

Optimierte Luftströmungsführung beim Remote-Laserstrahlschweißen. Teil II: Numerische Untersuchungen

Optimized airflow control during remote laser welding. Part II: Numerical Investigations

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

Vorge stellt wird das Simulationsmodell für eine Versuchsanlage zum Remote-Laserstrahlschweißen metallischer Werkstoffe unter Berücksichtigung diverser Zu- und Abluftvorrichtungen zur Kontrolle bzw. Minimierung störender Prozessemissionen in der Laserstrahl-Werkstoff-Wechselwirkungszone. Basierend auf Methoden der statistischen Versuchsplanung und -auswertung werden Haupteinflussgrößen und inhärente Wechselwirkungen identifiziert und bezüglich ihrer Wirkung auf die räumliche Verteilung der Prozessemissionen charakterisiert. Das Modell ermöglicht die Bewertung von Lüftungskonzepten für Bearbeitungskabinen zum Remote-Laserstrahlschweißen hinsichtlich ihrer Effizienz und soll für eine Optimierung der Strömungsführung genutzt werden.

Einleitung

Das Remoteschweißen metallischer Komponenten und Baugruppen mit Laserstrahlquellen hoher Ausgangsleistung und Strahlqualität ist ein etabliertes Fertigungsverfahren für anspruchsvolle Fügeaufgaben. Hierbei wird der Laserstrahl unter Verwendung langer Brennweiten bzw. großer Arbeitsabstände mit Hilfe dynamischer Spiegelsysteme abgelenkt und entlang der Bearbeitungsbahn geführt (Katayama et al. 2009, Lingner 2013, Oefele 2013). Als problematisch für die erzielbare Fertigungsqualität sind die während des Schweißvorgangs infolge von Materialverdampfungen entstehenden Prozessemissionen mit einem typischerweise hohen Anteil an feinen und ultrafeinen Partikeln anzusehen (Greses et al. 2004, Michalowski et al. 2007, Kawahito et al. 2009, Walter et al. 2015). Diese führen bei den eingesetzten Laserwellenlängen im Nahinfrarotbereich neben einer gewissen Absorption vor allem zu einer Streuung der Laserstrahlung und damit zu einer Reduzierung der am Werkstück wirksamen Strahlintensität. Aufgrund prozessinhärenter Fluktuationen der Emissionsraten und der Strömungsverhältnisse oberhalb der Prozesszone können unregelmäßige Schweißnähte mit variablen Einschweißstiefen bzw. im Extremfall Fehlschweißungen infolge von Prozessabbrüchen resultieren (Walter et al. 2014). Empirisch konnte bereits nachgewiesen werden, dass die störenden Prozessemissionen durch einen Einsatz von global

angeordneten Zu- und Abluftvorrichtungen aus dem Strahlengang des Lasers abgelenkt werden können und eine Stabilisierung des Schweißvorgangs bei deutlich verbesserten Nahtqualitäten und höheren Einschweißstiefen erreicht werden kann (Walter et al. 2014).

Ziel der hier vorgestellten Arbeiten ist die Erweiterung des Prozessverständnisses, um eine Verbesserung der Schweißqualität und eine Effizienzsteigerung bestehender Anlagenkonzepte hinsichtlich Gas- und Energieverbrauch durch optimierte Prozessparameter zu erreichen. Die unter Nutzung des entwickelten Simulationsmodells durchgeführten numerischen Untersuchungen ermöglichen die Identifizierung und Charakterisierung von Haupteinflussgrößen. Hierzu werden Methoden der statistischen Versuchsplanung und -auswertung genutzt.

Modellentwicklung

Die Modellentwicklung erfolgte unter Nutzung der Funktionalitäten des kommerziellen Software-Programmpaketes ANSYS Workbench und FLUENT. Bereits während der Modellentwicklung wurde großer Wert auf die Parametrisierbarkeit von Geometrie- und Netz-erstellung sowie die automatisierte Durchführung des gesamten Simulationsprozesses gelegt, um die Realisierung zahlreicher Simulationen im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung zu ermöglichen.

