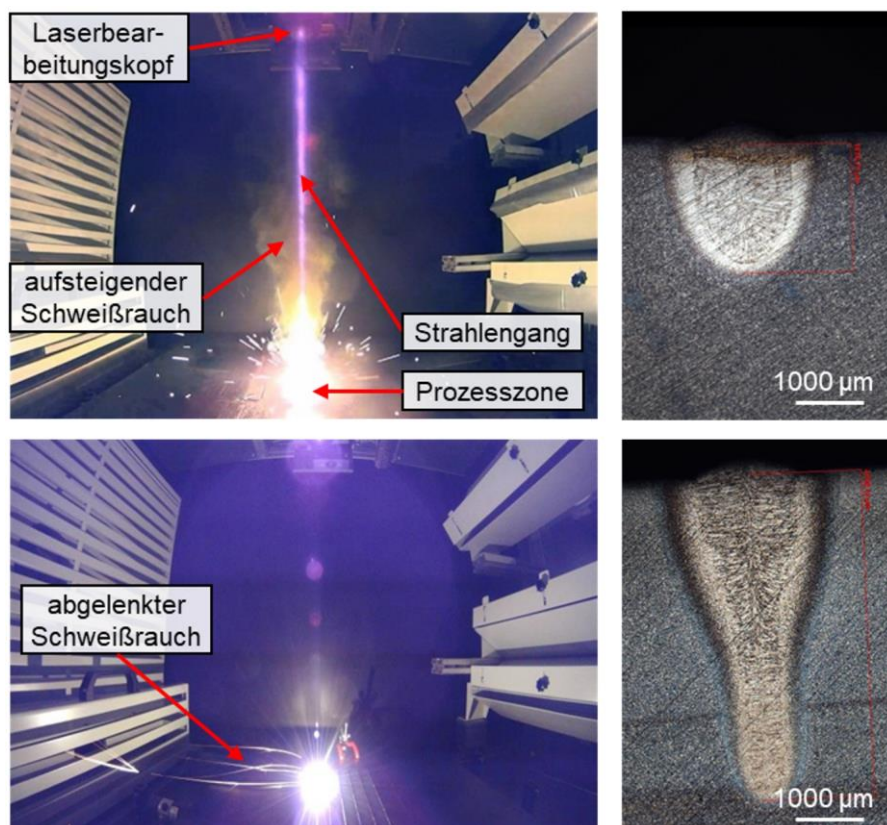


Abb. 2: Ausbreitung der Schweißrauche im Bearbeitungsraum (links, oben: ohne zusätzliche Luftströmung, unten: mit mäßiger Luftströmung quer zur Richtung des Laserstrahls) sowie mikroskopische Querschliffbilder der zugehörigen Schweißnähte (rechts). Laserstrahlleistung 3 kW, Fokusbereich ~ 300 µm, Vorschubgeschwindigkeit 2 m/min, Material Baustahl (Hustedt et al. 2016).

Anhand der mittels ELPI™ ermittelten anzahlbezogenen Partikelgrößenverteilung wird ersichtlich, dass im Schweißrauch ein relativer Anteil von 80 bis 90% an feinen und ultrafeinen Partikeln mit aerodynamischen Durchmessern unter 300 nm enthalten ist. Diese Erkenntnis stützt die Hypothese, dass die Rayleigh-Streuung durch feine und ultrafeine Partikel den Hauptmechanismus der störenden Wechselwirkungen zwischen Laserstrahlung und Schweißrauch darstellt. Die Absorption durch die Partikel überwiegt im Fall des Elements Eisen (siehe z.B. Bohren und Huffmann 1998, Scholz et al. 2015, Walter et al. 2016) bei Partikelgrößen unterhalb von etwa 90 nm. Die feinen und ultrafeinen Partikel in der Rauchfahne können aufgrund ihrer geringen Masse bzw. Trägheit durch Einsatz lokaler Zuluft- und Abluftkomponenten leicht aus dem Strahlengang des Laserstrahls verdrängt werden.

