

Luftströmungsführung in Bearbeitungsstationen zum Remote-Laserstrahlschweißen

– Teil 2: Simulationen zur Anlagenoptimierung

Air flow control for processing stations of remote laser beam welding

– Part 2: Simulations for system optimization

Madlen Borkmann^a, Achim Mahrle^a, Eckhard Beyer^a, Christian Hennigs^b, Michael Hustedt^b, Jürgen Walter^b, Stefan Kaierle^b

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

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

Remote-Laserstrahlschweißen, Luftströmungsführung, CFD-Modell, Versuchsplanung
Remote laser welding, air flow control, CFD model, design of experiment

Zusammenfassung

Vorgestellt werden numerische Untersuchungen zur Luftströmungsführung in Bearbeitungskabinen zum Remote-Laserstrahlschweißen. Die Ergebnisse zeigen eine Vielzahl von Einflussgrößen und Wechselwirkungen auf, die in ihrer Gesamtheit die Strömungsverhältnisse und damit die Effizienz der Strömungsführung bestimmen. Es wird gezeigt, dass eine maßgebliche Herausforderung in einer adäquaten Erfassung der strömungstechnischen Randbedingungen besteht, die in der Regel eine Einbeziehung der konstruktiven Gestaltung der eingesetzten strömungstechnischen Komponenten erforderlich macht. Zusätzlich werden bearbeitungsbedingte transiente Vorgänge exemplarisch diskutiert. Die durchgeführten Untersuchungen demonstrieren, dass Simulationsmodelle als effizientes Werkzeug für eine Anlagenauslegung und -optimierung genutzt werden können.

Einleitung

Bei der Remote-Bearbeitung mit Laserstrahlung zum Fügen metallischer Halbzeuge und Bauteile stellen die prozessbedingten Schweißrauche und -emissionen eine wesentliche Herausforderung für die Prozessauslegung dar (Greses et al. 2004, Michalowski et al. 2007, Kawahito et al. 2009, Walter et al. 2015). Hierbei sind neben typischen und möglichst zu minimierenden Absorptions- und Streueffekten der Laserstrahlung an den in den Schweißrauchen mitgeführten ultrafeinen Partikeln auch Aspekte der Verschmutzung von Bearbeitungsoptiken sowie der Reinhaltung der Raumluft und der zugänglichen Oberflächen unter arbeitsschutzrechtlichen Vorgaben zu beachten (Walter et al. 2014). Der Konzeption, Umsetzung und Optimierung von Luftströmungsführungen in den entsprechenden Bearbeitungskabinen zur Sicherung dieser Kriterien kommt daher eine besondere Bedeutung zu.

Aufgrund der Komplexität der Strömungsverhältnisse bei Überlagerung mehrerer Gasströmungen ist eine rein empirische Auslegung der adressierbaren Steuergrößen insbesondere auch unter dem Aspekt eines möglichst geringen Gasverbrauchs und damit reduzierter An-

lagen- und Betriebskosten in der Regel nicht zielführend. In Ergänzung zu parallel ausgeführten experimentellen Untersuchungen in einer Testkabine wurde daher ein adäquates Simulationsmodell entwickelt, welches für theoretische Untersuchungen zur Bewertung von Einflussgrößen und zur Ermittlung funktionaler Abhängigkeiten genutzt werden kann. Vorteilhaft erweist sich hierbei insbesondere der hohe und detaillierte Auflösungsgrad der interessierenden Zustands- und Transportgrößen im Strömungsgebiet, der bei vertretbarem Aufwand mit ausschließlich experimentellen Methoden nicht erreichbar ist.

Modellentwicklung

Abb. 1 (links) zeigt das geometrische Modell der Bearbeitungskammer mit den verwendeten Zuluft- und Abluftkomponenten. Vereinfachend werden zunächst ein stationärer Laserstrahl und damit eine lokalisierte stationäre Prozesszone vorausgesetzt. Parallel hierzu werden die Achsen der eingesetzten Lüftungstechnischen Komponenten zentral zur Prozesszone ausgerichtet. In der Folge ist es ausreichend, lediglich die Strömungsverhältnisse für den dargestellten Halbraum unter Beachtung einer zentralen Symmetrieebene zu berechnen. Zur Vereinfachung von Variantenrechnungen und Parameteranalysen wurde die Geometrieerstellung weitestgehend parametrisiert. Dadurch sind Anpassungen bezüglich der Positionierung und Ausrichtung einzelner Komponenten problemlos möglich. Davon ausgehend erfolgt eine automatisierte Netzgenerierung. Exemplarisch ist in Abb. 1 (rechts) eine Vernetzung mit 4 Mio. Knoten gezeigt.

