

## Luftströmungsführung in Bearbeitungsstationen zum Remote- Laserstrahlschweißen – Teil 1: Experimente zur Anlagenoptimierung

### Air flow control in processing stations for remote laser beam welding – Part 1: Experiments for system optimization

Jürgen Walter<sup>a</sup>, Christian Hennigs<sup>a</sup>, Alexander Brodesser<sup>a</sup>, Michael Hustedt<sup>a</sup>,  
Stefan Kaiерle<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, Schweißrauche, Luftströmungsführung,  
Einschweißstiefensteigerung, industrielle Anwendung, Prozessstabilität  
Remote laser welding, welding fumes, air flow control, welding depth increase,  
industrial application, process stability

#### Zusammenfassung

Laserstrahlschweißprozesse, vor allem mit langer Brennweite und entsprechend großem Arbeitsabstand, sind stark von den Strömungsbedingungen im Bearbeitungsraum abhängig. Der Grund dafür ist in den erzeugten Prozessemissionen zu finden, welche bei nicht optimal aufeinander abgestimmten Zuluft- und Abluftsystemen zum einen die Einschweißtiefe und die Schweißnahtqualität reduzieren und zum anderen den Wartungs- und Reinigungsaufwand für die Anlagen- und Kabinentechnik erhöhen.

Grundlegende Einflussfaktoren der Strömungstechnik auf den Laserschweißprozess mit großem Arbeitsabstand werden nachfolgend näher untersucht. Darauf aufbauend wird ein Konzept vorgestellt, welches bei einem geringen konstruktiven Aufwand und einer reduzierten erforderlichen Zuluft- und Absaugleistung die genannten Defizite signifikant vermindern soll. Schlüssel hierzu ist eine konstruktive Abtrennung des Prozessbereiches von dem Raum mit den optischen Komponenten unter Einsatz angepasster Strömungstechnik.

#### Einleitung

Bei Laserstrahlschweißprozessen, insbesondere in Form von Remote-Prozessen, kann es aufgrund von undefinierten bzw. nicht optimal ausgelegten Strömungsverhältnissen im Bearbeitungsraum zu signifikanten Einschweißstiefenreduktionen oder zu einem fluktuierenden Prozess mit schwankenden Einschweißstiefen kommen. Diese Effekte sind eindeutig auf die Wechselwirkung der Laserstrahlung mit den aus der Prozesszone freigesetzten partikel-förmigen Prozessemissionen zurückzuführen (Greses et al. 2004, Michalowski et al. 2007, Kawahito et al. 2009, Shcheglov et al. 2011, Scholz et al. 2015).

Erste experimentelle und theoretische Untersuchungen zeigten, dass sowohl globale als auch lokale Zuluft- und Abluftsysteme zum effektiven Freihalten des Strahlengangs von emittiertem Rauchen erforderlich sind, um so Störungen durch Rayleigh-Streuung und Absorption an kleinen Partikeln im Strahlengang zu minimieren. Weiterhin konnte die Relevanz eines Verhältnisses der Volumenströme von Zuluft und Abluft  $< 1$  bestätigt werden. Nur unter

dieser Bedingung lassen sich die unkontrollierte Verteilung der Rauche in der Kabine infolge von Strömungsturbulenzen sowie das Entweichen von Emissionen aus der Bearbeitungskabine durch den entstehenden Überdruck vermeiden (Walter et al. 2015).

Ziel der nachfolgend beschriebenen experimentellen Arbeiten war die Bestimmung der Einflussfaktoren auf die Effizienz der Emissionserfassung und die Ableitung gezielter Maßnahmen zur Minimierung der beschriebenen Effekte, welche letztlich zu einer Erhöhung der Schweißnahtqualität und Prozesseffizienz führen. Darüber hinaus kann auf diese Weise die Reinhaltung der eingesetzten Bearbeitungsoptiken sowie der Raumluft und der zugänglichen Oberflächen unter arbeitsschutzrechtlichen Vorgaben erleichtert werden. Die beschriebenen Untersuchungen erfolgten parallel zu numerischen Simulationen zur Anlagenoptimierung (Borkmann et al. 2016).

### **Einfluss von Streuung und Absorption durch die Partikel in der Rauchfahne auf die Intensität der Laserstrahlung**

Wie bereits in (Walter et al. 2015) anhand eines Blindschweißprozesses mit einem cw-Faserlaser an Baustahl (S235JR) gezeigt wurde, sind in der Rauchfahne sehr viele kleine Partikel mit Durchmessern im Nanometerbereich enthalten. So hat die Messung mit einem elektrischen Niederdruck-Kaskadenimpaktor (ELPI) in der Prozessabluft bei einem aerodynamischen Partikeldurchmesser von etwa 200 nm ein Maximum der Anzahlhäufigkeit ergeben. Es ist zu erwarten, dass in unmittelbarer Nähe der Prozesszone die Partikel im Mittel noch kleiner sind, da mit zunehmender Entfernung von der Prozesszone ein fortgesetztes Partikelwachstum bzw. eine Partikelagglomeration und folglich eine Vergrößerung des mittleren aerodynamischen Durchmessers stattfinden sollte. In verschiedenen Publikationen sind Durchmesser der Primärpartikel in der Rauchfahne von Laserschweißprozessen mit Nahinfrarotlasern in der Größenordnung von 15 bis 50 nm zu finden (Becker et al. 1998, Greses et al. 2004, Shcheglov et al. 2011, Odachi et al. 2013, Scholz et al. 2015). Geht man von der Rayleigh-Näherung für Partikel mit Dimensionen deutlich kleiner als die Wellenlänge der wechselwirkenden Strahlung aus, so kann man das Verhältnis von Streuung und Absorption durch kleine Partikel in der Rauchfahne abschätzen. Gemäß Bohren et al. (1998) lassen sich Streu- ( $\sigma_{sca}$ ) und Absorptionsquerschnitt ( $\sigma_{abs}$ ) in der Rayleigh-Näherung mit Hilfe der Gleichungen (1) und (2) als Funktion des Partikelradius berechnen. Dabei ist  $\lambda_L$  die Wellenlänge der wechselwirkenden Strahlung.  $n_P$  bezeichnet den komplexen Brechungsindex und  $r_P$  den Radius der Partikel in der Rauchfahne.

