

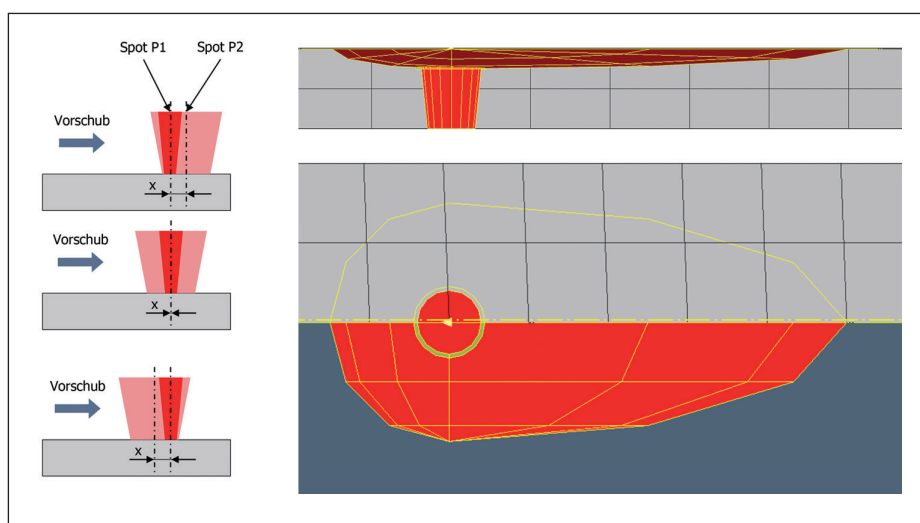
Simulation des Hochgeschwindigkeitstief-schweißens zur Vermeidung von Humping-Effekten in der Fertigung von Bipolarplatten

Brennstoffzellen nutzen Wasserstoff und Sauerstoff zur Erzeugung von elektrischem Strom sowie von Wärme und Wasser als Nebenprodukte. Jede Brennstoffzelle besteht aus mehreren hundert Bipolarplatten, die die Membran-Elektroden-Einheiten trennen und Kanäle für ein Kühlmittel enthalten. Die Bipolarplatte selbst besteht aus zwei miteinander verschweißten Metallblechen, die jeweils eine Dicke von 70 bis 100 μm aufweisen.

Die Anforderungen an die Schweißnähte liegen auf der Hand: Die Kühlkanäle müssen dicht sein, während die Verbindungen im Strömungsfeld einen geringen elektrischen Widerstand aufweisen müssen. Um solche dünnen Materialien mit fehlerfreien Schweißnähten zu verbinden, wird mit einem Single-Mode-Laser und einer geeigneten Scanner-Schweißoptik ein sehr kleiner Laserpunkt auf das Werkstück fokussiert. Eine einzige Bipolarplatte kann 1,5 oder mehr Meter laser-geschweißte Nähte aufweisen. Geht man von 200 Bipolarplatten in einer Brennstoffzelle und einer Produktionskapazität von 1 Million Brennstoffzellen pro Jahr aus, so muss eine einzige Produktionslinie 300.000 Kilometer Nahtlänge pro Jahr erzeugen. Diese Zahl ist um ein Vielfaches höher als bei konventionellen Laserschweißanwendungen im Automobilsektor und führt zu einer großen Herausforderung bei der Herstellung von Bipolarplatten: Die Maximierung der Produktionskapazität durch Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit und Reduzierung der Nebenprozesszeiten. Die Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit wird jedoch durch den, bei hohen Geschwindigkeiten einsetzenden Humping-Effekt, begrenzt.

Humping-Effekt und Lösungsansätze

Der Humping-Effekt bzw. das Humping bezeichnet das periodische Auftreten von Nahtunregelmäßigkeiten beim Schweißen mit hohen Geschwindigkeiten.



▲ Abb. 1: Positionierung und Auslegung der Wärmequellen innerhalb der Schweißsimulation.