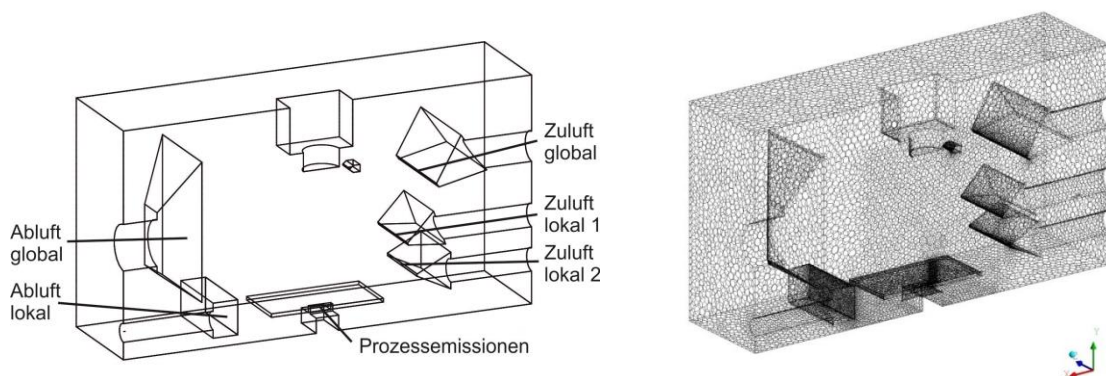


Abb. 1: Gezeigt ist das geometrische Modell der Testkabine mit den Zuluft- und Abluftkomponenten (links) sowie eine exemplarische Vernetzung des Strömungsgebietes mit 4 Mio. Knoten (rechts) (Borkmann et al. 2015).

Das numerische Modell wurde basierend auf der Reynolds-gemittelten Form der Navier-Stokes-Gleichungen in Verbindung mit dem bewährten $k-\epsilon$ -Turbulenzmodell aufgebaut. Als Lösungsverfahren wird eine Druck-Geschwindigkeits-Kopplung mit Upwind-Diskretisierungen 2. Ordnung für die advektiven Transportterme genutzt. Als Randbedingung für die Zuluftkomponenten erfolgt in erster Näherung eine Vorgabe der Zuluftmassenströme. Für die Abluftkomponenten wird eine Auslassbedingung mit einer Druckdifferenz zum Kammerinneren aufgeprägt. Von besonderer Relevanz ist die adäquate Berücksichtigung der Prozessemissionen. Typisch für das Laserstrahlschweißen ist die Ausbildung einer Dampfkapillare in der Prozesszone, die einen Tiefschweißeffekt und damit hohe Einkoppelgrade sowie große Einschweißiefen ermöglicht. Voraussetzung hierfür ist die laserinduzierte Verdampfung von Grundwerkstoff, die infolge des wirksamen Rückstoßdruckes die Ausbildung dieser Dampfkapillare bewirkt. Basierend auf einer thermodynamischen Leistungsbilanzierung wurden korrespondierende Metaldampfraten für Stahlwerkstoffe in der Größenordnung von

$20 \cdot 10^{-3} \text{ g/s}$ abgeschätzt. Diese werden im Modell als Metaldampftraten berücksichtigt. Durch Verwendung eines Zweikomponenten-Modells für den Strömungsraum kann die Ausbreitung des Metaldampfes in der Raumluftatmosphäre (Luft) verfolgt und abgebildet werden. Darauf basierend wurde es möglich, als Kriterium für die Effizienz der Kabinenströmung die 1%-Grenze der Metaldampfkonzentration auf der Strahlachse einzuführen, welches für die quantitative Auswertung der Simulationen einerseits und für die Bewertung unterschiedlicher Raumluftkonzepte andererseits genutzt werden kann (Borkmann et al. 2015). Zugrunde liegt hierbei die Hypothese, dass bei Metaldampfkonzentrationen unterhalb der 1%-Grenze Wechselwirkungen mit der einfallenden Laserstrahlung ausgeschlossen werden können.