$$\sigma_{sca} = \frac{8\pi}{3} \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda_L}\right)^4 \cdot r_P^6 \cdot \left| \frac{n_P(\lambda_L)^2 - 1}{n_P(\lambda_L)^2 + 2} \right|^2 \quad (1)$$

$$\sigma_{abs} = \frac{8\pi^2}{\lambda_L} \cdot r_P^3 \cdot \text{Im} \left\{ \frac{n_P(\lambda_L)^2 - 1}{n_P(\lambda_L)^2 + 2} \right\} \quad (2)$$

Die Abschwächung  $I/I_0$  der wechselwirkenden Strahlung erhält man prinzipiell ausgehend von Gleichung (3) mit der Anzahldichte  $\rho_N(r_P)$  der Partikel mit dem Radius  $r_P$  sowie der Weglänge  $L$  der Laserstrahlung durch die Rauchfahne.

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\rho_N(r_P) \cdot [\sigma_{sca}(r_P) + \sigma_{abs}(r_P)] \cdot L} \quad (3)$$

Setzt man gemäß (Ordal 1988) für den Realteil des komplexen Brechungsindex von Eisen (bei einer Wellenlänge von 1070 nm)  $n_r = 3,24$  und für den Imaginärteil  $\kappa = 4,34$  in die

Gleichungen (1) und (2) ein, so ergibt sich nach Abb. 1, dass oberhalb eines aerodynamischen Durchmessers von etwa 180 nm in erster Linie eine Strahlabschwächung durch Streuung stattfindet, während für kleinere Durchmesser die Absorption überwiegt. Dabei ist für größere Partikeldurchmesser die Rayleigh-Näherung nicht mehr ohne weiteres anwendbar, d.h. es findet ein Übergang zur Mie-Streuung statt. Entsprechend der zu erwartenden Veränderung der aerodynamischen Partikeldurchmesser mit wachsendem Abstand von der Prozesszone sollte die Abschirmung der Laserstrahlung vor allem im unteren Bereich der Rauchfahne durch Absorption hervorgerufen werden, wo die Partikel und Partikelagglomerate noch klein sind. Allerdings werden die Verhältnisse außer durch die Partikelagglomeration auch durch die mit wachsendem Abstand von der Prozesszone fortschreitende Oxidation der Eisenpartikel durch den Luftsauerstoff im Bearbeitungsraum verändert. Aufgrund der beschriebenen Effekte ist eine quantitative Berechnung der Abschwächung der Laserstrahlung sehr aufwändig und wird hier nicht durchgeführt.

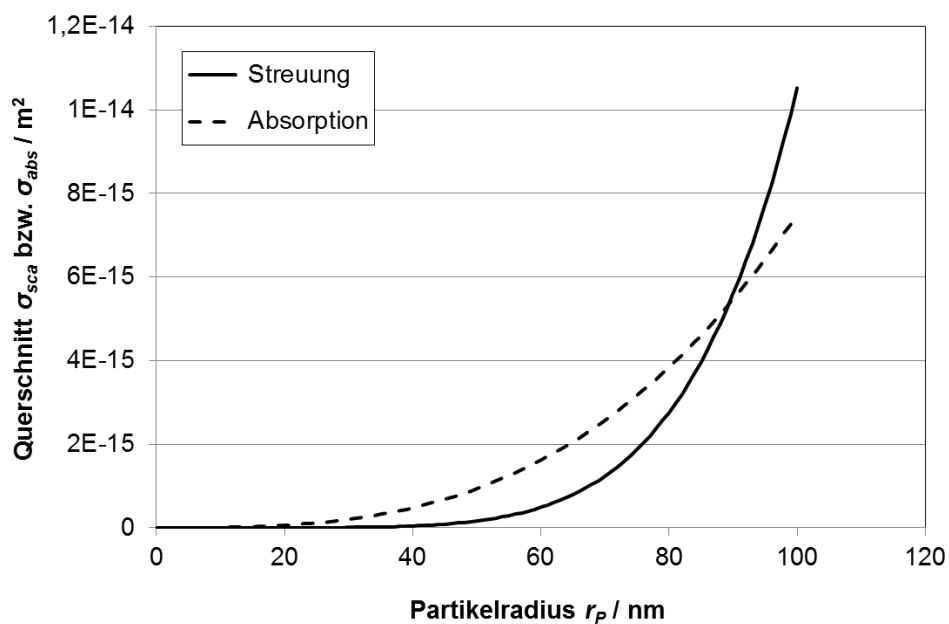


Abb. 1: Vergleich des Streu- und Absorptionsquerschnitts von Eisenpartikeln mit dem komplexen Brechungsindex  $n = n_r + ik$  mit  $n_r = 3,24$  und  $\kappa = 4,34$  (Ordal 1988) als Funktion des Partikelradius für Laserstrahlung der Wellenlänge 1070 nm.