Die geometrische Auslegung der virtuellen Versuchsanlage erfolgte auf Basis einer am Laser Zentrum Hannover konzipierten realen Versuchsanlage zum Remote-Laserstrahlschweißen bzw. zum Laserstrahlschweißen mit großer Brennweite, wodurch ein Abgleich der vorgesehenen Validierungsrechnungen mit den real gemessenen Strömungsverhältnissen ermöglicht wird. Darüber hinaus verfügt das numerische Modell über vielfältige Variationsmöglichkeiten, die im realen Anlagenmodell nicht oder nur mit erheblichem Aufwand realisiert werden können.

Die Versuchsanlage (Abb. 1) umfasst ein Volumen von ca. 1,6 m³. Die einzelnen lüftungstechnischen Komponenten sind in der Symmetrieebene angeordnet, wodurch die Möglichkeit der Reduzierung des Berechnungsgebietes auf eine Hälfte der Anlage gegeben ist.

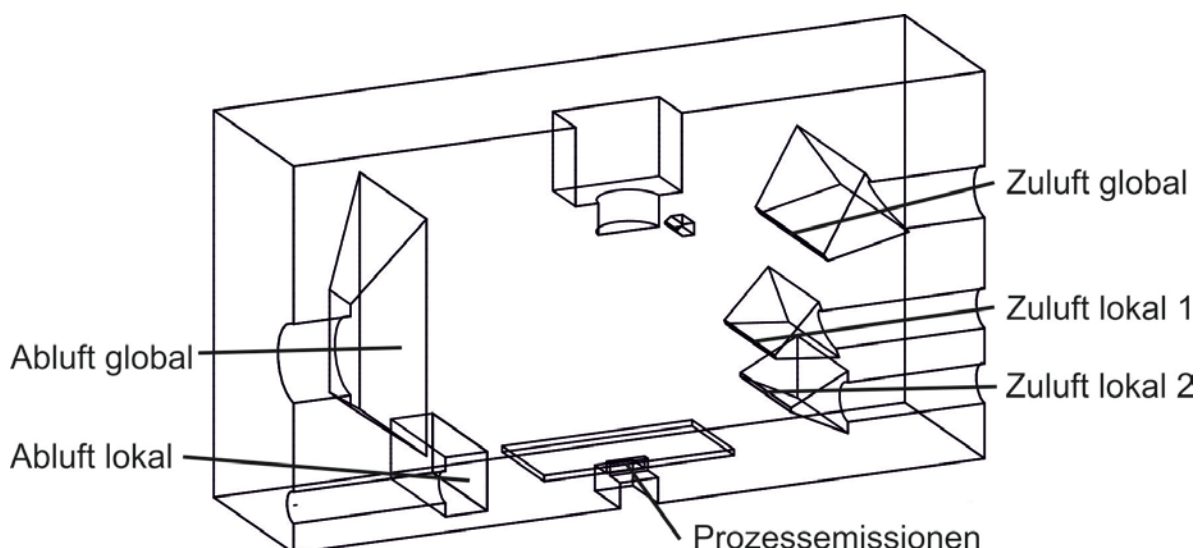


Abb. 1: Geometrisches Modell der Bearbeitungskammer mit Zu- und Abluftkomponenten unter Ausnutzung der Symmetrieebene

Die Herausforderung im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Simulationsmodells zur Beschreibung der Strömungsverhältnisse in Bearbeitungskabinen zum Remote-Laserstrahlschweißen besteht in der Beachtung der gasdynamischen Wechselwirkungen zwischen den lokal konzentrierten Prozessemissionen, die durch hohe Temperaturen und Geschwindigkeiten gekennzeichnet sind, und der global aufgeprägten Raumluftrömung mit moderaten physikalischen Eigenschaften. Diesem Aspekt wird bereits bei der Erstellung des Berechnungsnetzes (räumliche Diskretisierung) durch ein großes Verhältnis zwischen der maximalen und der minimalen Elementgröße Rechnung getragen, um eine hinreichende Auflösung von Bereichen mit großen Konzentrations-, Temperatur- und Geschwindigkeitsgradienten zu gewährleisten, ohne den Aufwand für die Simulationen unnötig zu erhöhen (Abb. 2). Das Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Elementgröße beträgt im vorgestellten Modell typischerweise 300.

