



Neuartiges Verfahren zum druckdichten Laserstrahlschweißen von Aluminium aus Atmosphären-Druckguss

Mit neuen Ansätzen im Laserstrahlschweißen lassen sich qualitativ hochwertige Schweißverbindungen bei druckgegossenen Komponenten reproduzierbar erzeugen.

VON DIRK DITTRICH, JENS STANDFUSS
UND AXEL JAHN, DRESDEN

Einleitung und Motivation

Moderne Leichtmetall-Gusskomponenten tragen in entscheidendem Maße zum konstruktiven Leichtbau bei gleichzeitig hoher Funktionsintegration der Bauteile bei. Insbesondere die Erzeugung filigraner Rippen zur Erhöhung der Bauteilsteifigkeit von strukturelevanten Gussknoten und die Ausformung von dünnwandigen Pumpen- bis hin zu komplexen Kurbelgehäusen mit hervorragender mechanischer und thermischer Belastbarkeit sind für die Automobilbranche zum technischen Stan-

dard geworden. Diese Entwicklung steht im Einklang mit den Erfolgen, die bei der Gewichtsreduzierung von modernen Fahrzeugen aktuell erzielt werden und die Einsparung fossiler Brennstoffe zur Reduzierung der Emissionen von Personen-Kraftwagen ermöglichen. Für Leichtmetall-Legierungen auf Al- bzw. Mg-Basis wird dabei überwiegend das Atmosphären-Druckgießverfahren eingesetzt. Limitierend für die weitere Verbreitung solcher Komponenten im konstruktiven Leichtbau sind fehlende fügetechnische Lösungsmöglichkeiten mit effizienten Verfahren.

Der Einsatz von Strahlverfahren, insbesondere mit dem Elektronenstrahl, eröffnete in der Vergangenheit Insellösun-

gen. Diese waren jedoch aufgrund der unzureichenden Weiterentwicklung des Verfahrens mit hohen Kosten verbunden. Zudem standen fehlende Ansätze zur Steigerung der realisierbaren Stückzahlen, insbesondere im Hinblick auf die zunehmende Gleichteileproduktion, der Verbreitung des Verfahrens entgegen.

Der Laserstrahl bietet hier große Vorteile für die Produktion. Als problematisch galt bisher das Handling der schmelzflüssigen Phase, bedingt durch den hohen Gasgehalt im Druckguss, der zu starker Porosität und stochastisch auftretenden Auswürfen der Schmelze führt. Druckdichte Schweißverbindungen konnten nicht garantiert werden [1, 2, 3]. Zu-

dem führte der fortwährende Qualitätsanspruch nach vollständig porenfreien Fügeverbindungen zu einer unlösbaren Aufgabe.

Anders stellt sich die Situation mit der gegenwärtigen Entwicklung der Laserstrahlquellen dar. Getrieben durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Strahlwerkzeuge in den letzten Jahren und die erheblich reduzierten Investitionskosten je Kilowatt Laserleistung steigt deren Attraktivität für die Massenproduktion. Ergänzt durch die Verfügbarkeit von effektiv arbeitenden Optiksystemen zur Strahlableitung eröffnen sich neue Lösungsansätze insbesondere für den Einsatz von schwierig schweißbaren Werkstoffen.

Die Motivation bestand darin, die Prozessführung zum Laserstrahlschweißen so weiterzuentwickeln, dass bestehende Qualitätseinschränkungen überwunden werden. Der am Fraunhofer IWS entwickelte Ansatz, den Schweißprozess aktiv durch hochfrequente Strahloszillation zu beeinflussen und dadurch die Schweißnahtqualität deutlich zu erhöhen, war Ziel der Forschung. Die drastische Reduzierung von Poren im Schweißgut sowie die sichere Vermeidung von Schmelzbadauswürfen standen im Mittelpunkt der Untersuchungen, um qualitätsgerechte Schweißverbindungen zu ermöglichen.

Stand der Technik

Charakteristische Schweißnahtfehler für Aluminiumdruckguss lassen sich auf die Bildung von Heiß- und Erstarrungsrissen sowie metallurgisch und prozessbedingte Poren eingrenzen (Bild 1) [1, 2, 3]. Ein Spezifikum für Druckgusslegierungen sind Schmelzbadauswürfe, die unter anderem durch den explosionsartig freiverdenden Gasdruck aus den herstellungsbedingt in der erstarrten Matrix vorhandenen Poren stammen und in stochastischen Abständen auftreten. Druckguss weist darüber hinaus prozessbedingt sehr hohe Wasserstoffgehalte auf [4], wodurch beim Laserstrahlschweißen vermehrt Poren im Schweißgut entstehen.