### Versuchsreihen mit der Modellversuchsanlage: Bestimmung von Einflussfaktoren auf die Einschweißtiefe und Schweißprozessstabilität

Zur Beurteilung der Effizienz von erzeugten Strömungen im Bearbeitungsraum oberhalb der Schweißprozesszone wurde eine vereinfachte Modellversuchsanlage aufgebaut und mit variablen Zuluft- und Abluftsystemen der Fa. Fächtenkötter GmbH sowie geeigneten Messtechniken ausgestattet (Abb. 2). In diesem Fall wurde eine Festoptik für die Applikation der Laserstrahlung verwendet. Die Relativbewegung wurde durch Bewegung der zu schweißenden Proben mit einem xy-Verfahrtisch realisiert. Weiterhin wurden verschiedene Zuluft- und Ablufdüsen implementiert, die hinsichtlich ihrer Lage und Neigung sowie der Größe und des Querschnitts der Düsenöffnungen variiert werden können. Zu den Messmethoden zählen die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mittels ELPI und die Strömungsmessung mit einem thermischen Anemometer (Hitzdrahtsensor) in einer speziellen Messzelle im Abluftkanal. Außerdem lassen sich die Strömungen im Inneren der Kabine, speziell im Bereich des Laserstrahlengangs, mittels weiterer Hitzdrahtsensoren messen. Zur Beurteilung der Ablenkung und Entfernung der Rauche aus dem Strahlengang und der Kabine ist außerdem eine

optische Kamera verfügbar. Schließlich wurde speziell zur Bestimmung der Trajektorien der aus der Prozesszone geschleuderten Schweißspritzer ein stereoskopisches Kamerasystem inkl. Auswertesoftware entwickelt und in die Anlage implementiert (Walter et. al. 2015).

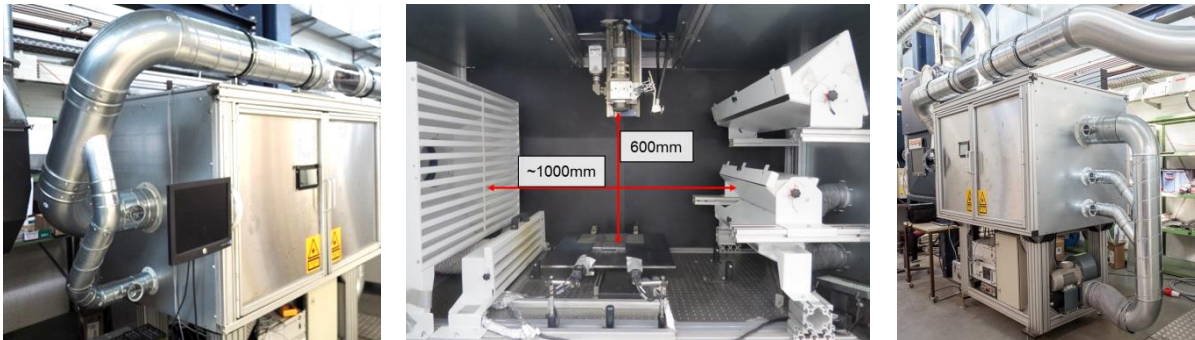


Abb. 2: Modellversuchsanlage mit verschiedenen Zuluft-, Abluft- und Messsystemen.

Die durchgeführten umfangreichen Laserstrahlschweißversuche (Blindnähte auf Baustahl mit einem Faserlaser; Ausgangsleistung: 3 kW; Brennweite: 600 mm, Festoptik, Laservorschubgeschwindigkeit 2 m/min) mit unterschiedlichen Querströmungsgeschwindigkeiten oberhalb der Prozesszone zeigten klar, dass bereits geringe Querströmungen genügen, um die Einschweißstiefen teilweise signifikant zu erhöhen und den Schweißprozess zu stabilisieren. Der Grund dafür ist in der Orientierung der Rauchfahne zur Laserstrahlung zu finden. Steigen die Prozessemissionen direkt in Strahlrichtung auf, kommt es bei dem hier gewählten Prozessaufbau über eine längere Wegstrecke zur Wechselwirkung der Strahlung mit den in der Rauchfahne enthaltenen, nach oben steigenden (ultra)feinen Partikeln in Form von Streuung und Absorption (Abb. 3, links) und folglich zu einer signifikanten Reduzierung der Einschweißtiefe (etwa um den Faktor 0,5). Wird die Rauchfahne durch eine geringe Querströmung jedoch leicht geneigt (Abb. 3, rechts), so steigt die Einschweißtiefe deutlich an, da sich die in der Rauchfahne enthaltenen Partikel nicht mehr im Strahlengang befinden und keine Abschirmung bzw. Verminderung der Laserleistungsdichte mehr erfolgt.

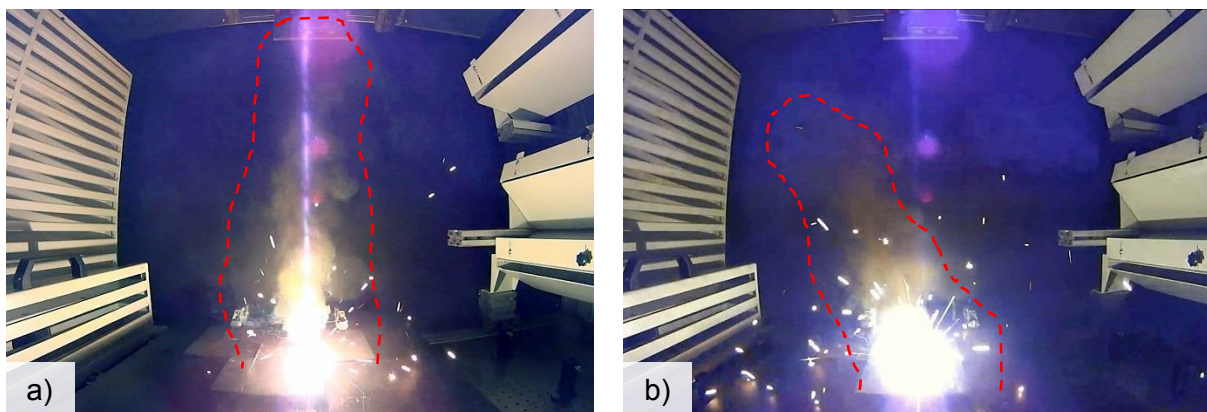


Abb. 3: a) Orientierung der Rauchfahne entlang des Laserstrahls, b) durch leichte Querströmung abgelenkte Rauchfahne.