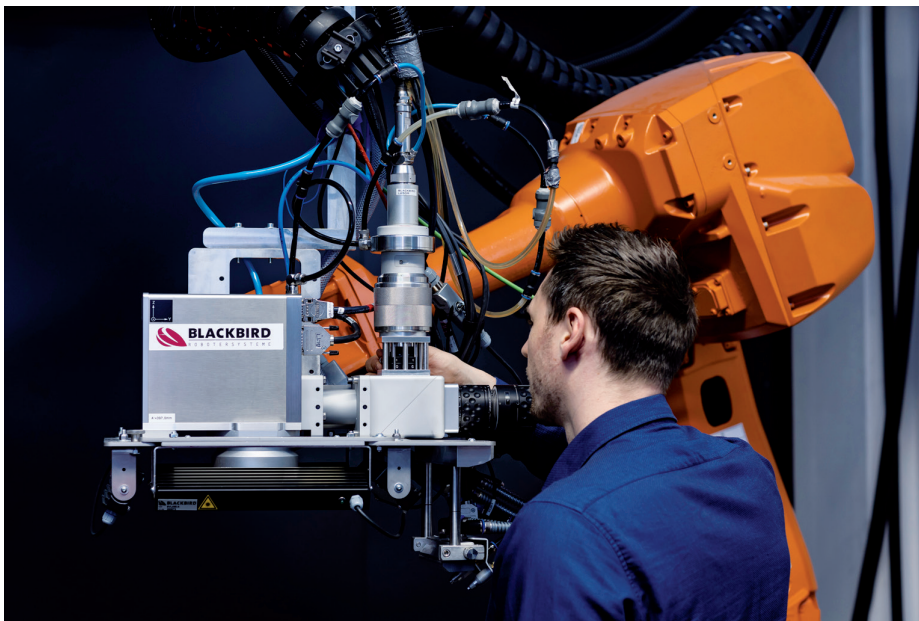
BBW LASER | 25
TECHNIK | JAHRE

Ihr Spezialist für innovative
Lasermaterialbearbeitung

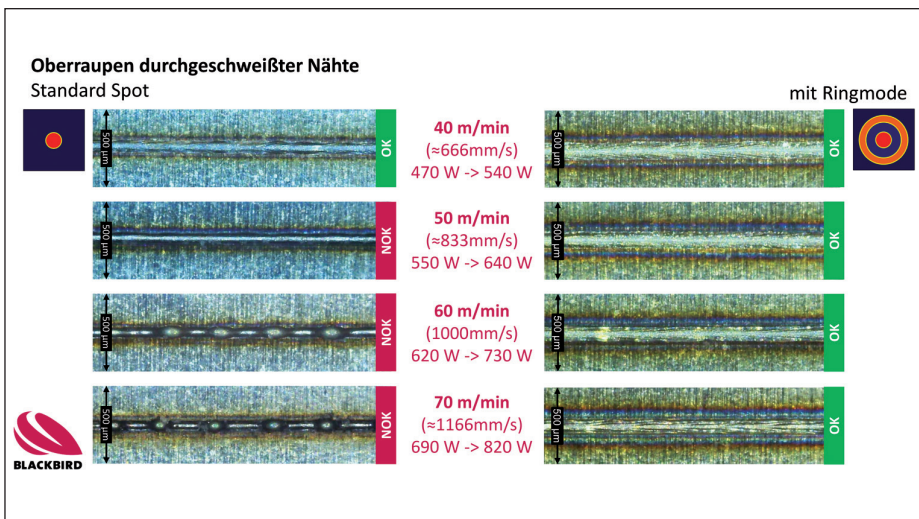
Unsere Fokusleistungen

- > Laserschweißen
- > Laserfeinschneiden
- > Laserbohren
- > Laserabtragen

BBW Lasertechnik GmbH | Gewerbering 11, 83134 Prutting
080 36 908 20-0 | info@bbw-lasertechnik.de | bbw-lasertechnik.de



▲ Abb. 2: Scankopf (SCANLAB intelliSCAN FT 2D-Scanner) mit DOE (Holo/Or Flexishaper).



▲ Abb. 3: Schweißnähte ohne (linke Bildseite) und mit (rechte Bildseite) dem Einsatz der DOEs.

Dabei hebt sich das Schmelzbad wiederholt an und fällt anschließend in sich zusammen. Der Abstand zwischen zwei Anhebungen (Humps) wird als Humpingabstand bezeichnet und nimmt mit steigender Streckenenergie zu. Abb. 3 (linke Bildseite) zeigt Schweißraupen mit entsprechenden Humps. Dieser Effekt wurde bereits bei verschiedenen Schweißprozessen beobachtet und tritt, abhängig von Material und prozessspezifischen Faktoren, ab einer definierten Grenzgeschwindigkeit ein. Das Humping wurde untersucht und

verschiedene Theorien zum Entstehungsprozess entwickelt. Unter anderem wird hierbei der Freistrahlerfall nach Rayleigh für den Zerfall der Schmelzeschlepe adaptiert (Gratzke et al. 1992) (Beyer 1995). Neumann (Neumann 2012) zeigte das beim Hochgeschwindigkeitsschweißen von Blechen aus X5CrNi1810 das Humping beim Überschreiten eines spezifischen kritischen Benutzungswinkels $91,5^\circ \pm 0,5^\circ$ der Schmelzeschlepe auftritt. Dieser tritt auf, wenn die Schmelzeschlepe eine kritische Isotherme mit 1030 ± 50 K im