Numerische Untersuchungen am Anlagenmodell

Für die Modellkammer mit ihren diversen Zuluft- und Abluftkomponenten ergeben sich eine Vielzahl von Konfigurationsmöglichkeiten, die zum einen die Zuluft- und Abluftvolumen- bzw. -massenströme und zum anderen die geometrische Dimensionierung der einzelnen Aggregate sowie ihre Positionierung und Ausrichtung bezüglich der Prozesszone betreffen. Aufgrund der resultierenden hohen Anzahl an Einflussfaktoren und entsprechender Wechselwirkungen zwischen einzelnen Stellgrößen ist eine Charakterisierung des Systemverhaltens bei vertretbarem Aufwand nur unter Nutzung von Methoden der statistischen Versuchsplanung zu erreichen. In einem ersten Schritt wurde zur Identifizierung der Haupteinflussgrößen ein Screeningversuchsplan mit einem Minimum-Run-Design verwendet. Dabei wurden aus den betrachteten 19 Faktoren die 6 statistisch signifikanten Haupteinflussgrößen ermittelt. Dabei handelt es sich hauptsächlich um die im Modell an den Einströmquerschnitten festgelegten Geschwindigkeiten. In einem zweiten Schritt wurde zur weiteren Charakterisierung und Beschreibung des Systemverhaltens mit Beachtung der signifikanten Wechselwirkungen zwischen den Haupteinflussgrößen ein zweistufiger Vollfaktorplan realisiert. Das sich ergebende lineare Regressionsmodell zeigte jedoch statistische Auffälligkeiten im Normalplot der Residuen mit einer S-förmigen Verteilung der Designpunkte. Dies kann als deutlicher Hinweis auf statistisch signifikante Wechselwirkungen höherer Ordnung gewertet werden (Abb. 2).

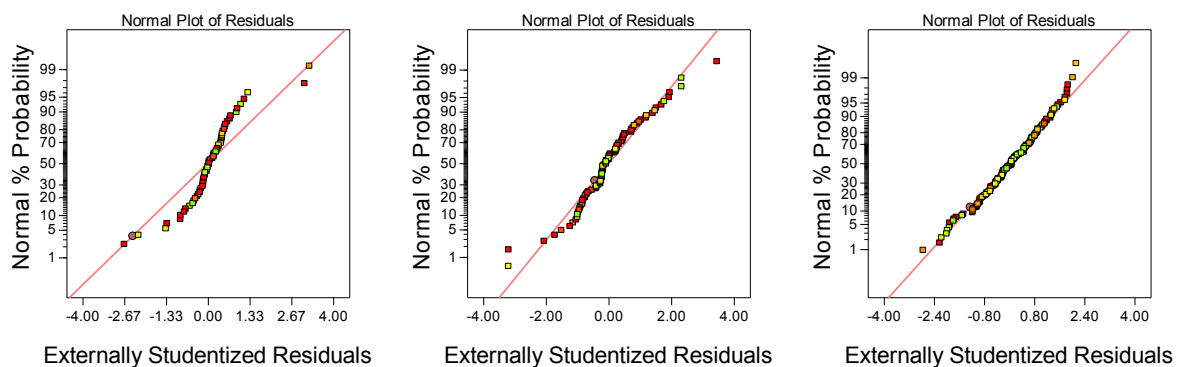


Abb. 2: Normalplots der Residuen für ein lineares Regressionsmodell (links), ein quadratisches Regressionsmodell (Mitte) und ein kubisches Regressionsmodell (rechts).

Um die geforderte statistische Verlässlichkeit des Regressionsmodells zu erreichen, wurde die Erweiterung des Versuchsplanes um zusätzliche Designpunkte auf insgesamt 157 numerische Versuche notwendig. Das sich ergebende kubische Regressionsmodell beinhaltet mehr als 40 signifikante Effekte und Wechselwirkungen (Abb. 3). Durch die starke gegenseitige Abhängigkeit ist die detaillierte Auswertung einzelner Effekte oder Wechselwirkungen jedoch schwierig.

Einflussfaktoren:

- A ... Globale Zuluft/Winkel
- B ... Globale Zuluft/Spalthöhe
- C ... Globale Zuluft/ Geschwindigkeit
- D ... Lokale Zuluft 1/Geschwindigkeit
- E ... Lokale Zuluft 2/Geschwindigkeit
- F ... Prozessemissionen