Nähere Untersuchungen ergaben, dass bereits eine Querströmung mit einer Geschwindigkeit im Bereich des Laserstrahlengangs von etwa 1 m/min, in diesem Fall erzeugt über eine nahe der Prozesszone angeordneten Zuluftdüse, ausreicht, um sowohl die Einschweißtiefe zu maximieren als auch den Prozess zu stabilisieren. Höhere Strömungsgeschwindigkeiten sind für diesen Zweck nicht kontraproduktiv, jedoch aus energetischer Sicht nicht effizient.

Im Hinblick auf die möglichst vollständige Erfassung der Schweißrauche wurde festgestellt, dass die entstandenen Partikel vor allem dann unkontrolliert im Bearbeitungsraum verteilt werden, wenn durch eine zu starke Einstellung der Zuluft im Verhältnis zur Abluft störende Turbulenzen in der Strömung oberhalb der Prozesszone ausgebildet werden, welche die Partikel aus dem Erfassungsbereich der Ablufteinrichtung herausdrücken. Der Aufwand für die vollständige Absaugung der Schweißrauche sowie die Vermeidung von durch einen zu geringen Erfassungsgrad bedingten Folgeeffekten wie die Verschmutzung der Optiken steigt damit erheblich an. Bei einer kombinierten Strömung aus Zuluft und Abluft sollte das Zuluft-/Abluftverhältnis deutlich kleiner als Eins gewählt werden, um eine effektive Erfassung der Schweißrauche zu gewährleisten.

Aus Gleichung (3) ergibt sich unmittelbar, dass die Höhe der Rauchfahne einen entscheidenden Einfluss auf den Schweißprozess hat. Dies wurde verifiziert, indem die Rauchfahnenhöhe durch eine zwischen dem Bearbeitungskopf und der zu schweißenden Probe positionierte, höhenverstellbare Abtrennung in Form eines Blechs mit einem variablen Durchgangsloch für die Laserstrahlung gezielt eingestellt wurde (Abb. 4).

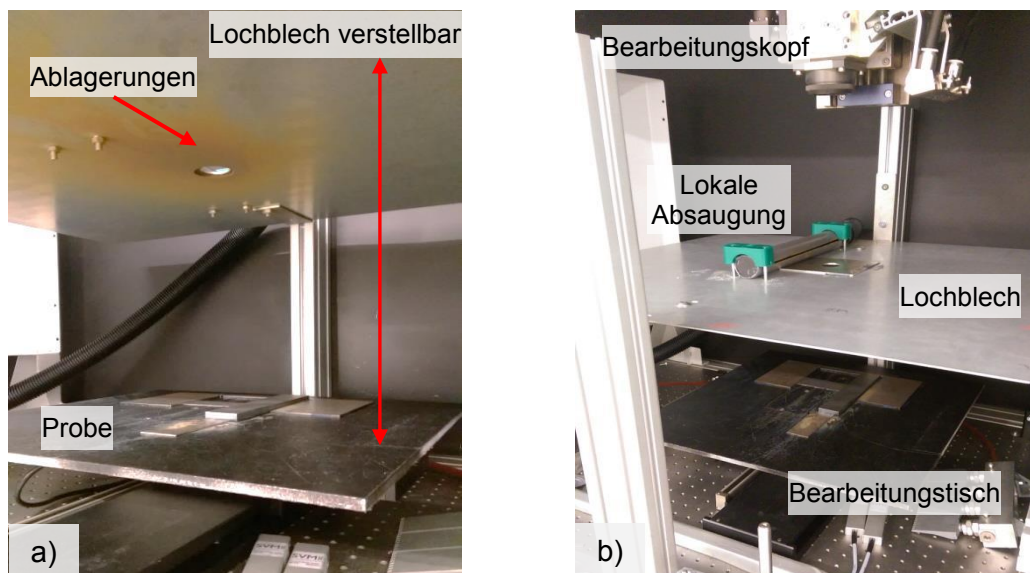


Abb. 4: Versuch zur Abschirmung der Rauchfahne. a) Ein Lochblech schirmt die entstehenden Emissionen aus der Prozesszone mit einem definierten Abstand zum Bearbeitungskopf/ Laserstrahl ab. b) Versuchsaufbau mit Lochblech und lokaler Absaugung.

Die durch das Loch strömenden Prozessemissionen wurden unmittelbar oberhalb des Bleches lokal abgesaugt. Diese Absaugung wurde so abgeschirmt, dass sie die Strömungsverhältnisse unterhalb des Bleches nicht nennenswert beeinflusste. Für den hier betrachteten Schweißprozess zeigte sich, dass bis zu einer Rauchfahnenhöhe von etwa 15 cm keine signifikante Reduzierung der Einschweißtiefe zu verzeichnen war, womit davon ausgegangen werden kann, dass sich eine Rauchfahnen säule bis zu einer bestimmten Höhe kaum störend auswirkt. Höhere Rauchfahnenhöhen führen dann jedoch zunehmend zu einer Reduzierung der Einschweißtiefe.

### Absaugkonzept mit räumlicher Abtrennung des prozessnahen Bereiches

Ausgehend von dem oben beschriebenen Aufbau wurde ein Absaugkonzept entwickelt, welches unter bestimmten Bedingungen auch bei Remote-Schweißanwendungen einsetzbar ist. Bei derartigen Prozessen ist es oftmals nicht möglich, lokale Zuluft- und Abluftdüsen für eine effiziente, praktisch vollständige Schweißraucherfassung dicht neben der Prozesszone

anzuordnen. Ziel des Absaugkonzeptes ist es, eine definierte bauliche Abtrennung zwischen dem Laserbearbeitungskopf und der Prozesszone einzurichten. Auf der prozesszugewandten Seite der Abtrennung soll durch gezielte Zuluft- und Ablufführung die für einen stabilen Prozess erforderliche Querströmung erzeugt werden. Dabei muss ein gewisser Mindestabstand der Abtrennung zur Prozesszone eingehalten werden, um einen ausreichenden Impulsübertrag auf das aus der Prozesszone strömende Material zu ermöglichen. Auf der dem Bearbeitungskopf zugewandten Seite der Abtrennung sollen möglichst keine Prozess-emissionen mehr vorhanden sein. Hierdurch soll auch die erforderliche Saugleistung signifikant reduziert werden.