oberflächennahen Temperaturfeld überfließt. Der Humpingabstand korreliert demnach mit dem Temperaturfeld. Neumann zeigte ebenfalls, dass die Entstehung von Humping durch eine Verringerung des Benetzungswinkels unterbunden werden kann. Dies wurde durch zusätzliche Erwärmung des Substrats – im speziellen der Randbereiche der Schmelze – erreicht. Dieser Ansatz soll auf das Schweißen der Bipolarplatten übertragen werden. Mittels schweißtechnischer Simulationen soll der Vorwärmeeffekt durch eine überlagerte Wärmequelle nachgebildet und die damit einhergehende Verlängerung der kritischen Isotherme bestätigt werden.

Schweißtechnische Simulation

Ziel ist es die Geometrie der Isothermen durch Anpassung der Leistungsdichteverteilung der Laserstrahlung zu beeinflussen.

Um die Möglichkeit zu untersuchen, wie die Isothermen beeinflusst werden können, wurde eine Schweißsimulation mit der Software Simufact Welding durchgeführt. Die Möglichkeit der Anpassung der Leistungsdichte (z.B. mithilfe eines diffraktiv optischen Elements – DOE) wurde durch die Überlappung von zwei Wärmequellen modelliert (s. Abb. 1).

Der Ansatz: Die Untersuchungen von Neumann (Neumann 2012) haben gezeigt, dass die Geometrie der Isothermen einer kritischen Temperatur maßgeblich für das Entstehen von Humping ist. Darüber hinaus hat er gezeigt, dass eine Anpassung der Wärmeleitung die kritische Isothermengengeometrie beeinflusst. Er hat das Blech vorgewärmt, hier soll jedoch mit einem zweiten Spot die Temperaturführung beeinflusst werden. Das übergeordnete Ziel der Simulation war, Maßnahmen abzuleiten um die Humpinggrenze zu höheren Geschwindigkeiten zu verschieben. Experimente haben gezeigt, dass mit einem Einzelspot Schweißgeschwindigkeiten von bis zu 40 m/min realisiert werden konnten.



Der Ansatz bestand darin, die Isotherme bei dieser Geschwindigkeit zu untersuchen und diese Bedingungen auch bei höheren Geschwindigkeiten abzubilden. Das sollte mithilfe eines zweiten Spots geschehen. Die Größenverteilungen der Spots, die Leistungsverteilungen und die relativen Positionen wurden variiert. Damit konnte systematisch ein Parametersatz für eine Schweißgeschwindigkeit von 70 m/min vorgeschlagen werden. Die Simulation hat gezeigt, dass sich die kritische Isotherme 1030 ± 50 K bei der Überlagerung einer zweiten Wärmequelle signifikant verlängert. Bei der Schweißgeschwindigkeit von 70 m/min entsprach die Isotherme der kritischen Temperatur der Geometrie, wie sie bei den Einzelspotbedingungen der Schweißgeschwindigkeit von 40 m/min vorlag.

Experimentelle Realisierung

Das Unternehmen Holo/Or hat mit dem Flexishaper (Brodsky und Kaplan 2021) ein Produkt entwickelt, das aus einem Paar diffraktiver optischer Elemente (DOE) besteht, die einen zentralen Spot und einen konzentrischen Ring aus Laserlicht erzeugen. Durch die Einstellung des relativen Winkels zwischen den beiden DOEs kann die räumliche Leistungsverteilung zwischen Kern und Ring frei eingestellt werden. Eigenschaften wie der Ringdurchmesser sind durch das Design der DOEs vorgegeben. Die aus der Schweißsimulation gewonnenen Erkenntnisse wurden genutzt, um ein prozessspezifisches DOE-Paar zu definieren und damit den Prozess aus einer simulierten Umgebung in eine reale Umgebung zu übertragen.