Als Ursachen für die in Leichtmetall-Legierungen typischen Poren im Schweißgut können u. a. folgende Punkte genannt werden:

- > vergleichsweise kleine Schmelzbäder mit geringer Lebensdauer und beschränkten Ausgasungsbedingungen sowie
- > verhältnismäßig geringe Schmelzbadbewegungen, die ein schnelles Aufstei-

KURZFASSUNG:

Moderne Leichtmetall-Gusskomponenten tragen in entscheidendem Maße zum konstruktiven Leichtbau bei gleichzeitig hoher Funktionsintegration der Bauteile bei. Für Leichtmetall-Legierungen auf Al- bzw. Mg-Basis wird dabei überwiegend das Atmosphären-Druckgießverfahren eingesetzt. Insbesondere dünnwandige Querschnitte bieten die Möglichkeit, filigrane Rippen zur Erhöhung der Bauteilsteifigkeit auszubilden oder stellen die Schnittstelle für Anschlusskomponenten dar. Diese Entwicklung steht im Einklang mit den Erfolgen, die bei der Gewichtsreduzierung von modernen Fahrzeugen aktuell erzielt werden.

Andererseits gelten Druckgussbauteile bedingt durch den Herstellungsprozess als schwer bis nicht schmelzschweißbar. Gründe dafür sind u. a. verfahrensbedingt eingeschlossene Gase, die als Lunker oder Poren auftreten und unter hohem Druck stehen. Während des Schweißprozesses kommt es verstärkt zu Porenbildung im Schweißgut und stochastisch zu Auswürfen, die einem bestimmungsgemäßen Einsatz des Bauteils entgegenstehen.

Um die genannten Probleme zu überwinden, wurde am Fraunhofer IWS ein Lösungsansatz entwickelt, mit dem der Schweißprozess aktiv durch hochfrequente Strahloszillation beeinflusst wird. Mit dieser Technologie besteht erstmals die Möglichkeit, qualitativ hochwertige Laserstrahlschweißverbindungen reproduzierbar zu erzeugen, die durch herkömmliches Laserstrahlschweißen nicht realisierbar waren. Die drastische Reduzierung von Poren im Schweißgut sowie die sichere Vermeidung von Schmelzbadauswürfen standen im Mittelpunkt der Untersuchungen, um die Erzeugung qualitätsgerechter Schweißverbindungen zu ermöglichen. Darüber hinaus ist durch die lasertypische, konzentrierte, lokal begrenzte Wärmebringung ein Bauteilverzug kaum noch messbar. Geringe geometrische Bauteiltoleranzen und ein reproduzierbares Fügeverfahren mit hoher Bauteilqualität in der Serie sind somit gewährleistet. Am Beispiel einer Serienanwendung im Automobilbau wird das Potenzial des Verfahrens aufgezeigt.

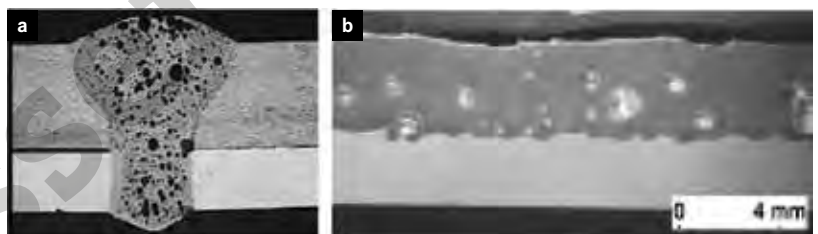


Bild 1: Charakteristische Schweißnahtfehler in Aluminium bzw. Aluminium-Druckguss: a) durch zwangsgelöste Gase hervorgerufene Poren; b) Prozessporen.

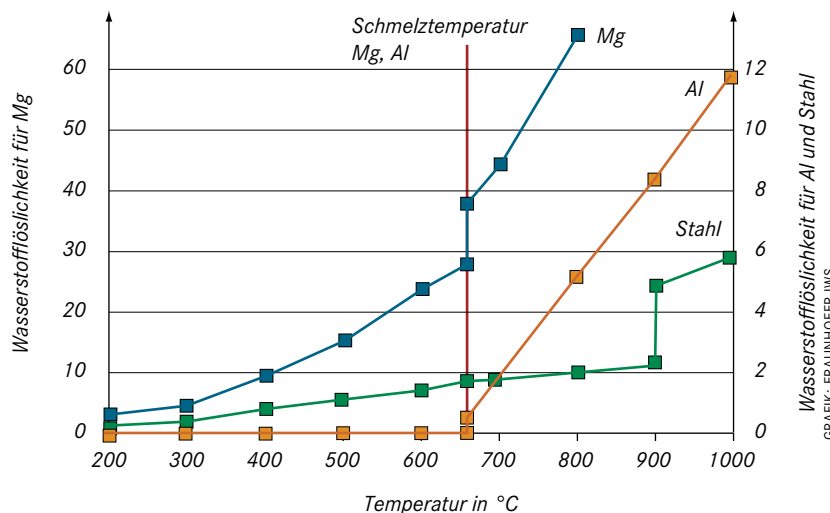


Bild 2: Wasserstofflöslichkeit in der Schmelze für die Werkstoffe Aluminium, Magnesium und Stahl.