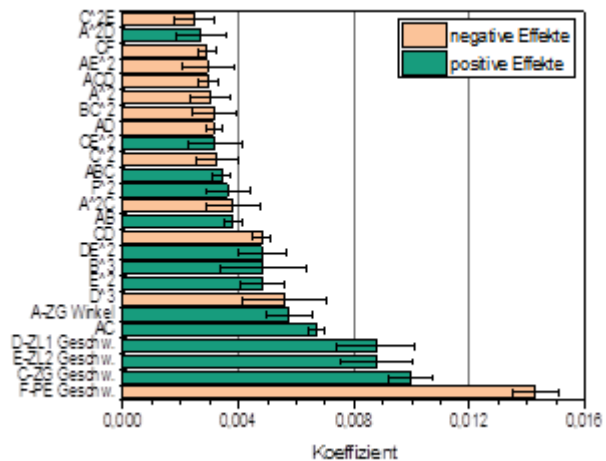


Abb. 3: Einflussgrad der 25 stärksten signifikanten Faktoren und Faktor-Faktor-Wechselwirkungen auf die Emissionshöhe oberhalb der Prozesszone im kubischen Regressionsmodell

Im Ergebnis der Untersuchungen steht allerdings ein Regressionsmodell zur Beschreibung der funktionalen Abhängigkeiten zur Verfügung, welches für eine Optimierung der Strömungsführung genutzt werden kann. Als Kriterien wurde hierbei ein maximal zulässiger Wert für die definierte 1%-Grenze der Metalldampfkonzentration auf der Strahlachse bei gleichzeitig reduziertem Gasverbrauch zu Grunde gelegt. Abb. 4 zeigt exemplarisch die Optimierungsfunktion in Abhängigkeit von der globalen und lokalen Zuluftgeschwindigkeit. Es zeigt sich erwartungsgemäß eine starke Abhängigkeit von der lokalen Zuluftführung. Weiters komplexere Anforderungen an die Strömungsauslegung sind jedoch unter Einbeziehung weiterer Kriterien, beispielsweise der Reduzierung von Verunreinigungen der Arbeitskammer durch Metalldampfrückstände zu erwarten. In diesem Fall wäre zusätzlich sicherzustellen, dass die induzierten Metalldämpfe vollständig durch die Absaugvorrichtungen erfasst werden.

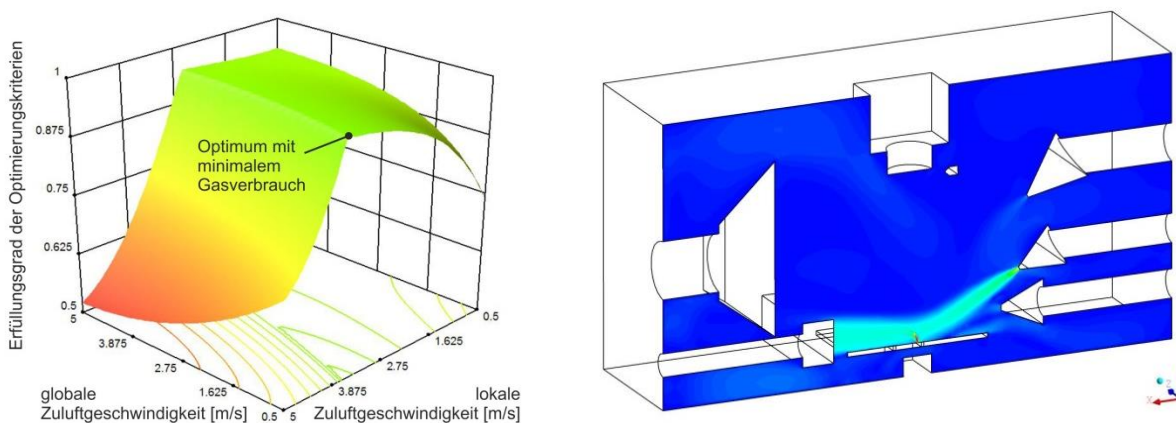


Abb. 4: Optimierungsfunktion in Abhängigkeit von der Zuluftgeschwindigkeit der globalen und lokalen Zuluftdüse (links), Simulation der Raumluftrömung für das gekennzeichnete Optimum (rechts).