Im allgemeinen Fall beinhaltet die Abtrennvorrichtung 2 Bleche, die in einem definierten Abstand parallel zueinander und quer zur Strahlrichtung angeordnet sind. Durch adaptierte Zuluft- und Absaugdüsen wird im so erzeugten Zwischenraum der Vorrichtung eine gleichmäßige Strömung generiert, um die dort hineingelagerte kontaminierte Luft abzusaugen. Gleichzeitig entsteht an den Durchgangsöffnungen für den Laserstrahl eine Sogwirkung, die dazu führt, dass nur ein sehr geringer Anteil der aufsteigenden Prozessemissionen in den Bereich oberhalb der Abtrennvorrichtung gelangt.

Für die grundlegenden Tests des Konzepts wurde ein vereinfachter Versuchsaufbau gewählt, in dem die Funktion des unteren Blechs der Abtrennvorrichtung von einem massiven Spanndeckel übernommen wurde. Unterhalb des Spanndeckels war noch ein Hohlraum vorhanden, in dem zunächst keine zusätzliche aktive Strömung erzeugt wurde. Die Umsetzung des vereinfachten Absaugkonzepts in der Modellversuchsanlage der Abb. 2 ist Abb. 5 zu entnehmen.

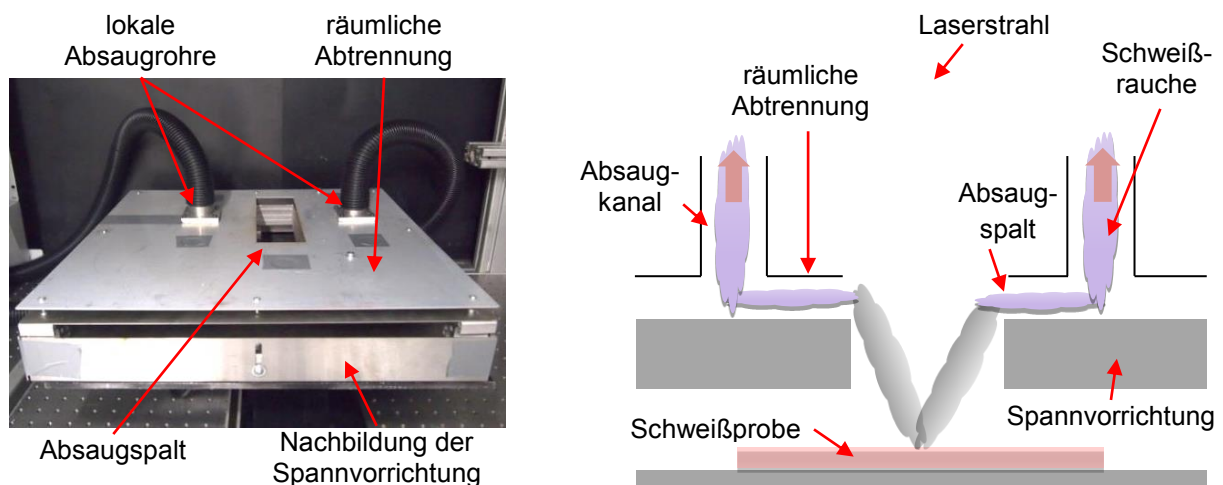


Abb. 5: Vereinfachter Versuchsaufbau mit räumlicher Abtrennvorrichtung für Blindschweißungen an ebenen Proben, implementiert in die Modellversuchsanlage aus Abb. 2 mit einer Nachbildung einer Spannvorrichtung mit massivem Spanndeckel und lokalen Absaugungen (links). Skizze der Funktionsweise (rechts).

Um das Konzept in weiterführenden Versuchen auf einen realitätsnahen Anwendungsfall zu übertragen, wurde eine Versuchsanordnung aufgebaut, die auf einer Spanntechnik der Fa. Bergmann & Steffen GmbH beruht (Abb. 6).

In dieser Spannvorrichtung werden die zu schweißenden Bauteile auf einer Art Nadelbrett gespannt, wodurch sowohl oberhalb als auch unterhalb der Bauteile Hohlräume entstehen. Zur Realisierung des Absaugkonzepts wurde auf den massiven Spanndeckel die Abtrennvorrichtung aufgesetzt. Für die Generierung der Schweißkonturen waren analog zu den Aussparungen im Spanndeckel Öffnungen in die Abtrennung eingebracht.