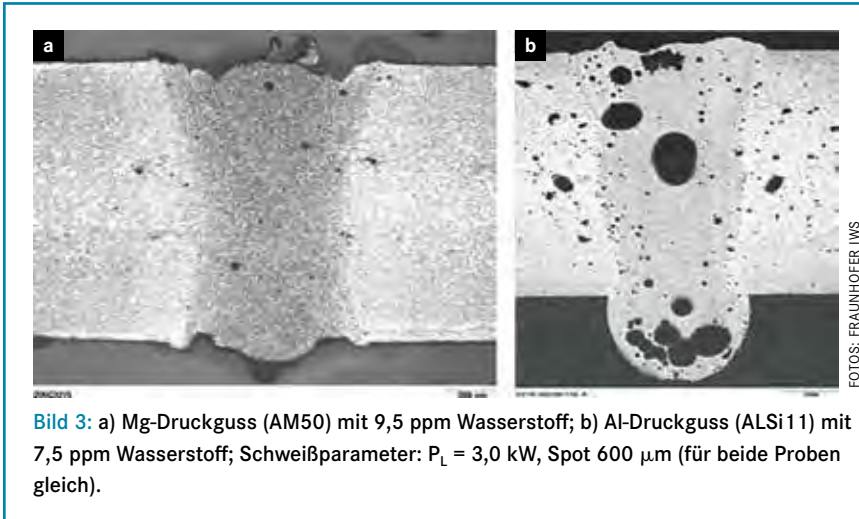


Bild 3: a) Mg-Druckguss (AM50) mit 9,5 ppm Wasserstoff; b) Al-Druckguss (ALSi 11) mit 7,5 ppm Wasserstoff; Schweißparameter: $P_L = 3,0 \text{ kW}$, Spot $600 \mu\text{m}$ (für beide Proben gleich).

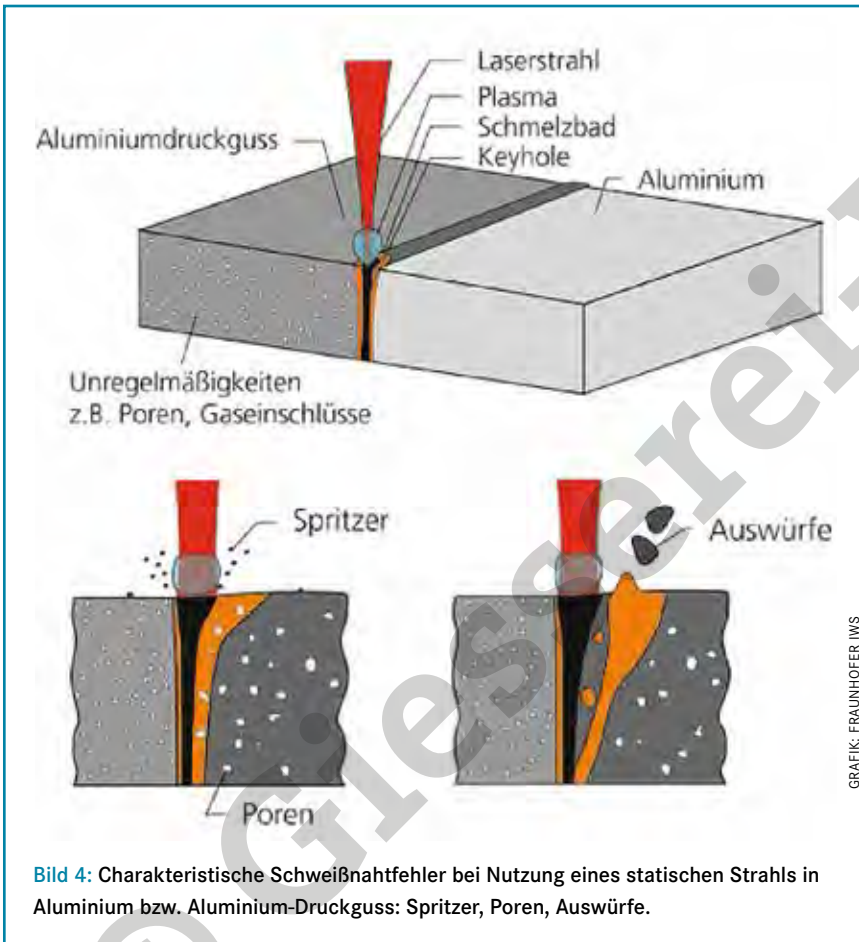


Bild 4: Charakteristische Schweißnahtfehler bei Nutzung eines statischen Strahls in Aluminium bzw. Aluminium-Druckguss: Spritzer, Poren, Auswürfe.