Numerische Untersuchungen einzelner Komponenten

Optimierungen von Luftströmungsführungen in Bearbeitungskabinen unter Nutzung der vorgestellten Simulations- und Analyseverfahren werden insbesondere erschwert durch Unsicherheiten in der Festlegung der Randbedingungen. In den bisherigen Untersuchungen wurden die messtechnisch mit ausreichender Genauigkeit erfassbaren Volumenströme der Modellierung zu Grunde gelegt. Hierbei wurde vereinfachend eine durchaus gewünschte und auch erwartete homogene Geschwindigkeitsverteilung über die entsprechende Zuströmquerschnitte angenommen. Zur Überprüfung dieser These und auch um festgestellte Differenzen in gemessenen und numerisch berechneten lokalen Geschwindigkeitswerten bewerten zu können, wurden einzelne Komponenten bezüglich ihres Strömungsverhaltens detaillierter untersucht. Exemplarisch sind die Ergebnisse am Beispiel einer Flachstrahldüse diskutiert, in die eine Lochblende zur Homogenisierung der Strömung integriert wurde. Eine erste Simulation der Strömung durch diese Komponente als Freistrahler ergab, dass die Annahme eines homogenen Strömungsprofils der Ausströmung nicht gegeben ist. Für die Ausgangskonfiguration mit einem Lochdurchmesser von 8 mm bei insgesamt 413 Löchern mit gleichmäßiger Verteilung über eine Fläche von $0,06 \text{ m}^2$ resultiert ein hantelförmiges Strömungsprofil mit Geschwindigkeitsmaxima in den Randbereichen der Düse (Abb. 5). Bei Ausrichtung der Düsenachse auf die unmittelbare Prozesszone ist folglich eine optimale Wirkung nicht zu erwarten. Eine maßgebliche Beeinflussung des Strömungsprofils ist über eine Variation des Lochdurchmessers zu erzielen. Bei einer Änderung des Lochdurchmessers auf eine Größe von 5 mm wird das Ausströmprofil deutlich homogener und das Geschwindigkeitsmaximum verschiebt sich in Richtung der Düsenachse bzw. Düsenmitte.

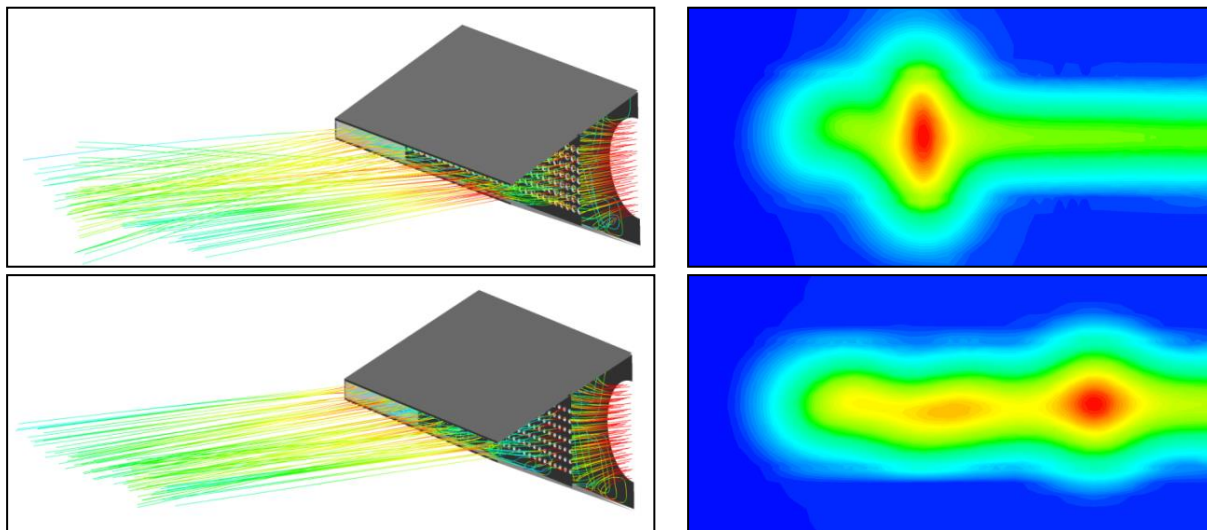


Abb. 5: Berechnete Strömungsverhältnisse im Abstand von 30 cm vor der Austrittsebene einer Zuflußdüse mit Lochblendengitter. Oben: Ausgangskonfiguration mit 8 mm Lochdurchmesser. Unten: optimierte Konfiguration mit 5 mm Lochdurchmesser.

Ein Vergleich der berechneten Strömungsprofile mit gemessenen Werten zeigt einen ähnlichen qualitativen Verlauf und weist auch die signifikante Beeinflussung der Strömungsverhältnisse bei Änderung des Lochdurchmessers nach (Abb. 6). Allerdings sind auch Unterschiede in den lokalen Geschwindigkeiten in Achsnähe erkennbar, die mit dem bestehenden Modell nicht hinreichend erklärt werden können. Eine mögliche Ursache für die Abweichungen besteht auch hier wiederum in der aufgeprägten Randbedingung für den Zuflußstrom (Vorgabe des Massenstroms). Weiterführende Untersuchungen sollen diese Fragestellung

aufgreifen. Allerdings wird auch hier vermutet, dass eine vollständige Charakterisierung des Strömungsverhaltens der Flachstrahldüse nur unter Einbeziehung aller Einflussfaktoren im Rahmen einer DoE-Analyse möglich ist.