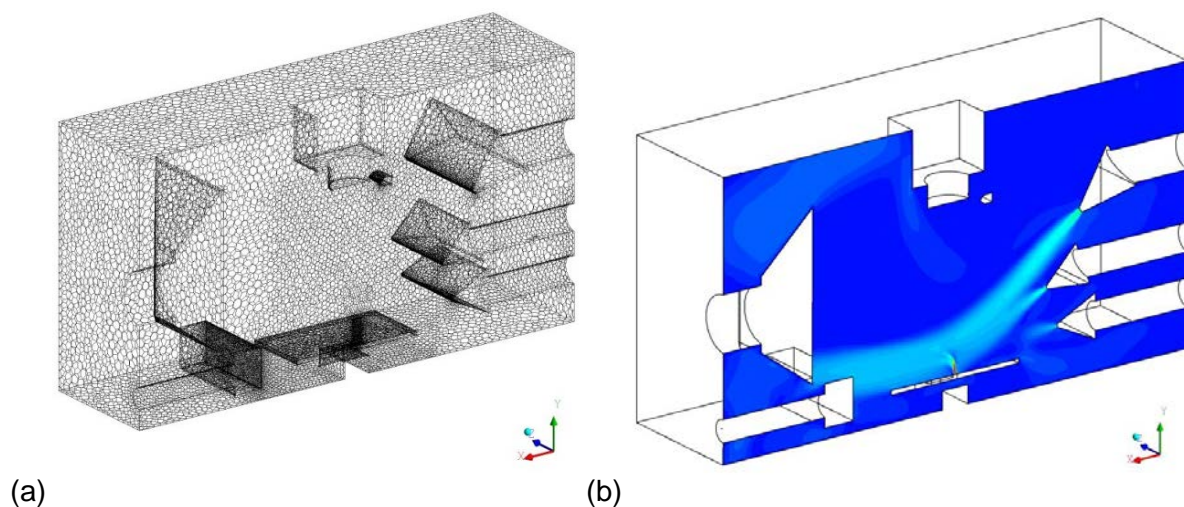


Abb. 2: (a) Berechnungsnetz für das Modell der Bearbeitungskammer, (b) Beispiel für ein Berechnungsergebnis für die Strömungsgeschwindigkeit in der Symmetrieebene

Zur Berücksichtigung der Unterschiede in den thermophysikalischen Eigenschaften von Prozessemissionen und Zuluft wurde ein Mehrkomponentenmodell verwendet. Die Zuluft wird als Luft bei Umgebungstemperatur modelliert während die Prozessemissionen als Eisendampf mit Verdampfungstemperatur in das Berechnungsgebiet eingeführt werden. Im verwendeten Mehrkomponentenmodell werden der Transport der Spezies durch die Bearbeitungskabine und der Temperaturengleich berechnet; nicht modelliert werden Phasenübergänge, Partikelbildungsmechanismen und chemische Reaktionen.

Die Lüftungstechnischen Baugruppen werden mit konstanten physikalischen Eigenschaften über den gesamten Öffnungsquerschnitt definiert. Im Rahmen von in dieser Arbeit nicht vorgestellten Simulationsrechnungen wurden auch einzelne Lüftungstechnische Baugruppen mit Auflösung der Innenstruktur hinsichtlich der resultierenden Strömungsprofile untersucht. Aufgrund des sich ergebenden rechentechnischen Aufwandes ist es mit den zur Verfügung stehenden Mitteln jedoch nicht praktikabel, alle Lüftungskomponenten mit Auflösung der Innenstruktur in das Modell der Bearbeitungskammer zu integrieren.

Als Randbedingungen für die Zuluft werden je nach Fragestellung die Geschwindigkeit der Gase oder der Massefluss festgelegt. Für die Abluft wird die Druckdifferenz zum Inneren der Bearbeitungskammer vorgegeben, was zu einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit im Abluftrohr führt.

Die stationäre Berechnung der Raumluftrömung in der Bearbeitungskabine erfolgt auf Grundlage der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen unter Verwendung des erweiterten k-ε-Modells mit verbesserter Wandfunktion als Turbulenzmodell. Eine stabile und rechenzeiteffiziente Lösung der Gleichungen wird durch eine Mehrgitterinitialisierung und den druckbasierten Löser mit Druck-Geschwindigkeitskopplung sichergestellt.