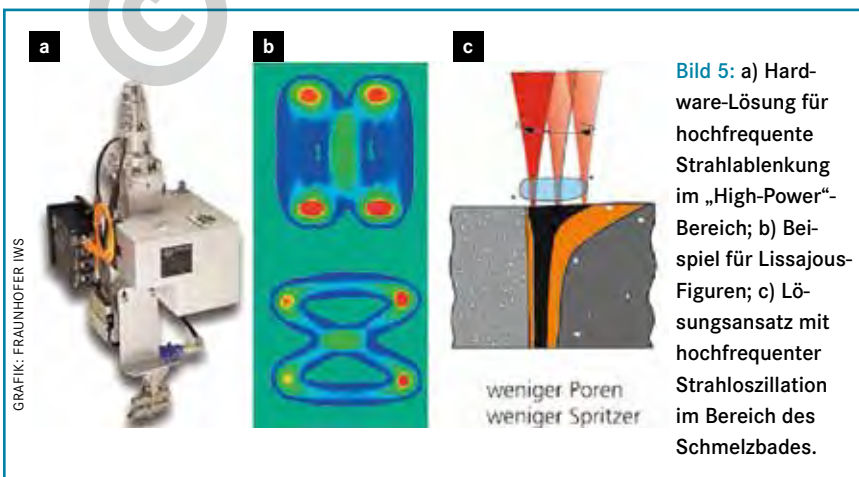


Bild 5: a) Hardware-Lösung für hochfrequente Strahlableitung im „High-Power“-Bereich; b) Beispiel für Lissajous-Figuren; c) Lösungsansatz mit hochfrequenter Strahlloszillation im Bereich des Schmelzbades.

gen der Poren in der Schmelze verhindern.

Weitere Faktoren sind das Schmelzintervall der Legierung, welches bei Gusslegierungen, die nahe am eutektischen Punkt liegen, sehr kurz ist und die Gaslöslichkeit (z. B. H_2) in der Schmelze. Der klassische Ansatz zum Laserstrahlschweißen technischer Leichtmetalle (Aluminium, Magnesium) verwendet eine statische Strahlführung, bei der die eingebrachte Energie physikalisch bedingt unterschiedliche Schmelzbadgrößen hervorruft.

Die somit bessere Möglichkeit der Schmelzbadausgasung führt jedoch nicht zu einer qualitativ hochwertigen Schweißverbindung. Die sehr geringe Löslichkeit von Wasserstoff in der erstarrten Al-Matrix (Bild 2) führt letztlich zum Verbleib von Poren im Schweißgut. Im Falle des Werkstoffs Magnesium stellt sich ein anderes Bild dar. Es entsteht bei gleichem Energieeintrag ein sehr kleines Schmelzbad. Zwar weist Magnesium einen großen H_2 -Löslichkeitssprung bei der Erstarrung flüssig/fest auf. Die H_2 -Löslichkeit in der festen Matrix ist jedoch wesentlich größer als im Aluminium. Die zu erwartende Schweißnahtqualität entspricht damit besser den Erwartungen der Qualitätssicherung. Dies wird im Vergleich von Laserschweißverbindungen an Mg- bzw. Al-Druckgusslegierungen deutlich (Bilder 3a und b). Aus den bisherigen Betrachtungen wird sichtbar, dass zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden müssen, um die bisher gezeigte Schweißnahtqualität, insbesondere die von Aluminium-Druckguss, zu verbessern.

In der Forschung untersuchte oder als praxisnahe Lösungen beschriebene Verfahren zur Vermeidung von Poren sind gekennzeichnet durch statische Strahlformung oder dynamische Strahlführung. Die statische Strahlformung als Doppel- oder Mehrfachfokus hat die Verlängerung der Schmelzbadlebensdauer zum Ziel, um die Ausgasung der Schmelze zu gewährleisten. Darüber hinaus wird seit einigen Jahren das Laserstrahlschweißen unter Vakuum zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Schweißverbindungen erprobt. Die komplizierte Prozesstechnik und -führung stellt jedoch die bisher bekannten Vorteile des LSS und dessen Wirtschaftlichkeit in Frage.

Diese Ansätze sind jedoch ungeeignet, um massive Schmelzbadauswürfe zu schließen und eine homogene Nahtausbildung ohne Schweißnahtunterbrechungen zu gewährleisten. Hier greifen unter anderem dynamische Methoden, wie zum

Beispiel die der Strahloszillation, an. Durch eine schnelle Schmelzbadströmung soll eine Beschleunigung der Schmelzbadausgasung ermöglicht werden [1, 2, 3, 5].