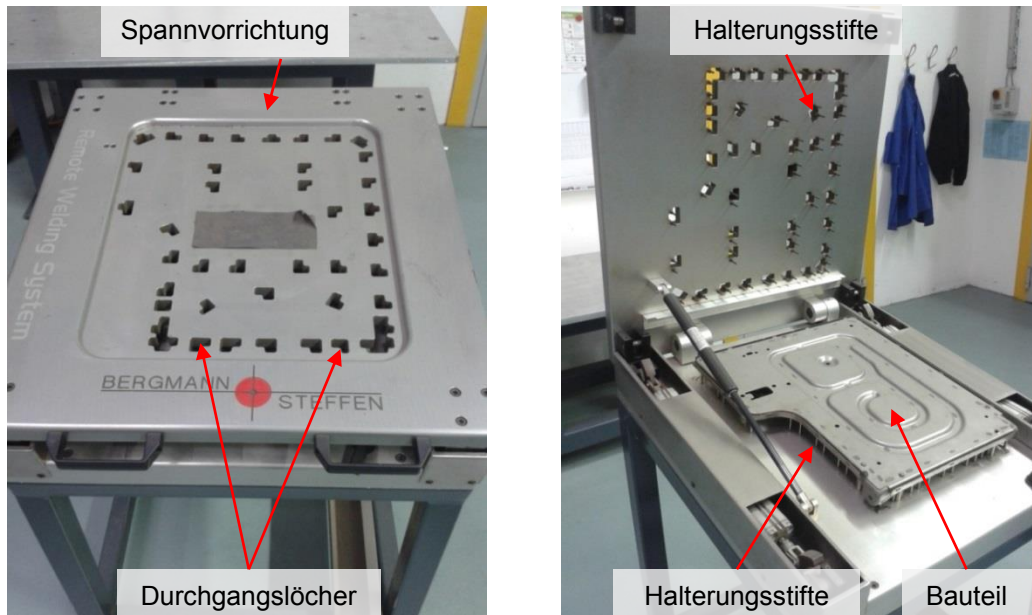


Abb. 6: Spannvorrichtung (links: geschlossen, rechts: geöffnet) der Fa. Bergmann & Steffen GmbH.

### Grundlegende Versuche mit der Abtrennvorrichtung

Die mit dem vereinfachten Versuchsaufbau durchgeführten Versuchsreihen ergaben, dass zusätzliche Strömungswege im Bearbeitungsraum so weit wie möglich vermieden werden sollten, um eine hohe Erfassungsrate der Prozessemissionen zu erzielen und zu vermeiden, dass sich Anteile der Schweißrauche unkontrolliert im Bearbeitungsraum verteilen. Entsprechend wurden mit dem Konzept die besten Ergebnisse erzielt, wenn die seitlichen Öffnungen in der Spannvorrichtung sowie der Abtrennvorrichtung je nach Konstellation der strömungstechnischen Komponenten teilweise oder komplett abgedichtet wurden.

Eine komplette Abdichtung sollte demnach vorgenommen werden, wenn zusätzlich zu der Strömung in der Abtrennvorrichtung auch unterhalb des Spanndeckels, also innerhalb der eigentlichen Spannvorrichtung, eine gezielte Querströmung erzeugt wird.

Die Kombination aus einander gegenüber angeordneten Zuluft- und Abluftdüsen innerhalb der Spannvorrichtung bewirkt unweigerlich durch die Haltestifte und die Bauteilkonturen Turbulenzen, die eine 100%ige Absaugung ohne zusätzliche Maßnahmen verhindern. Auch bei der Abtrennvorrichtung ist eine Kombination aus gegenüberliegenden Zuluft- und Abluftdüsen erforderlich, da die Reichweite einer einseitig angebrachten Abluftdüse zu gering ist, um größere Spannvorrichtungen mit mehreren Durchgangsöffnungen für die Laserstrahlung adäquat abzusaugen.

Wird die Abtrennvorrichtung mit den Zuluft- und Abluftdüsen, aber ohne die Strömungselemente innerhalb der Spannvorrichtung betrieben, so ist die Abdichtung der Spannvorrichtung vorzugsweise nicht komplett geschlossen. Andernfalls kann durch die Abluftströmung der Abtrennvorrichtung kein ausreichender Sog in der Spannvorrichtung entstehen, so dass sich die Schweißrauche dort stauen. Das Verhältnis der Fläche der Aussparungen in der Abdichtung zur Fläche der Durchgangsöffnungen für die Laserstrahlung muss für einen hohen Erfassungsgrad individuell angepasst werden.

Zur Veranschaulichung der beiden beschriebenen Varianten der Gestaltung der Strömungsverhältnisse dienen die beiden Skizzen in Abb. 7 unter Einbeziehung der oben genannten Spannvorrichtung.

Weiterhin ergaben die Versuche bei dem hier gewählten Aufbau, dass der Absaugspalt der Abtrennvorrichtung bzw. der Abstand der räumlichen Abtrennung zum Spanndeckel etwa 1 cm betragen sollte, um eine hohe Erfassungsrate zu gewährleisten.

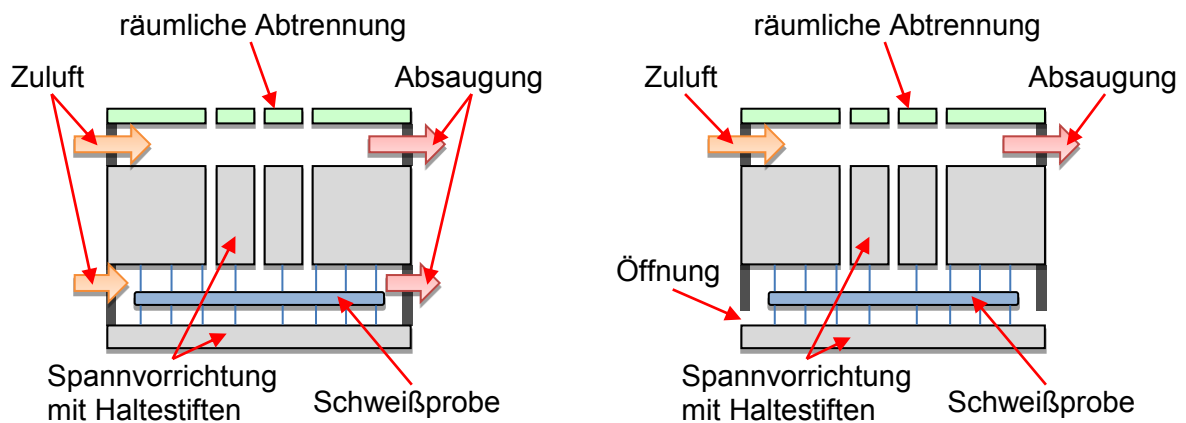


Abb. 7: Skizze der Spannvorrichtung mit Zuluft und Abluft in der Abtrennvorrichtung sowie in der Spannvorrichtung (komplett abgedichtet, links); Spannvorrichtung mit Zuluft und Abluft nur in der Abtrennvorrichtung (teilweise abgedichtet, rechts).

