Abdruck aus Laser Magazin 2/2006

Laserstrahlschweißen mit magnetischer Beeinflussung

Das Laserstrahlschweißen hat aufgrund seiner Zuverlässigkeit, Effizienz und Qualität der produzierten Nähte in vielen metallverarbeitenden Branchen Fuß gefasst und erlebt derzeit eine zunehmende Verbreitung. Die Palette der Anwendungen reicht vom Mikroschweißen über das Verschweißen von Blechen in verschiedenen Nahtkonfigurationen bis zu Anwendungen mit Wandstärken im cm-Bereich. Als Werkstoffe kommen neben einer großen Zahl von Metallen auch Kunststoffe zur Anwendung. Diese Diversifizierung begünstigt das Entstehen von Verfahrensvarianten. Als ein Beispiel sei die Zweistrahltechnik genannt, die sich beim Schweißen von Aluminiumlegierungen inzwischen zum Standard entwickelt hat. Ein zweites Beispiel stellt die Gruppe der Laser-Hybrid-Schweißtechniken dar, bei denen der Laserstrahl mit einem Lichtbogenschweißprozess kombiniert wird. Ein weiteres Kombinationsschweißverfahren, das in den letzten Jahren vor allem am IFSW untersucht wurde, soll hier im Weiteren vorgestellt und diskutiert werden: das magnetisch beeinflusste Laserstrahlschweißen.

Bei der im Folgenden beschriebenen magnetischen Beeinflussung des Schweißprozesses beruhen die beobachteten Auswirkungen auf Kräften im Schmelzbad des Schweißgutes. Eine nicht auszuschließende Beeinflussung der Plasma- oder Metalldampfwolke, die in der Wechselwirkungszone Laser/Werkstück entsteht, soll hier nicht diskutiert werden. Um also besagte Kräfte in der Schmelze erzeugen zu können, muss der Werkstoff bestimmte Eigenschaften aufweisen. Flüssigkeiten – auch metallische – sind generell nicht ferromagnetisch. Deshalb können nennenswerte magnetische Kräfte in der Schmelze nur durch die Wechselwirkung zwischen Stomflüssen (Stromdichte j) und Magnetfeldern (Magnetische Induktion B) erzeugt werden. Aus dem Kreuzprodukt $j \times B$ resultiert dann die wirkende Lorentzkraft F_L (Abb. 1). Damit Strom durch die Schmelze fließt, muss diese elektrisch leitfähig sein. Diese Bedingung erfüllen alle Metalle. Damit auch das Magnetfeld die Schmelze durchdringt, sollte der umgebende Festkörper nicht ferromagnetisch sein, da in letzterem Fall die magnetischen Feldlinien um die Schmelze herumgeführt werden, während die Schmelze nahezu feldfrei ist. Die folgenden Untersuchungen wurden daher an Aluminiumlegierungen und Edelstählen durchgeführt.

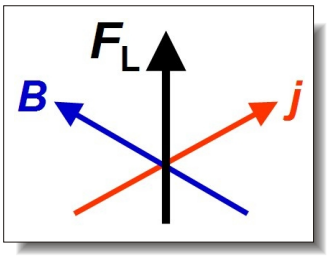

Abb. 1: Lorentzkraft F_L als Resultierende des Kreuzprodukts von Stromdichte j mit magnetischer Induktion B.