Limitierend bei diesen Ansätzen sind die fehlende Steuerungsmöglichkeit, die Schmelzbadynamik über den Laserstrahl ausreichend zu beeinflussen, um Gasblasen zu entfernen sowie die ungenügende Führung der Schmelze zur Glättung der Nahtoberfläche nach einem Schmelzbadauswurf. Bisher verfügbare Strahlablenkoptiken waren im Wesentlichen dafür konzipiert, einen statischen Strahl zu verschiedenen Schweißpunkten innerhalb eines definierten Feldes zu bewegen. Die dafür erforderliche Scan-Frequenz liegt bei maximal einem Kilohertz. Durch die bisher genannten Ansätze wurde weiterhin nicht sichergestellt, dass die Keyhole-Stabilität während des gesamten Schweißprozesses gewährleistet wird. Das Kollabieren des Keyholes und somit eine stark fluktuierende Schmelze während der Prozessführung kann nicht verhindert werden. Zusätzliche prozessbedingte Poren sind nicht vollständig auszuschließen. Das Ergebnis der genannten Ereignisse sind feine Spritzer, massive Auswürfe und eine Vielzahl von Poren im Schweißgut (Bild 4).

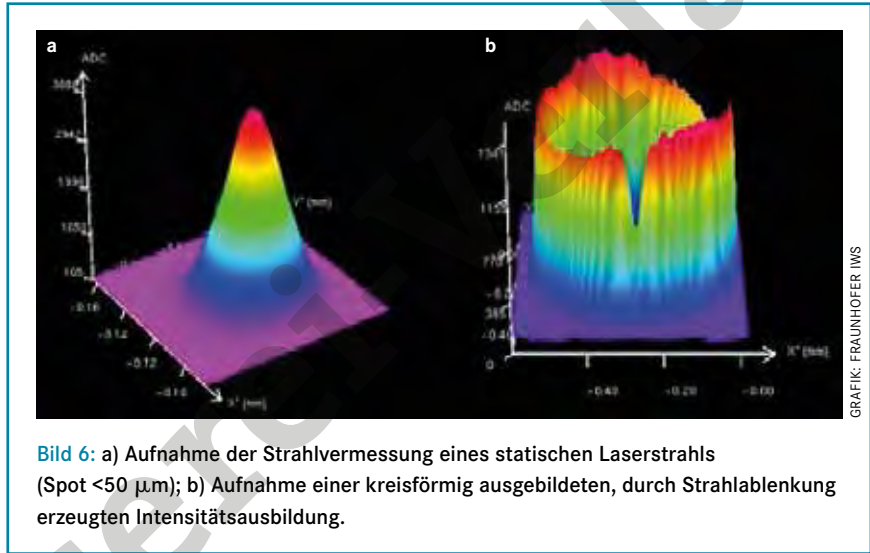


Bild 6: a) Aufnahme der Strahlvermessung eines statischen Laserstrahls (Spot <math>< 50 \mu\text{m}</math>); b) Aufnahme einer kreisförmig ausgebildeten, durch Strahlablenkung erzeugten Intensitätsausbildung.

Lösungsansatz

Statt wie bisher Laserstrahlen mit großem Spot (ca. 400 bis 600 μm bei 4 bis 6 kW Laserleistung) einzusetzen, findet für den neu entwickelten technologischen Ansatz ein Single-Mode-Faserlaser mit sehr kleinem Spot (<math>< 100 \mu\text{m}</math>) und geringer Leistung (ca. 1 kW) Verwendung. Manipuliert wird der Strahl über einen erstmals für die Makrobearbeitung verfügbaren Scanner mit hoher Pendelfrequenz für eine

Bearbeitungsfläche von ca. 10 x 10 mm² und einen hochfrequenten Arbeitsbereich innerhalb dieses Feldes von 1,5 x 1,5 mm². Somit steht ein neues Strahlwerkzeug zur hoch dynamischen Modulation des Laserstrahls zur Verfügung.