Für die Definition der Quellstärke der Prozessemissionen wurde eine Bilanzierung der zu erwartenden Metallemissionsrate beim Remote-Laserstrahlschweißen durchgeführt. Bei einem angenommenen mittleren thermischen Wirkungsgrad von $\eta_{th} = 15\%$ und einer Laserleistung von $P_L = 4 \text{ kW}$ ergibt sich unter Beachtung eines mittleren spezifischen Enthalpiebedarfs von

$$\Delta h_m = c_p(\vartheta_m - \vartheta_0) + \Delta h_{S/L} = 922 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

für die Erwärmung und das Schmelzen des Materials ein Schmelzmassenstrom von

$$\dot{m}_m = \frac{P_L \cdot \eta_{th}}{\Delta h_m} = 651 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s} .$$

Ausgehend von einem Verdampfungsanteil zwischen 2% und 5% ergeben sich für Durchmesser der laserinduzierten Dampfkapillare von 0,7 mm bis 1,5 mm Ausströmgeschwindigkeiten der Prozessemissionen zwischen 33 m/s und 373 m/s (Tab. 1).

Tab. 1: Zu erwartende Ausströmgeschwindigkeiten der Prozessemissionen aus der laserinduzierten Dampfkapillare (Keyhole) für verschiedene Verdampfungsanteile und Keyholedurchmesser

Verdampfungsanteil	2%	5%
Eisendampfmassenstrom	$13 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$	$32 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$
Ø Keyhole 1,5 mm	33 m/s	82 m/s
Ø Keyhole 1,0 mm	74 m/s	185 m/s
Ø Keyhole 0,7 mm	149 m/s	373 m/s

Aufgrund der großen Bandbreite an zu erwartenden Ausströmgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von den Prozessparametern wird zur genaueren Analyse der Auswirkungen auf die Raumluftrömung in den numerischen Untersuchungen die Ausströmgeschwindigkeit der Prozessemissionen als zusätzlicher Faktor eingeführt. Die verwendeten Stufen Grenzen werden auf einen mittleren Bereich von 100 m/s und 200 m/s festgelegt.

Zur qualitativen und quantitativen Beurteilung unterschiedlicher Parameterkonstellationen wurde als modellspezifische Kenngröße eine „1%-Grenze“ definiert. Diese 1%-Grenze kennzeichnet den Abstand zwischen der Prozesszone und dem Punkt auf der senkrecht auf dem Material stehenden Laserstrahlachse, an dem die Konzentration der Modellgas-komponente des Eisendampfes auf 1% abgenommen hat. In Abb. 3 (b) und (c) sind Form und Höhe der Prozessemissionen über der Prozesszone für Simulationen mit und ohne Einsatz von Zuluft visualisiert. In Abb. 3 (a) ist der Anteil des Eisendampfes gegen die Höhe über der Prozesszone aufgetragen. Gut erkennbar ist die gleichmäßige Abnahme des Eisenanteils durch Diffusions- und turbulente Mischungsvorgänge bei der ungestörten Ausbreitung der Emissionen. Im Gegensatz dazu wird bei Verwendung von Lüftungstechnischen Komponenten eine frühzeitige Ablenkung der Eisenanteile aus der Prozesszone entlang der Laserstrahlachse und eine verstärkte Vermischung mit der Zuluft beobachtet.