## Numerische Untersuchungen

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben wichtige Erkenntnisse über die Voraussetzungen bzw. Bedingungen für einen stabilen Remote-Laserstrahlschweißprozess ergeben. Es konnten die relevanten Interaktionen zwischen der Laserstrahlung und den Schweißrauchen und die Vorzüge einer gezielten Luftströmungsführung im Bearbeitungsraum im Hinblick auf Einschweißtiefe und Schweißnahtqualität aufgezeigt werden. Allerdings ist die Zahl der Schweißversuche, die zur Erlangung eines umfassenden und hinreichend detaillierten Bildes bzgl. der existierenden Einflüsse auf die Strömungsverhältnisse erforderlich ist, aufgrund der Vielzahl relevanter geometrischer und anderer Parameter außerordentlich groß. Dabei sind die einzelnen Versuche und Auswertungen infolge der immer wieder neu vorzubereitenden Werkstückproben und durchzuführende Blindschweißungen bei gleichzeitiger Aufnahme und Analyse des Prozesses mittels Videosequenzen, Emissionsmessungen und Schliffbildern sehr zeitaufwändig und damit teuer. Aus diesem Grund wurde auf die Möglichkeit der Durchführung systematischer numerischer Untersuchungen zurückgegriffen. Es wurde ein numerisches Modell der Versuchskabine entwickelt, um im Rahmen virtueller Parameterstudien optimale Einstellungen für die Vielzahl relevanter Parameter der Komponenten zur Luftströmungsführung numerisch berechnen zu können.

Das entwickelte 3D-Modell wurde mit dem kommerziellen Softwarepaket ANSYS CFD (Computational Fluid Dynamics) erstellt. Es bietet nützliche Features wie parametrisierte und automatisierte Routinen für (i) Geometrie und Netzerzeugung, (ii) die numerische Lösung des zugrundeliegenden partiellen Differentialgleichungssystems in Bezug auf Geschwindigkeit, Druck, Temperatur, Konzentration und Turbulenzvariablen und (iii) die Verarbeitung von Parametervariationen. Beispielhaft zeigt Abb. 3 das Geschwindigkeitsfeld an der Symmetrieebene für verschiedene Zuluftkonstellationen. In allen Fällen werden die Prozessemissionen als Metaldampf-Massenströme betrachtet, die aus dem durch die Laserstrahlung induzierten Keyhole freigesetzt werden. Der jeweilige Wert des Massenstroms kann als freier Modellparameter betrachtet werden, um Anpassungen des Modells an reale Schweißexperimente zu ermöglichen. Als Kriterium für die Wirksamkeit der virtuell eingestellten Luftströmung wurde die Höhe der Metaldampffahne parallel zur Laserstrahlachse, definiert als der 1%-Wert der Metaldampfkonzentration, verwendet.

Zunächst wurde zur Identifizierung der Haupteinflussgrößen eine Screening-Versuchsreihe, die auf einem Minimum-Run-Design zur Beschränkung der Zahl der erforderlichen „numerischen Experimente“ auf ein Minimum basiert, mit 19 Faktoren der Luftströmungsführung auf jeweils 2 Stufen durchgeführt. Als Ergebnis wurden 6 Faktoren als die wichtigsten Parameter der Luftströmungsführung identifiziert. Die funktionellen Abhängigkeiten zwischen diesen Größen wurden mit einem detaillierteren Design-of-Experiments-Ansatz (DoE-Ansatz) mit



höherer Ordnung untersucht. Das abgeleitete kubische Regressionsmodell zeigte mehr als 40 signifikante Effekte und Wechselwirkungen, was die Komplexität des betrachteten Problems unterstreicht. Es ist eine der wichtigsten Stärken einer DoE-Analyse, dass die Beziehungen zwischen Steuerungsparametern (Faktoren) und abhängigen Variablen (Antworten) durch ein solches Regressionsmodell angenähert werden können. Dieses Modell kann anschließend eingesetzt werden, um Zielgrößenwerte für bestimmte Parametereinstellungen vorherzusagen und umgekehrt geeignete Parameterkonstellationen zu identifizieren, mit denen vordefinierte Werte der Zielgrößen zu erreichen sind. Der numerische Aufwand für eine solche Analyse ist viel weniger zeitaufwändig als die entsprechenden vollständigen Simulationen der Luftströmungsverhältnisse bei vorgegebenen Randbedingungen.