Die im Rahmen eines öffentlich geförderten Projektes erarbeitete Hardware-Lösung ermöglicht die Strahloszillation im Kilohertz-Bereich auf einer dem Schmelzbad angepassten Größe von ca. 1,5 x 1,5 mm² (Bild 5). Zudem kann eine an die

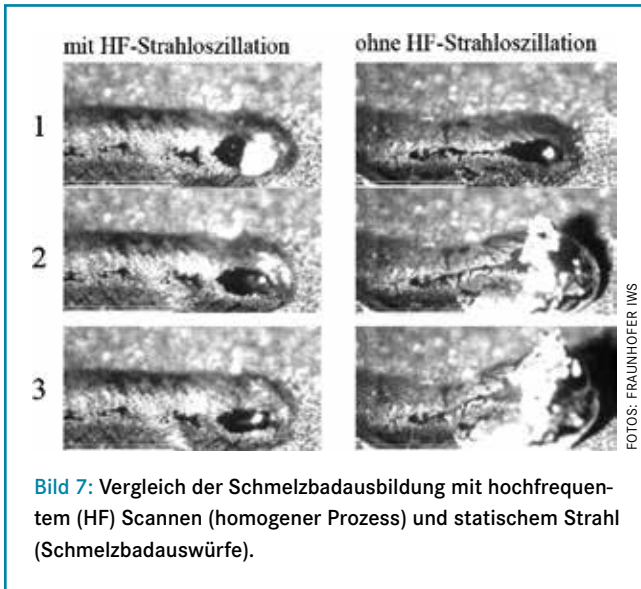


Bild 7: Vergleich der Schmelzbadausbildung mit hochfrequentem (HF) Scannen (homogener Prozess) und statischem Strahl (Schmelzbadauswürfe).



Bild 8: Schweißergebnis einer Schweißverbindung aus Druckguss und Knetlegierung unter Verwendung eines statischen Laserstrahls.

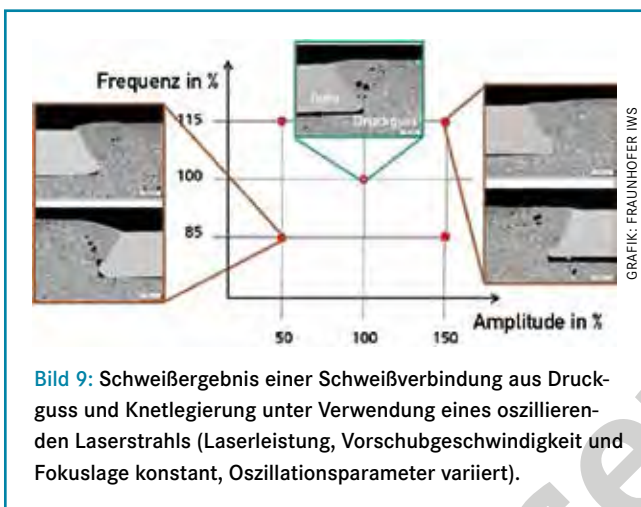


Bild 9: Schweißergebnis einer Schweißverbindung aus Druckguss und Knetlegierung unter Verwendung eines oszillierenden Laserstrahls (Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit und Fokusslage konstant, Oszillationsparameter variiert).



Bild 10: Schweißergebnis einer Schweißverbindung aus Druckguss und Knetlegierung unter Verwendung eines oszillierenden Laserstrahls (Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit und Fokusslage konstant, Spaltbreite zwischen den Fügepartnern variiert).

speziellen Bedingungen im Schmelzbad angepasste Oszillations-Funktion mit abgestimmter Laserleistungsregelung angewendet werden. Durch diese hochfrequente 2-D-Strahloszillation sind sogenannte Lissajous-Figuren abbildbar, die der Schweiß-Vorschubbewegung überlagert werden und somit eine gezielte Beeinflussung der Wechselwirkung zwischen Schmelzbad und Laserstrahl ermöglichen. Unter Berücksichtigung der hohen Schmelzbadviskosität von Aluminium lässt sich eine andere Schmelzbad-dynamik erzeugen, als es mit statischer Strahlführung möglich war. Damit besteht die Möglichkeit der Keyhole-Stabilisierung, insbesondere bei akzeptablen Schweißgeschwindigkeiten. Diese neuartige, hochdynamische Strahloszillation erweitert den Prozessdatensatz sowohl um eine Geometriekomponente wie auch um eine daraus resultierende x-, y-Amplitudenvariation. Die prozesstechnische Herausforderung liegt in der Ermittlung geeigneter Strahloszillationsparameter, die im Zusammenspiel mit der Schmelzbadviskosität eine angepasste Schmelz-

baddynamik bewirken und die Stabilität des Keyholes erhöhen sollen.