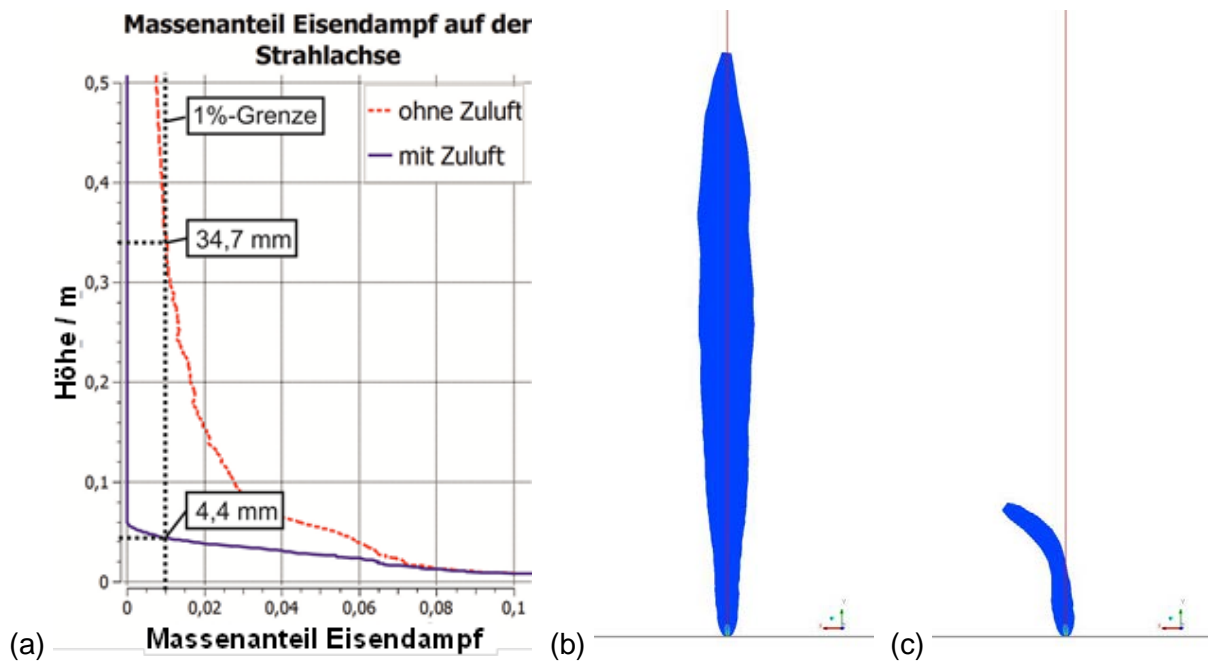


Abb. 3: (a) Verlauf des Massenanteils Eisendampf auf der Strahlachse für die Bearbeitung ohne und mit Einsatz von Zuluft mit Kennzeichnung der 1%-Grenze, (b) Visualisierung der Prozessemissionen mit Massenanteil 100% – 1% für ungestörte Ausbreitung, (c) Visualisierung mit Einsatz von Zu- und Abluft

Numerische Untersuchungen

Auf Grundlage von Methoden der statistischen Versuchsplanung wurden mit dem vorgestellten parametrisierten und automatisierten Simulationsmodell mehrere Versuchspläne definiert, um die Haupteinflussfaktoren auf die interessierenden Zielgrößen im Modell der Bearbeitungskammer zu identifizieren (Screening) und ihre Effekte und Wechselwirkungen zu charakterisieren. Als Zielgrößen werden im Hinblick auf die Optimierung des Anlagendesigns bezüglich der Entfernung der Prozessemissionen aus der Prozesszone und des Gas- und Energieverbrauchs die speziell eingeführte 1%-Grenze und der Gasmassenstrom der gesamten Zuluft festgelegt.

Screening zur Identifizierung der Haupteinflussfaktoren

Im ersten Schritt wurde zur Identifizierung der Haupteinflussgrößen ein Screeningversuchsplan mit 19 Faktoren auf je zwei Stufen durchgeführt (siehe Tab. 2). Dabei wurde ein Minimum-Run-Design (Resolution V) verwendet, um die Anzahl der durchzuführenden Simulationen zu verringern. Dieses Design ermöglicht die Abschätzung der Haupteffekte, während die Zwei-Faktoren-Wechselwirkungen nur mit Drei-Faktoren-Wechselwirkungen oder höheren vermischt sind. Der verwendete Versuchsplan umfasst 192 Berechnungsläufe im Vergleich zu 512 Versuchen eines regulären Zweistufen-Designs für 19 Faktoren mit der Auflösung V. Allerdings ist der Versuchsplan infolge der Reduzierung nicht orthogonal und ausgewogen, wodurch der Aufwand für die Auswertung vergrößert wird.

Die Analyse der Studie ergab 6 Faktoren mit signifikantem Einfluss auf die betrachtete Zielgröße 1%-Grenze (vgl. Tab. 3). Dabei handelt es sich hauptsächlich um die im Modell an den Einströmquerschnitten festgelegten Geschwindigkeiten.