Wie die durchgeführten Experimente zeigen, kommt es zu Ablagerungen von Schweißrauchen vor allem an der prozesszugewandten Seite der räumlichen Abtrennung. Durch den verhältnismäßig einfachen Aufbau lässt sich die Konstruktion jedoch einfach reinigen, indem die Abtrennvorrichtung für den Reinigungsvorgang entfernt wird.

### Versuche mit der räumlichen Abtrennung im industriellen Umfeld

Die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf die industrielle Praxis erfolgte in einer Remote-Laserschweißanlage der Fa. ROFIN-SINAR Laser GmbH. Hier wurde die mit der räumlichen Abtrennung ausgerüstete Spannvorrichtung (Abb. 6) hinsichtlich der Wirksamkeit unterschiedlichster Konstellationen der strömungstechnischen Komponenten erprobt und anhand gemessener Erfassungsgrade bewertet. Der genutzte Aufbau ist in Abb. 8 dargestellt.

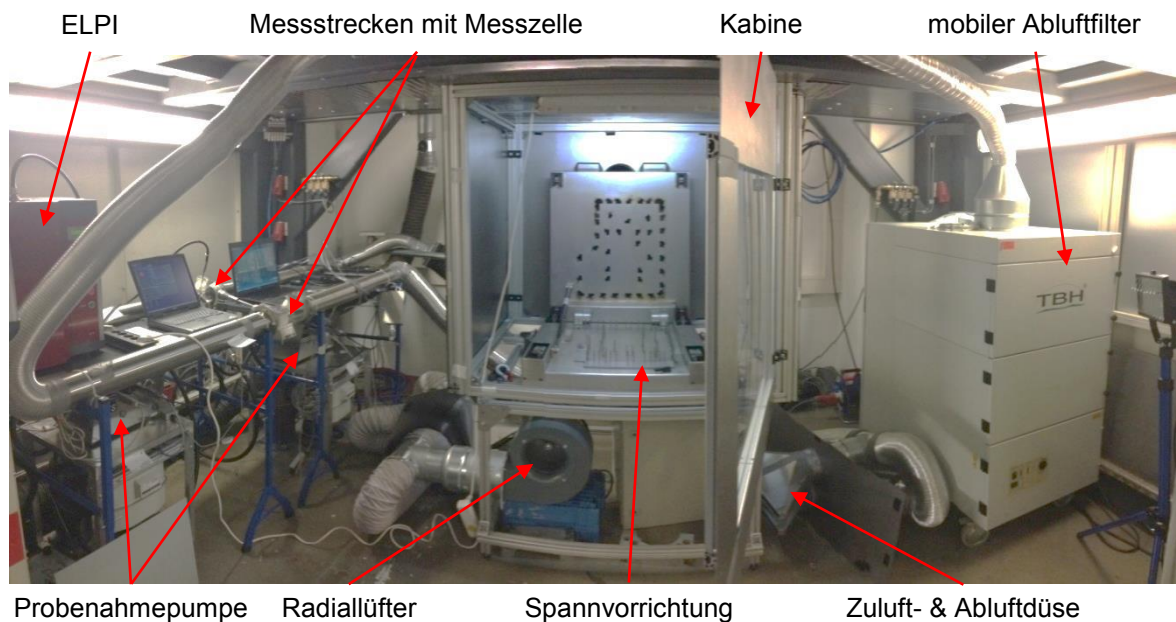


Abb. 8: Versuchsaufbau mit Spannvorrichtung der Fa. Bergmann & Steffen GmbH, ausgestattet mit der Abtrennvorrichtung mit angeschlossener Strömungs- und Messtechnik.

Zur Qualifizierung der Effizienz der Abtrennvorrichtung wurden 2 Abluftstränge verwendet. Der erste Strang diente der Absaugung der Spannvorrichtung und der Abtrennvorrichtung.



Der zweite Abluftstrang diente der globalen Absaugung der Kabinenluft, in der im Idealfall keine Emissionen vorzufinden sein sollten. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wurde hierfür der Prozessraum in Form einer Kabinenumhausung verkleinert. In jeden Absaugstrang wurde eine Messzelle integriert, über die mit entsprechenden Absaugpumpen Teilvolumenströme entnommen und über Planfilter geführt wurden. Die erfassten Emissionen wurden auf den Planfiltern abgeschieden, welche im Anschluss gravimetrisch ausgewertet wurden. Über die ermittelten Massen wurden die verschiedenen Variationen der Strömungsgestaltung bei ansonsten gleichen Prozessparametern qualifiziert.

Klar zeigte sich auch hier, dass der Zuluft- und der Abluftvolumenstrom aufeinander abgestimmt sein müssen. Bei einem höheren Verhältnis des Zuluftstroms zum Abluftstrom oder auch im Fall von in den Randbereichen nicht hinreichenden Strömungsgeschwindigkeiten traten Emissionen deutlich sichtbar aus der Vorrichtung aus (siehe Abb. 9).