Experimentelle Umsetzung und Ergebnisse

Zur Beschreibung der Strahlformungsmöglichkeiten wurde das Ergebnis einer am statischen Strahl durchgeführten Strahlvermessung der einer kreisförmig ausgebildeten Scan-Kontur gegenübergestellt (Bild 6). Am Beispiel des Kreises wird deutlich, dass die Kontur auch bei hohen Frequenzen homogen abgebildet werden kann. Die Herausforderung für die Ermittlung geeigneter Prozessparameter liegt in der experimentellen Erprobung verschiedenster Scan-Konturen und deren Wirkung auf das Schweißergebnis. Dazu wurden im ersten Schritt Einschweißkurven in Druckgussmaterial des Werkstoffes Aluminium mit und ohne Strahloszillation erstellt. Im Ergebnis zeigt sich eine deutliche Prozessberuhigung, verbunden mit einer drastischen Reduktion der Spritzerbildung (s. Bild 6). Die grundlegende Erkenntnis dabei ist: je höher die Frequenz, desto ru-

higer der Prozess. Abhängig ist dieser Zusammenhang von der Amplitude der Strahlablenkung und der Schweißgeschwindigkeit sowie von der Schweißtiefe. Aufnahmen der Keyhole-Ausbildung mit einer High-Speed-Kamera über die Prozessdauer bestätigen zudem dessen höhere Stabilität gegenüber temporären Schmelzbadfluktuationen, die ohne Scannen zum teilweisen oder vollständigen Kollabieren des Keyholes führen. Mit dem gewonnenen Prozessverständnis können die Wechselwirkungszusammenhänge für Druckgusslegierungen neu bewertet werden. Während der Versuche wurde beobachtet, dass der Schmelzpool bei einem hochfrequent oszillierten Schweißprozess sehr homogen und weitgehend frei von Auswürfen ist. Der Standardprozess (statischer Strahl) hingegen zeigte stochastisch auftretende, heftige Schmelzbadbewegungen, massereiche Spritzer und explosionsartige Auswürfe. Generell zeigten sich deutlich mehr wellenartige Schmelzbadbewegungen an der Oberfläche, verglichen mit dem Schweißprozess und überlagert HF-Strahloszillation (Bild 7).

Anwendung auf die Praxis

Für ein Kundenbauteil aus Al-Druckguss (AlSi9Cu), welches mit einem Rohr der Knetlegierung (AlMg5) zu verbinden war, wurde das Laserstrahlschweißen mit hochfrequenter Strahloszillation optimiert und konventionellen Laserschweißverfahren gegenübergestellt. Die Herausforderung lag in der Sicherstellung einer hochbelasteten, druckdichten Fügeverbindung, die auch nach Jahren im Betrieb mediendicht sein sollte. Das Laserstrahlschweißen stellt für diese Randbedingungen den idealen Verfahrensansatz dar, um stoffschlüssige, über die Lebensdauer druckdichte Fügeverbindungen zu erzeugen. Mit den zuvor durchgeführten Untersuchungen am gewalzten Blech war die Basis für das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen hochfrequent oszillierendem Laserstrahl und Werkstoff gelegt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden für die Mischverbindung aus konventionellem Druckguss und gewalztem Halbzeug neu bewertet und es wurde eine anwendungsorientierte Versuchsmatrix erstellt.

Zunächst wurde der Wasserstoffgehalt im Druckguss bestimmt. Dieser war mit 13 ppm sehr hoch. Erste Schweißergebnisse mit feststehendem Strahl bestätigten die bisher bekannten Erkenntnisse. Im Ergebnis entsteht eine Schweißnaht mit extrem vielen Poren (Bild 8). Die Aufnahme wurde von einem Bereich angefertigt, der auswurfrei ist. Die Schweißnaht wäre an dieser Stelle vermutlich druckdicht. Es ist jedoch zu befürchten, dass unter zyklischer Belastung die Stege zwischen den Poren versagen und ein verzögerter Mediendurchtritt stattfinden würde.

Die im Lösungsansatz beschriebene Schweißtechnologie des hochfrequenten Strahloszillierens wurde experimentell auf das Bauteil adaptiert und prototypisch bewertet. Zur Absicherung des Schweißprozesses für die Praxis wurden zudem umfangreiche Prozessstudien umgesetzt. Entsprechend der Vorversuche wurde eine geeignete Scan-Funktion gewählt und für diese das optimale Prozessfenster hinsichtlich Scanfrequenz und Amplitude experimentell bestimmt. Anschließend wurde bei konstanter Leistung und Vorschubgeschwindigkeit geprüft, wie tolerant der Schweißprozess auf Veränderungen der Prozessparameter reagiert (Bild 9). Die Schlibbilder zeigen Schweißverbindungen mit sehr wenigen, vereinzelt auftretenden Poren, bei nahezu konstanter Einschweißtiefe. Die vorhandenen Poren ordnen sich vermehrt im Bereich des Druckgusses an. Weiterhin wird sichtbar, dass ein großer Teil der Poren nicht größer ist als die in

der Grundmatrix präsenten Fehlstellen und gusstypischen Lunker. Die Gefahr eines Durchbruchs der Stege zwischen den verbleibenden Poren und damit des Versagens der Schweißnaht ist drastisch reduziert. Die Bauteile, die mit dieser Technologie geschweißt wurden, waren nach Vibrationstests beim Kunden weiterhin druckdicht.