Tab. 2: Faktoren mit zugehörigen Stufen für das Screening nach den Haupteinflussgrößen

Faktoren			Stufen	
Komponente	Größe	Einheit	untere	obere
Zuluft global	Winkel zur Probenebene	°	35	45
	Spalthöhe	mm	10	40
	Geschwindigkeit	m/s	1	5
Zuluft lokal 1	Abstand zum Prozess	mm	350	450
	Winkel zur Probenebene	°	20	30
	Spalthöhe	mm	10	20
	Geschwindigkeit	m/s	1	5
Zuluft lokal 2	Abstand zum Prozess	mm	300	500
	Spalthöhe	mm	10	20
	Geschwindigkeit	m/s	1	5
Abluft global	Druckunterschied	Pa	-5	-20
	Trichterhöhe	mm	400	600
	Abstand zum Boden	mm	200	300
	Abstand zur Wand	mm	50	150
Abluft lokal	Druckunterschied	Pa	-5	-20
	Trichterhöhe	mm	100	150
	Abstand zum Boden	mm	40	80
	Abstand zum Prozess	mm	300	450
Prozessemission	Geschwindigkeit	m/s	100	200

Charakterisierung der Effekte und Interaktionen der Faktoren

Zur Charakterisierung der Effekte und Interaktionen der im ersten Schritt ermittelten 6 Faktoren wurde ein zweistufiger Vollfaktorplan mit 64 Versuchen realisiert. Die Faktoren mit den verwendeten Stufen sind in Tab. 3 angegeben. Der Untersuchungsbereich wurde für die Gasgeschwindigkeiten der Zuluftkomponenten der unteren Stufe erweitert, da anhand des Screeningversuchs weiteres Potenzial in diesem Bereich abgeleitet werden konnte.

Tab. 3: Faktoren mit zugehörigen Stufen für die Charakterisierung der Haupteinflussfaktoren und ihrer Wechselwirkungen

Faktoren			Stufen	
Komponente	Größe	Einheit	untere	obere
Zuluft global	Winkel zur Probenebene	°	35	45
	Spalthöhe	mm	10	40
	Geschwindigkeit	m/s	0,5	5
Zuluft lokal 1	Geschwindigkeit	m/s	0,5	5
Zuluft lokal 2	Geschwindigkeit	m/s	0,5	5
Prozessemission	Geschwindigkeit	m/s	100	200

Im Rahmen der Analyse wurden die signifikanten Effekte und Wechselwirkungen für ein lineares Regressionsmodell ausgewählt. In Abb. 4 (a) ist der resultierende Normal-Plot angegeben. Je weiter die Effekte und Wechselwirkungen von der eingezeichneten Führungslinie entfernt liegen, umso stärker ist ihr Einfluss auf die Zielgröße 1%-Grenze. Im rechten oberen Bereich befinden sich die Effekte zur Verringerung der 1%-Grenze, im linken unteren Bereich die Effekte und Wechselwirkungen, die zur Vergrößerung der 1%-Grenze führen.