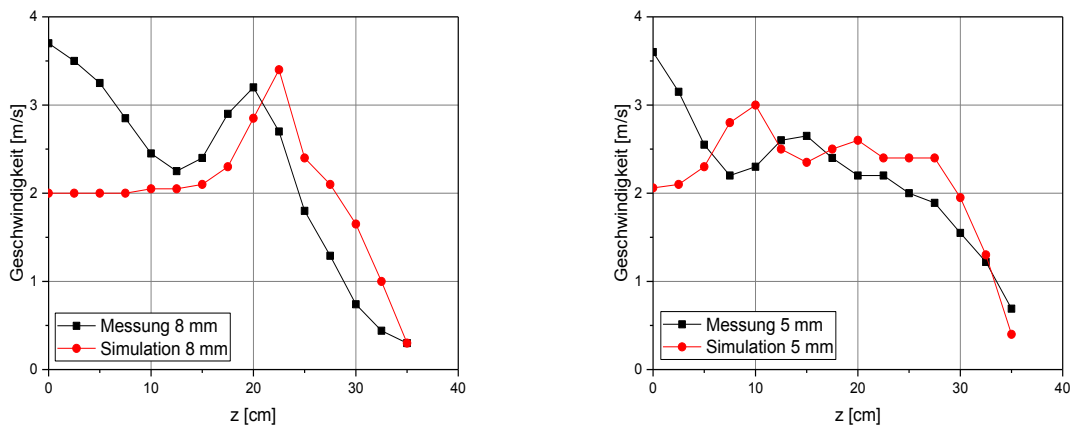


Abb. 6: Vergleich der gemessenen und der berechneten Geschwindigkeitsverteilungen im Abstand von 30 cm vor der Austrittsebene einer Zuluftdüse mit Lochblendengitter. Links: Ausgangskonfiguration mit 8 mm Lochdurchmesser. Rechts: optimierte Konfiguration mit 5 mm Lochdurchmesser.

Numerische Untersuchungen zum transienten Systemverhalten

Das Systemverhalten wurde in bisherigen Untersuchungen für eine stationäre lokale Emissionsquelle charakterisiert. Diese Bedingungen sind von praktischer Relevanz sofern bei stehendem Strahl das Werkstück bewegt wird oder lediglich lokal sehr kurze Schweißnähte generiert werden. Charakteristisch für viele Remote-Anwendungen ist jedoch ein über Scannerspiegel schnell bewegter Strahl, der entlang einer vorgegebenen komplexen Schweißbahn geführt wird oder der mehrere sequentielle Schweißnähte an unterschiedlichen Schweißpositionen produziert. Eine vollständig transiente Berechnung komplexer Szenarien ist aufgrund einer notwendigen sehr hohen zeitlichen Auflösung des insgesamt zu untersuchenden Zeitintervalls mit einem hohen Aufwand verbunden. Daher wurden im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen lediglich zwei einfache Testfälle betrachtet, um die grundlegende Problematik zeitabhängiger Prozesse zu beleuchten. Testfall I untersucht den Effekt fluktuierender Metaldampfraten bei konstantem Ort und Testfall II die Bewegung der Emissionsquelle entlang einer virtuellen Schweißbahn bei einer konstanten Metaldampfrate. Im Testfall I wird die zeitabhängige Geschwindigkeit des Metaldampfes bestimmt als Überlagerung einer mittleren Geschwindigkeit und einer sinusförmigen Schwingung:

$$v(t) = \bar{v} + \Delta v \cdot \sin(\omega \cdot t) \text{ mit } \bar{v} = 100 \text{ m/s}, \Delta v = 25 \text{ m/s}, \omega = 2 \text{ s}^{-1}.$$

Die betrachtete Zeitspanne beträgt 1,5 s bei Zeitschritten von $\Delta t = 0,005 \text{ s}$. Bei der Berechnung wurde ein konstantes Netz verwendet. Die Berechnungszeit betrug 9 Stunden. Erwartungsgemäß verändert sich die 1%-Höhe in Abhängigkeit von der aktuellen Einströmgeschwindigkeit der Prozessemissionen (Abb. 7, links). Die Systemantwort erfolgt aufgrund der hohen Geschwindigkeiten der Prozessemissionen und der geringen Frequenz nahezu simultan zur aufgeprägten Fluktuation. Die Ablenkung der Prozessemissionen ist im Falle der geringen Einströmgeschwindigkeiten deutlich verbessert (Abb. 7, rechts). Die Differenz der aktuell ermittelten 1%-Höhe zum Mittelwert beträgt jedoch zum Zeitpunkt geringer Einströmgeschwindigkeit der Emissionen weniger als bei hoher Einströmgeschwindigkeit.