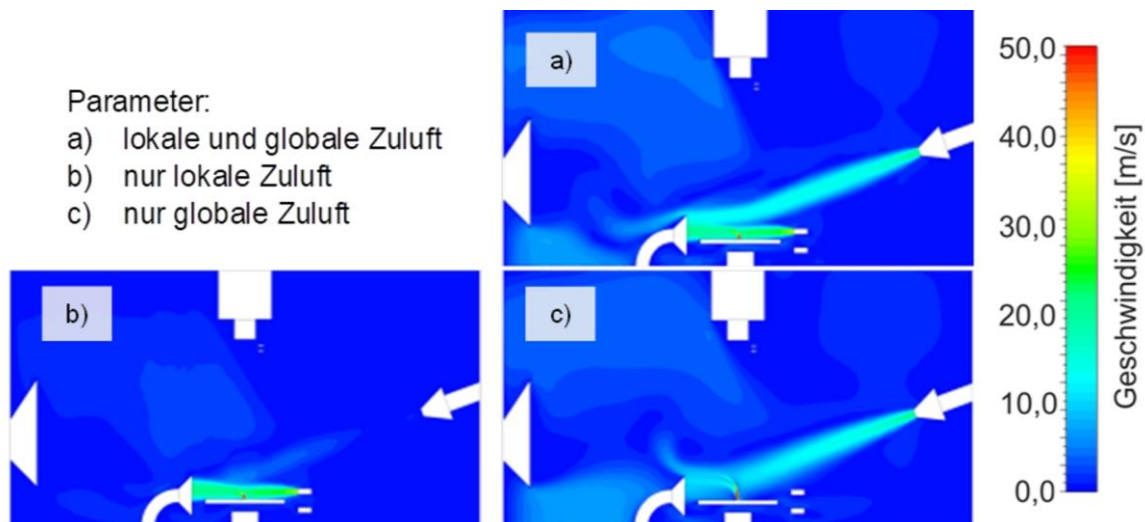


Abb. 3: Ergebnisse der numerischen Analyse der Strömungsverhältnisse in der Versuchsanlage unter Berücksichtigung verschiedener Einstellungen der Strömungsführungskomponenten (Hustedt et al. 2016, Borkmann et al. 2016).

### Konzept der räumlichen Trennung

Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen wurde ein Konzept für die Strömungskonfiguration entwickelt, welches auf einer räumlichen Trennung der Prozesszone vom verbleibenden Teil der Laserbearbeitungskabine beruht. Durch die Anpassung von aufeinander abgestimmten lokalen Zuluft- und Abluftströmungen unterhalb und oberhalb dieser Trenneinheit kann das gesamte Luftströmungssystem deutlich kleiner dimensioniert werden als solche, die typischerweise aktuell in der Industrie zum Einsatz kommen. Zu begründen ist das damit, dass zum einen ein deutlich geringeres Luftvolumen durch die Luftströmung gereinigt werden muss und zum anderen störende Turbulenzen in der Kabinenluft signifikant reduziert werden. Wenn das beschriebene System optimal eingestellt ist, kann im Idealfall auf die globale Luftströmung für die Reinigung der gesamten Kabine verzichtet werden. Um die Interaktion zwischen der Zuluftströmung und der Abluftströmung zu untersuchen und die generelle Funktion und die Effizienz des beschriebenen Konzepts der räumlichen Trennung zu demonstrieren, wurden zwei industrielle Laserstrahlschweißprozesse bei Partnerunternehmen neu eingestellt. Zum einen wurden bei Coherent-ROFIN Schweißversuche mit einer industriellen Spannvorrichtung der Bergmann & Steffen GmbH durchgeführt, welche mit der räumlichen Trenneinheit ausgerüstet wurde (Abb. 4). Zum anderen wurde ein industrieller Schweißprozess der Robert Bosch GmbH neu eingestellt und mit einer modifizierten räumlichen Trennung ausgestattet. Für beide Prozesse wurden mehrere Konfigurationen der Strömungskomponenten positiv getestet.