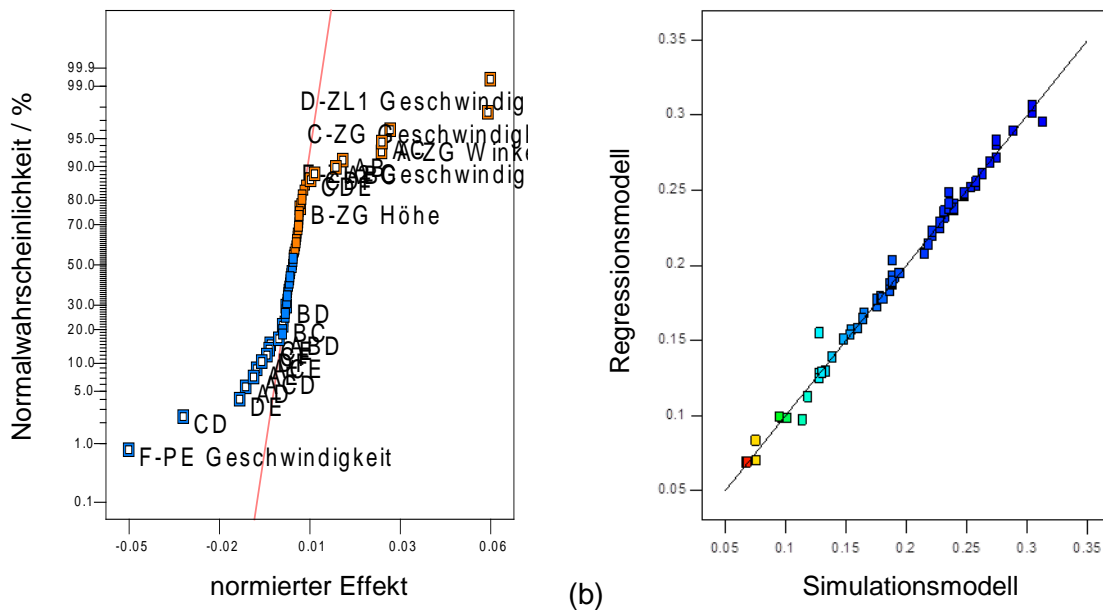


Abb. 4: (a) Normalplot der Effekte und Wechselwirkungen (b) Vorhersagegenauigkeit des Regressionsmodells im Vergleich zu den berechneten Werten des Simulationsmodells

Zusätzlich war es für ein statistisch signifikantes Modell erforderlich, eine Transformation (inverse Quadratwurzel) der Zielgröße 1%-Grenze einzuführen. Das sich ergebende Modell enthält die Faktoren sowie weitere Zweifach- und Dreifachwechselwirkungen der Faktoren und bildet die erhobenen Daten des Versuchsplans in sehr guter Übereinstimmung ab (Abb. 4 (b)). Als die stärksten positiven Faktoren im Hinblick auf die Reduzierung der 1%-Grenze konnten mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung und -auswertung die Geschwindigkeiten der Zuluftkomponenten und die Wechselwirkung der globalen Zuluftgeschwindigkeit mit dem globalen Zuluftwinkel identifiziert werden. Die stärksten negativen Einflüsse auf die 1%-Grenze haben für die angenommene Geschwindigkeit der Prozessemissionen die Zweifachwechselwirkungen zwischen globaler und lokaler Zuluftgeschwindigkeit sowie zwischen den lokalen Zuluftgeschwindigkeiten. Somit konnten die eingestellten Geschwindigkeiten der Zuluftkomponenten als die stärksten positiven und ihre Wechselwirkungen untereinander als die stärksten negativen Einflussfaktoren identifiziert werden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Es wurde ein stationäres Mehrspezies-Modell einer Versuchsanlage zum Remote-Laserstrahlschweißen entwickelt. Anhand dieses Modells wurde ein statistischer Versuchsplan entworfen und realisiert, um die Haupteinflussfaktoren aus einer Vielzahl von möglichen Faktoren zu ermitteln. Die eruierten 6 Hauptfaktoren wurden in einem weiteren Charakterisierungsversuchsplan im Hinblick auf die Stärke ihrer Effekte und Mehrfachwechselwirkungen untersucht. Dabei konnte das komplexe Zusammenspiel zwischen den einzelnen Lüftungskomponenten und ihrer Wechselwirkungen untereinander aufgedeckt werden. Es ist geplant, das lineare Modell in einem weiteren Schritt zu erweitern und hinsichtlich der Signifikanz nichtlinearer Terme zu untersuchen. Auf Grundlage dieses Modells wird es möglich sein, eine Optimierung unter dem Aspekt des Gas- und Energieverbrauchs durchzuführen. Dafür ist es weiterhin notwendig, eine Validierung und Kalibrierung des Simulationsmodells anhand der am Laser Zentrum Hannover errichteten Modellversuchsanlage durchzuführen. Insbesondere ist es erforderlich, die für einen stabilen und effizienten Remote-Laserstrahlschweißprozess akzeptable 1%-Grenze zu präzisieren.

Mit Hilfe der Ergebnisse und des verbesserten Prozessverständnisses ist ferner vorgesehen, bestehende Anlagenkonzepte hinsichtlich ihres Gas- und Energieverbrauchs zu bewerten und Empfehlungen für eine mögliche effizientere Strömungsführung auszusprechen.

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

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

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

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

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

Walter, J., Hennigs, C., Hustedt, M., Kaierle, S., Borkmann, M., Mahrle, A., 2014: „Effizienzsteigerung beim Remote-Laserschweißen durch optimierte Luftströmungsführung“, 22. Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungstechnik“ 2014 : Karlsruhe, 9.-11.9.2014, S. 49/1-49/8

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, 8.-10.9.2015