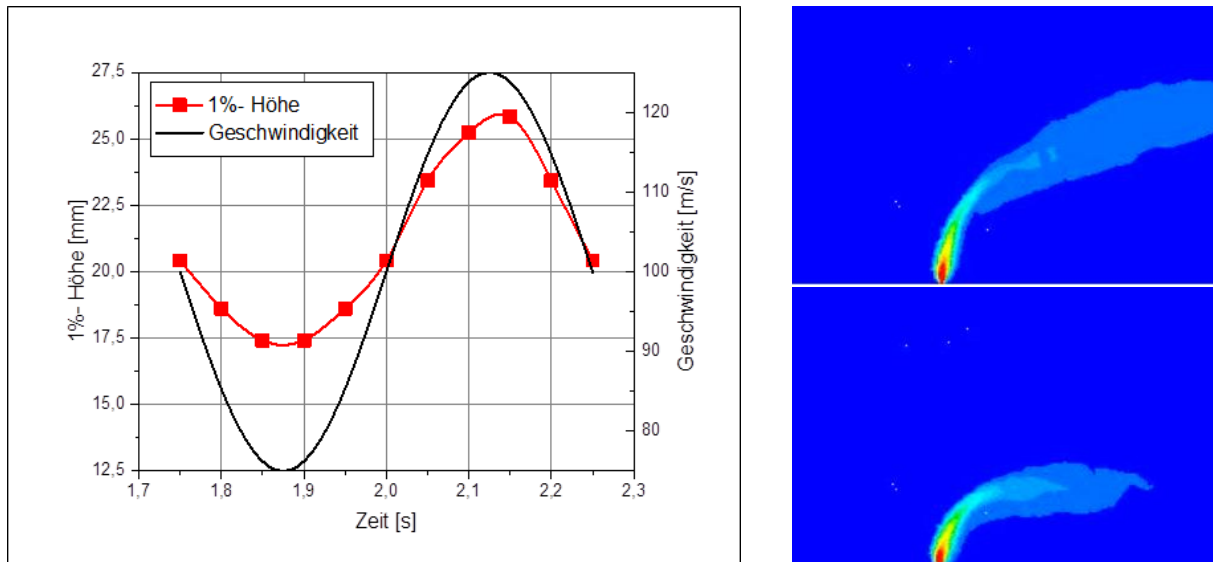


Abb. 7: Aufgeprägte transiente Geschwindigkeit der Prozessemissionen und Systemantwort in Form der 1%-Höhe (links). Konzentrationsverteilung der Prozessemissionen zum Zeitpunkt hoher Einströmgeschwindigkeit (rechts oben) und geringer Einströmgeschwindigkeit (rechts unten).

Im Testfall II wird die Emissionsquelle entlang einer virtuellen Schweißbahn bei einer konstanten Metalldampftrate geführt. Zur Vereinfachung wurde eine gerade Bahn in der Symmetrieebene gewählt, auf der sich die Quelle zwischen Zu- und Abluftkomponenten bewegt.

$$x(t) = \Delta x \cdot \cos(\omega \cdot t), \text{ mit } \Delta x = 49,5 \text{ mm}, \omega = 0,16 \text{ s}^{-1}, \bar{v} \approx 1 \text{ m/min}$$

Bei einer Periodendauer von 13 s waren 1000 Zeitschritte für eine gleichmäßige Bewegung mit ausreichender Überdeckung notwendig. Trotz Verwendung von konstanter Geometrie und Netz wurde eine Berechnungsdauer von 49 Stunden benötigt. In Abb. 8 (links) werden der Ort der Emissionen und die ermittelte 1%-Höhe in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die Ortsabhängigkeit der 1%-Höhe resultiert aus der geneigten Anströmung der Prozesszone durch die Zuluftdüsen. Bei feststehender Konfiguration der Zuluftdüsen befindet sich die Prozesszone in der Nähe der Zuluft demnach nicht mehr im optimalen Bereich der Emissionsbeseitigung. Weiterhin wird deutlich, dass die geometrisch direkte Anströmung der Prozesszone demnach nicht optimal ist und der Zuluftstrahl etwas vor die eigentliche Prozesszone ausgerichtet sein sollte. Im Vergleich zum Testfall I kann jedoch festgestellt werden, dass die ortsabhängigen Schwankungen der 1%-Höhe im untersuchten Bereich geringer sind und damit der tatsächlichen Geschwindigkeit der Prozessemissionen und ihrem Einfluss auf die Prozessbeeinflussung eine höhere Bedeutung beigemessen werden sollte (Abb. 8, rechts).