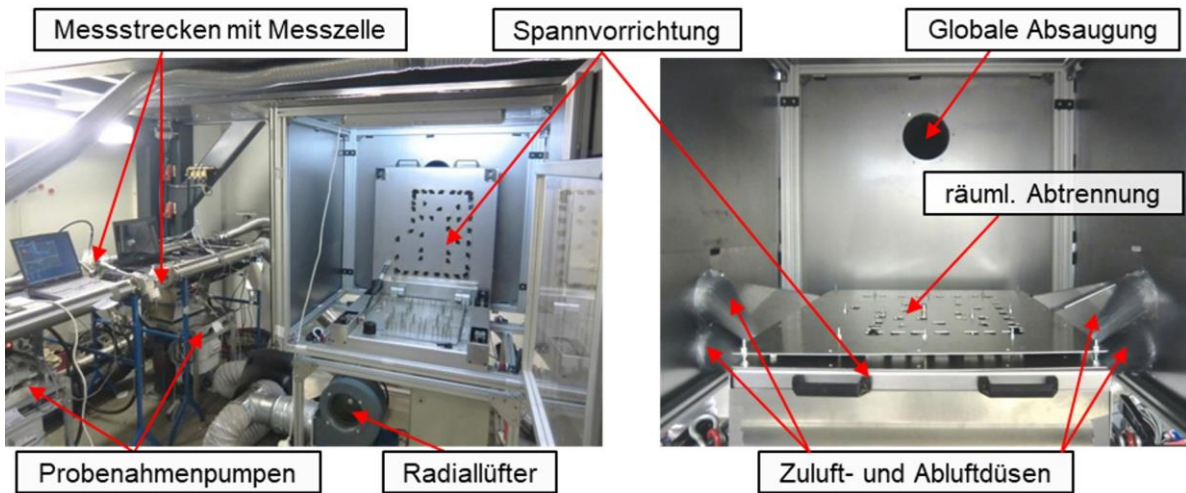


Abb. 4: Experimenteller Aufbau im industriellen Umfeld bei Coherent-Rofin zur Evaluierung eines industriellen Spannsystems für eine Remote-Laserstrahlschweißanwendung der Bergmann & Steffen GmbH in Kombination mit der zu beurteilenden räumlichen Trenneinheit (nach Hustedt 2016).

## Fazit

Die hier beschriebenen Arbeiten haben dazu beigetragen, die Kenntnisse über Probleme und Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Remote-Laserstrahlschweißen beträchtlich zu vertiefen. So haben die angewandten experimentellen Techniken wichtige Einblicke in den Wechselwirkungsmechanismus zwischen der Laserstrahlung und den Schweißrauch ermöglicht. Im Ergebnis wurden die am stärksten relevanten technischen Voraussetzungen für zuverlässige Remote-Laserstrahlschweißprozesse identifiziert. Die durchgeführten numerischen Analysen zeigten die Komplexität der inhärenten Abhängigkeiten hinsichtlich einer effizienten Luftströmungsführung. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Trial-and-Error-Ansätze nicht geeignet sind, um optimale Lösungen für die Problemstellung zu finden und allen Herausforderungen gerecht zu werden, denen sich potenzielle Anwender der Remote-Laserstrahlverarbeitung zu stellen haben. Allerdings lassen sich allgemeine Regeln und Empfehlungen für industrielle Anwender nur in begrenztem Umfang ableiten, da die Charakteristika der einzelnen Bearbeitungsstationen, die räumlichen Gegebenheiten, die Art der eingesetzten Luftströmungskomponenten und die Besonderheiten der spezifischen Schweißanwendungen für eine gründliche Analyse im Detail zu berücksichtigen sind.