Die Querschliffe in Bild 10 wurden Proben entnommen, die bei konstanten Schweißparametern gefügt wurden, jedoch einen umlaufenden Spalt von entweder 0,1 oder 0,2 mm aufwiesen. Es zeigt sich deutlich die spaltbedingte Veränderung der Einschweißtiefe. Je größer der Spalt, desto tiefer ist die Schweißnaht in der Fugestelle positioniert. Die Anzahl der in dieser Ebene sichtbaren Poren steigt mit zunehmender Menge an umgeschmolzenem Druckgussmaterial.

Ziel sollte es deshalb sein, neben der Maßgabe eines technischen Nullspaltes möglichst wenig Druckgussmaterial im Prozess aufzuschmelzen. Dazu dient die im Strahlengang integrierte Kamera, durch die eine aktive, automatisierte Bilderkennung möglich ist und somit der Laserstrahl exakt positioniert werden kann. Dennoch kommt es im Gesamtprozess vereinzelt zu moderaten Auswürfen, die jedoch durch erneutes Überschweißen der Naht geschlossen werden können. Ergebnis des neuen Technologieansatzes für die Verarbeitung von Druckguss ist eine hohe Prozesskonstanz, verbunden mit einer geringen Fehlerrate.

Bei einem weiteren Bauteil, für das die Technologie des hochfrequenten Strahlpendelns erprobt wurde, handelt es sich um einen stranggepressten Al-Hohlprofilabschnitt, der an seinen Enden mit je einem Al-Druckgussflansch verschweißt werden muss (Bild 11). Dieses Bauteil dient der Kühlung von Batteriesystemen für die Anwendung in der Elektromobilität. Die Sicherstellung druckdicht ausgeführter, segmentierter Schweißverbindungen stellt die Herausforderung für dieses Bauteil dar. Das Ausschweißen von Eckkonturen sowie variierende Spaltgrößen erschweren die Prozessentwicklung zusätzlich. Dennoch zeigen die Ergebnisse der ersten Probeschweißungen großes Potenzial und unterstreichen damit die Wirksamkeit des gewählten Technologieansatzes.

Zusammenfassung

Es wurde eine Technologie zur Erzeugung druckdichter Schweißverbindungen für Al-Druckgussbauteile entwickelt. Der erarbeitete Ansatz ermöglicht durch hochfrequente Strahloszillation die Stabilisie-



FOTO: FRAUNHOFER IWS

Bild 11: Lasergeschweißte Kühlkomponente, bestehend aus einem Hohlprofil und zwei Druckgussflanschen.

rung des Keyholes, die gezielte Schmelzbadführung und die Beeinflussung der Schmelzbadströmung und führt somit zu einer weitgehenden Eliminierung von druckgusstypischen Poren im Schweißgut. Damit steht erstmals ein industrietaugliches Fügeverfahren zum Laserstrahlschweißen von Leichtmetalldruckgusslegierungen in der Großserie zur Verfügung. Der Schweißprozess ist sehr effizient und stabil, wodurch kurze Taktzeiten möglich werden. Weiterhin gestatten der lokal begrenzte Energieeintrag und die geringe Laserleistung die Darstellung verzugsarmer 3-D-Bauteile. Gemeinsam mit dem engagierten Kunden konnte somit in sehr kurzer Entwicklungszeit eine innovative Lösung in die Serienproduktion überführt werden.

Dr.-Ing. Dirk Dittrich, Dr.-Ing. Jens Standfuß und Dr.-Ing. Axel Jahn, Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS), Dresden

Literatur:

- [1] Gref, W.: *Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrix-technik*. Diss. 2005, IFSW Stuttgart, Herbert Utz Verlag, München.
- [2] Seefeld, T., u. a.: *Prozessverständnis beim Strahlschweißen von Aluminium*. DVS-Bericht, Band 266, 2010. S. 45-51.
- [3] Nörneberg, K.; Runge, J.: *Wasserstoffporosität beim Schmelzschweißen von Aluminiumwerkstoffen (Teil 2)*. Aluminium 68 (1992), [Nr. 5].
- [4] Jüttner, S.: *Untersuchungen zum Schutzgasschweißen von Magnesiumlegierungen für Konstruktionsbauteile im Automobilbau*. Diss. 1999, TU Braunschweig, Shaker Verlag Aachen, 2000.
- [5] Klassen, M.; Skupin, B.; Sepold, G.: *Process instabilities by laser beam welding of aluminium alloys generated by laser modulations*. Proceedings, 13th Int. Congress on Laser and Optics in Manufacturing, Laser 97. SPIE, Vol. 3097, S. 137-146.