Das DOE-Modul ist in einem SCANLAB intelliSCAN FT 2D-Scanner mit einer optischen Vergrößerung von 1:1,93 montiert, siehe Abb. 2. Als Strahlquelle wurde ein IPG SM-Laser mit einem Modendurchmesser von 14 μm verwendet, was zu einem zentralen Laserspot von 27 μm führt. Als Werkstücke wurden Edelstahlfolien mit einer Dicke von 100 μm in einer

spaltfreien Überlappungsverbindung verwendet. Zunächst wurden Versuche mit einem üblichen Spot durchgeführt, ohne Ringmode. Diese Versuche waren erforderlich, um die Grenzen des regulären Prozesses zu ermitteln: Wie variiert das Auftreten von Schweißfehlern in Abhängigkeit von der verwendeten Laserleistung und der Bearbeitungsgeschwindigkeit? Für die Vergleichsversuche wurde der Ringmode hinzugeschaltet, indem die relative Ausrichtung der DOE-Platten zueinander variiert wurde.

Zunächst wurde eine Versuchsreihe mit den gleichen Kombinationen von Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit durchgeführt. Es lassen sich zwei wesentliche Auswirkungen beobachten: Wie erwartet, wurde das Auftreten von Humping und Hinterschneidungen zu höheren Schweißgeschwindigkeiten verschoben.

Im Gegensatz dazu ist die Einbrandtiefe im Vergleich zu einer Schweißnaht ohne DOE bei gleicher Laserleistung und Geschwindigkeit geringer. Der Grund dafür ist die geringere Laserleistung, die in den zentralen Spot eingebracht wird. Anschließend wurden weitere Versuche mit angepasster Streckenenergie durchgeführt, um zu zeigen, dass auch bei 70 m/min Humping-freie Durchschweißungen erzielt werden können. Der Standardspot führt zu starkem Humping, während die Schweißung mit Strahlformung eine glatte Nahtoberfläche erzeugt, siehe Abb. 3. Durch eine Erhöhung der Leistung auf bis zu 820 W wurden zugleich stabile Durchschweißungen erzielt. Insgesamt wurde die Schweißgeschwindigkeit im Vergleich zur Maximalgeschwindigkeit ohne Strahlformung um 55 % erhöht.

Eine ausführlichere Beschreibung der erzielten Schweißergebnisse kann (Bautze-Scherff et al. 2022) entnommen werden.

Zusammenfassung

Eine zusätzliche Wärmequelle sorgt für einen flacheren Temperaturgradienten orthogonal zum Schmelzbad

und zu einer Verlängerung der kritischen Isothermen im oberflächennahen Temperaturfeld. Die Schmelzbadgröße selbst wird nicht wesentlich vergrößert.

Der Einsatz von DOEs ermöglicht die Integration in den Realprozess (Bautze-Scherff et al. 2022). Schweißsimulationen können dazu beitragen, dass die Strahlformung so definiert werden kann, dass die berechneten Vorteile im Realprozess tatsächlich umgesetzt werden können. Die hier gezeigte gemeinsame Forschung der Jade Hochschule Wilhelmshaven mit den Firmen Blackbird, SCANLAB und Holo/Or hat gezeigt, dass ein konventioneller Singlemode-Laser in Kombination mit einer prozessspezifischen Strahlformung eingesetzt werden kann, um die Humping-Grenze zu höheren Schweißgeschwindigkeiten zu verschieben.

■ INFO

Autoren:

Malte Schmidt¹, Daniel Reitemeyer², Thibault Bautze-Scherff³, Knut Partes¹

¹Jade Hochschule – Labor für Laser- und Schweißtechnik, Wilhelmshaven, Deutschland

²SCANLAB GmbH, Puchheim, Deutschland

³Blackbird Robotersysteme GmbH, Garching, Deutschland

Literaturverzeichnis:

Bautze-Scherff, Thibault; Reitemeyer, Daniel; Kaplan, Natan (2022): Beam shaping with diffractive optical elements for bipolar plates. Online verfügbar unter: <https://www.laserfocusworld.com/laser-processing/article/14233378/beam-shaping-with-diffractive-optical-elements-for-bipolar-plates> (zuletzt geprüft am 28. April 2022).

Beyer, Eckhard (1995): Schweißen mit Laser. Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer (Laser in Technik und Forschung).

Brodsky, Alexander; Kaplan, Natan (2021): Adjustable ring shaping for laser welding applications. In: PhotonicsViews 18 (5), S. 42–45. DOI: 10.1002/phvs.202100046.

Gratzke, U.; Kapadia, P.D.; Dowden, J.; Kroos, J.; Simon, G. (1992): Theoretical approach to the humping phenomenon in welding processes. In: J. Phys. D: Appl. Phys. (25), S. 1640–1647.

Neumann, Steffen (2012): Einflussanalyse beim single mode Faserlaserschweißen zur Vermeidung des Humping-Phänomens. Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2011. Bremen: BIAS (Strahltechnik, 48).