## Dankesworte

Das IGF-Vorhaben 18149 BG/1 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 und numerischen Untersuchungen.

## Literatur

- Oefele, F., 2012:** „Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen“, Dissertationsschrift, Technische Universität München, München (Germany), 218 Seiten.
- Fysikopoulos, A., Pastras, G., Stavridis, J., Stavropoulos, P., Chryssolouris, G., 2016:** „On the performance evaluation of remote laser welding process: an automotive case study“, *Procedia CIRP*, 41, 969-974.
- Roos, C., Schmidt, M., 2014:** „Remote laser welding of zinc-coated sheets in an edge lap configuration with zero gap“, *Physics Procedia*, 56, 535-544.
- Kah, P., Lu, J., Martikainen, J., Suovanta, R., 2013:** „Remote laser welding with high power fiber lasers“, *Engineering*, 5, 700-706.
- Lu, J., Kujanpää, V., 2013:** „Review study on remote laser welding with fiber lasers“, *J. Laser Applications*, 25 (3), Artikel Nr. 052008 (7 Seiten).
- Greses, J., Hilton, P.A., Barlow, C.Y., Steen, W.M., 2004:** „Plume attenuation under high power Nd:YAG-aluminum-garnet laser welding“, *J. Laser Appl.*, 16 (1), 9-15.
- Michalowski, A., Heß, A., Ruß, A., Dausinger, F., 2007:** „Plume attenuation under high-power Yb:YAG laser material processing“, *Proc. 4<sup>th</sup> Int. WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM 2007)*, München, 357-361.
- Shcheglov, P.Y., Gumenyuk, A.V., Gornushkin, I.B., Rethmeier, M., 2013:** „Vapor-plasma plume investigation during high-power fiber laser welding“, *Laser Physics*, 23, Artikel Nr. 016001 (7 Seiten).
- Kawahito, Y., Kinoshita, K., Matsumoto, N., Mizutani, M., Katayama, S., 2008:** „Effect of weakly ionized plasma on penetration of stainless steel weld produced with ultra-high power density fibre laser“, *Science and Technology of Welding and Joining*, 13 (8), 749-753.
- Matsunawa, A., Ohnawa, T., 1991:** „Beam-plume interaction in laser material processing“, *Transactions of JWRI*, publ. by Welding Research Institute of Osaka University, 9-15.
- Kapadia, P., Dowden, J., Ducharme, R., 1996:** „A mathematical model of ablation in the keyhole and droplet formation in the plume in deep penetration laser welding“, *Proc. Int. Conference on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 1996*, Section B, 106-115.
- Bohren, C. F., Huffman, D. R., 1998:** „Absorption and Scattering of Light by Small Particles“, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
- 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), 032001.
- Walter, J., Hennigs, C., Brodeßer, A., Hustedt, M., Kaierle, S., Borkmann, M., Mahrle, A., Beyer, E., 2016:** „Luftströmungsführung in Bearbeitungsstationen zum Remote-Laserstrahlschweißen – Teil 1: Experimente zur Anlagenoptimierung“, 24. Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“, Cottbus.
- Hustedt, M., Hennigs, C., Brodeßer, A., Mahrle, A., Borkmann, M., 2016:** „Steigerung der Prozessstabilität und Schweißnahtqualität beim Remote-Laserschweißen durch gezielte Strömungsführung mittels Anlagenadaption (RemoStAad)“. Abschlussbericht AiF-IGF-Vorhaben Nr. 18149 BG/1, Hannover/Dresden.
- Borkmann, M., Mahrle, A., Beyer, E., Hennigs, C., Hustedt, M., Walter, J., Kaierle, S., 2016:** „Luftströmungsführung in bearbeitungsstationen zum Remote-Laserstrahlschweißen – Teil 2: Simulationen zur Anlagenoptimierung“, 24. Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“, Cottbus.