Schlussfolgerungen und Ausblick

Das entwickelte virtuelle Anlagenmodell ermöglicht numerische Untersuchungen zur Bewertung der Effizienz von Raumlufthkonzepten in Abhängigkeit verschiedener Prozessszenarien. Die detektierten Wechselwirkungen zwischen den Steuergrößen erweisen sich hierbei als äußerst komplex. Daher können Empfehlungen für optimale Raumlufthströmungen nur unter Beachtung der konkreten lokalen Randbedingungen abgeleitet werden. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei die adäquate Erfassung der Strömungsverhältnisse in den verwendeten raumlufthtechnischen Komponenten dar.

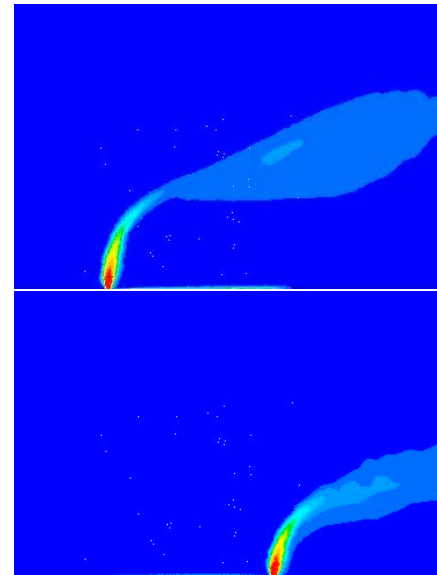
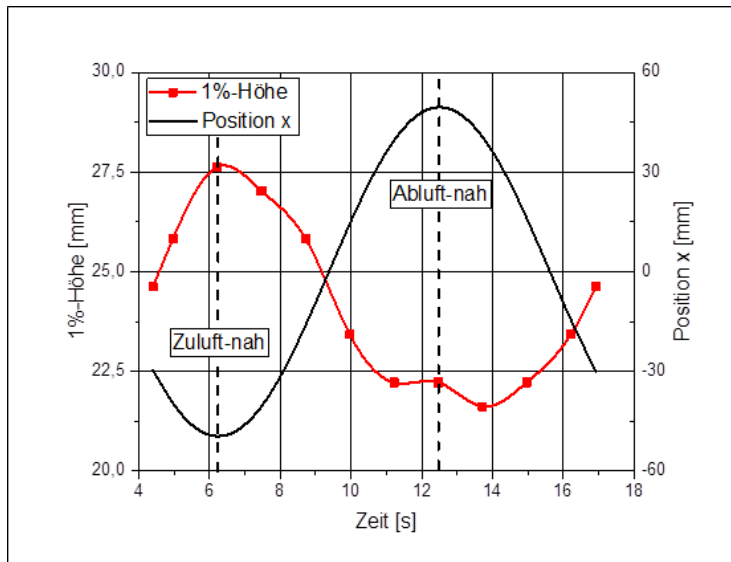


Abb. 8: Transienter Ort der Prozessemissionen und Systemantwort in Form der 1%-Höhe (links). Konzentrationsverteilung der Prozessemissionen an den Extrempunkten der Bahn, zuluftnah (rechts oben) und abluftnah (rechts unten).

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., Kaieler, S., 2015:** „Optimierte Luftströmungsführung beim Remote-Laserstrahlschweißen. Teil II: Numerische Untersuchungen“, 23. Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“ 8. – 10. September 2015, Dresden
- 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
- 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. 4th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LiM), München, S. 357-361
- Walter, J., Hennigs, C., Hustedt, M., Kaieler, S., Borkmann, M., Mahrle, A., 2014:** „Effizienzsteigerung beim Remote-Laserschweißen durch optimierte Luftströmungsführung“, 22. Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungstechnik“ 2014 : Karlsruhe, 9.-11.9.2014, S. 49/1-49/8
- Walter, J., Hennigs, C., Hustedt, M., Kaieler, S., Borkmann, M., Mahrle, A., 2015:** „Optimierte Luftströmungsführung beim Remote-Laserstrahlschweißen. Teil I: Experimentelle Untersuchungen“, 23. Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungstechnik“ 2015 : Dresden, 8.-10.9.2015