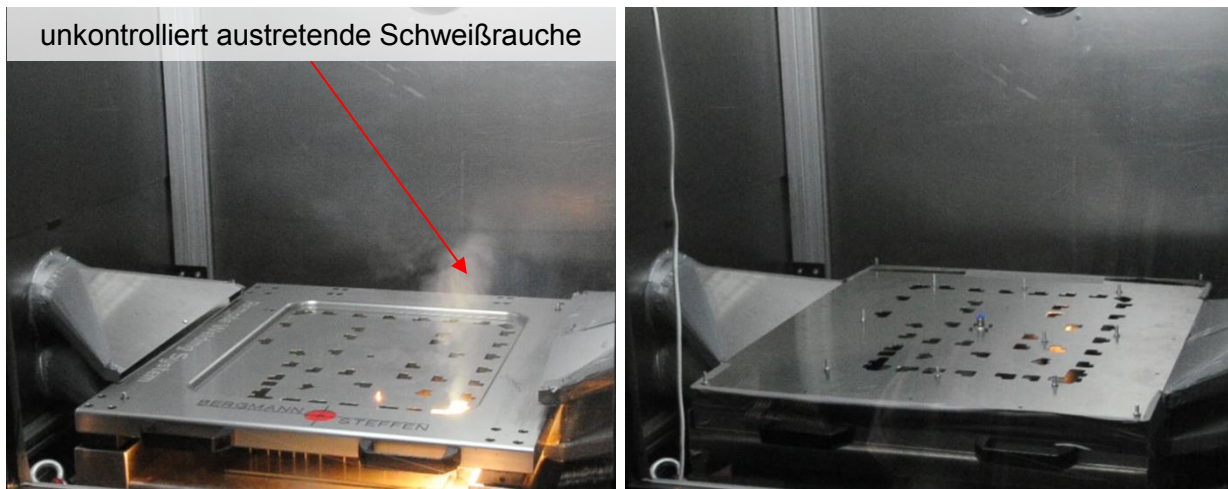


Abb. 9: Unkontrolliert austretende Schweißrauche (links), effiziente Erfassung der Schweißrauche mit adaptierter räumlicher Abtrennung und angepasster Abdichtung seitlicher Öffnungen (rechts).

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Wie die in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen belegen, muss bei detaillierter Analyse eines Remote-Schweißprozesses oder auch von Prozessen, die mit langer Brennweite durchgeführt werden, der Bearbeitungsraum differenziert betrachtet werden. Hierbei ist generell zwischen dem prozessnahen Raum (einige Zentimeter oberhalb der Prozesszone, speziell in Strahlrichtung) und der restlichen Kabinenluft bezüglich der Zuluft und Abluft zu unterscheiden.

Zur Steigerung der Prozesseffizienz und zur Erhöhung bzw. Maximierung der Einschweißtiefe sind lediglich relativ geringe Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb der Prozesszone erforderlich, durch welche die Schweißrauche aus dem Laserstrahlengang gedrückt werden. Die in dieser Arbeit beschriebenen Versuchsergebnisse zeigen, dass eine Querströmung mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 m/min genügt, um den gewünschten Effekt der Ablenkung der Schweißrauche in Richtung der Absaugöffnungen zu erzielen.

Der Prozess weist eine gewisse Toleranz hinsichtlich der Auslegung der Strömungsverhältnisse auf, da die Rauchfahnenhöhe gemäß den beschriebenen Ergebnissen eine gewisse Höhe im Strahlengang haben darf, bis es zu deutlich messbaren Einbußen in der Einschweißtiefe kommt. Bei dem hier betrachteten Schweißprozess betrug die maximale Rauchfahnenhöhe etwa 15 cm.

Das Konzept zur räumlichen Abtrennung wurde im industriellen Umfeld getestet und positiv bewertet, sofern Zuluft- und Abluftvolumenstrom aufeinander abgestimmt werden

(Verhältnis der Volumenströme zueinander etwa 0,8) und die Prozesszone, abgesehen von den Durchgangsöffnungen für den Laserstrahl und ggf. zusätzlichen Belüftungsschlitzen, gekapselt ist.

Aufbauend auf den Ergebnissen der dargestellten Untersuchungen wird die gezielte Weiterentwicklung der Abtrennvorrichtung angestrebt, wobei die Adaptierung an unterschiedliche Prozessvarianten sowie unterschiedliche Spannvorrichtungstypen und -größen geprüft wird. Schließlich soll die Implementierung einer angepassten Abtrennvorrichtung in einen vollautomatisierten Prozess erfolgen.

## 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 Untersuchungen.

## Literatur

- Becker, M.F., Brock, J.R., Cai, H., Henneke, D.E., Keto, J.W., Lee, J., Nichols, W.T., Glicksman, H.D., 1998:** „Metal nanoparticles generated by laser ablation“, Nanostruct. Mater. 10, S. 853 – 863
- Bohren, C. F., Huffman, D. R., 1998:** „Absorption and Scattering of Light by Small Particles“, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, ISBN: 978-0-471-29340-8
- 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“ 2016, Cottbus, 06. – 08.09.2016, zur Veröffentlichung vorgesehen
- Greses, J., Hilton, P.A., Barlow, C.Y., Steen, W.M., 2004:** „Plume attenuation under high power Nd:yttrium–aluminum–garnet laser welding“, J. Laser Appl. 16, S. 9 – 15
- 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
- Michalowski, A., Heß, A., Ruß, A., Dausinger, F., 2007:** „Plume attenuation under high power Yb:YAG laser material processing“, Proc. 4<sup>th</sup> International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LiM), München, S. 357 – 361
- Odachi, G., Sakamoto, R., Hara, K., Yagi, T., 2013:** „Generation of nanoparticles at a fluence less than the ablation threshold using femtosecond laser pulses“, Appl. Surf. Sci. 282, S. 638 – 641
- Ordal, M.A., 1988:** „Optical properties of Al, Fe, Ti, Ta, W, and Mo at submillimeter wavelengths“, Appl. Opt. 27, S. 1203 – 1209
- 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
- Shcheglov, P.Y., Uspenskiy, S.A., Gumenyuk, A.V., Petrovskiy, V.N., Rethmeier, M., Yermachenko, V.M., 2011:** „Plume attenuation of laser radiation during high power fiber laser welding“, Laser Phys. Lett. 8, S. 475 – 480
- Walter, J., Hennigs, C., Hustedt, M., Kaierle, S., Borkmann, M., Mahrle, A., 2015:** „Optimierte Luftströmungsführung beim Remote-Laserstrahlschweißen. Teil I: Experimentelle Untersuchungen“, 23. Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungstechnik“ 2015, Dresden, 08.–10.9.2015, Paper 24, S. 24-1 – 24-8