Bei hinreichend hoher Strömungsgeschwindigkeit v einer elektrisch leitfähigen Schmelze relativ zu einem Magnetfeld können die notwendigen Stromdichten $j = v \times B$ durch die prozessinhärente Schmelzbewegung erzeugt werden. In ersten Schweißversuchen mit Magnetfeldern sollten solchermaßen induzierte elektrische Ströme genutzt werden. Als Ergebnis wurden jedoch Veränderungen der Schweißnaht festgestellt, die auf das Fließen eines elektrischen Stroms im Schweißgut zurückgeführt werden können, der unabhängig von der Orientierung des Magnetfeldes und unabhängig von der Bewegung der Schmelze ist. Als Ursache für diesen Strom wurden thermoelektrische Effekte vermutet. Aus in jüngster Zeit durchgeführten Untersuchungen kann gefolgert werden, dass der beobachtete (intrinsische) Strom beim CO_2-Laserstrahlschweißen in direktem Zusammenhang mit der auftretenden Plasmawolke steht. Elektronen gelangen offensichtlich über die Plasmawolke auf die Werkstückoberfläche und fließen im Werkstück – auch innerhalb der Schmelze – in Richtung auf die Kapillare zu, wo sie durch thermische Emission ins Plasma zurückgelangen können. Auch dieser Strom kann beim CO_2-Laserstrahlschweißen zur Erzeugung von Lorentzkräften genutzt werden. Alternativ bietet sich die Möglichkeit, Strom über Klemmen oder Schleifkontakte, die mit einer Stromquelle verbunden sind, durch das Werkstück zu leiten. Schließlich existiert noch die Möglichkeit, kontaktfrei durch hochfrequente magnetische Wechselfelder Strom im Werkstück zu induzieren. Die unterschiedlichen Arten der Stromerzeugung, die eine große Auswirkung auf die räumliche Stromdichteverteilung und wegen $F_L = j \times B$ auf die Lorentzkraftverteilung haben, lassen bereits erahnen, dass das hier vorgestellte Kombinationsschweißverfahren eine große Zahl von Varianten zur der Beeinflussung des Schweißens durch Lorentzkräfte bietet. Diese Möglichkeiten werden noch durch die Orientierungsmöglichkeiten des Magnetfeldes gesteigert. Dieses kann durch Permanent- oder Elektromagnete erzeugt werden. Sind die Polschuhe und deren Polabstand groß genug, ergibt sich in der Schmelze ein weitgehend homogenes Magnetfeld. Bei einer Verfahrensvariante, bei der der Strom über Elektroden direkt in das Schmelzbad geleitet wird, wird aufgrund der hohen Stromdichten in der Elektrode ein ausreichend starkes Magnetfeld in der Schmelze induziert, so dass bei dieser Verfahrensvariante auf externe Magnetsysteme verzichtet werden kann.

Aus der Vielzahl der möglichen Kombinationen und Anordnungen sollen im Folgenden drei Varianten, die im Hinblick auf Erfordernisse der Praxis besonders lohnenswert erscheinen, näher vorgestellt werden. Je nach Zielstellung ist es sinnvoll, eine möglichst homogene oder aber eine inhomogene Kraftverteilung zu generieren. Will man die Durchmischung im Schmelzgut steigern, kann man durch eine inhomogene Kraftverteilung eine Rührbewegung in der Schmelze erzeugen. Dabei genügt es, Strom über eine Elektrode oder einen Zusatzdraht in die Schmelze einzuleiten. Der Strom erzeugt dann mit dem umgebenden, selbstinduzierten Magnetfeld Lorentzkräfte, die die Schmelze an der Oberfläche zum Draht hin und dann

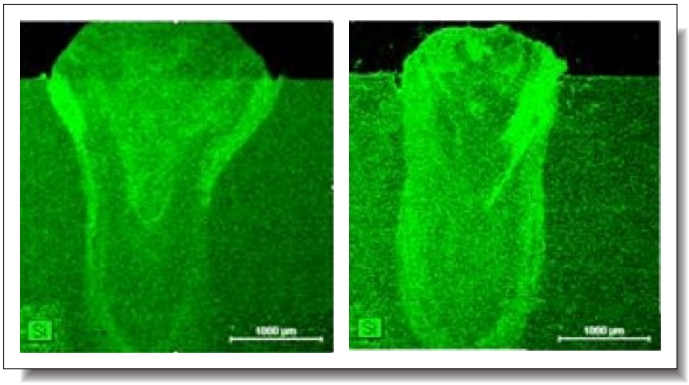

Abb. 2: Si-Verteilung ermittelt durch EDX-Analyse; Nd:YAG-Schweißung eines 4 mm starken Blechs aus AA6181A, P_L = 4 kW, v = 4,5 m/min, Zusatzdraht: AlSi12, Ø 1,2 mm, v_D = 3,6 m/min; links: ohne externen Strom; rechts: 260 A zugeführt über Zusatzdraht.

mit dem Drahtmaterial in die Tiefe der Schmelze hinein beschleunigen. Die Durchmischungswirkung ist in Abbildung 2 deutlich zu erkennen.
Aufgrund der beschriebenen Strömungsverhältnisse wird heiße Schmelze entlang der Kapillare zu deren Grund getrieben. Dies führt bei nicht zu hohen Schweißgeschwindigkeiten zu einer tieferen Aufschmelzung und zu einer größeren Nahtquerschnittsfläche, ohne dass mehr Energie eingesetzt werden muss (Abb. 3).

Will man die Naht stützen, um einen Nahtdurchhang zu vermeiden, ist eine möglichst homogene Kraftverteilung in der Schmelze zu erzeugen. Diese kann durch eine Stromführung mittels Klemmen oder mitgeführten Elektroden, die mit einer Gleichstromquelle verbunden sind, und einem externen Magnetfeld erzielt werden. Der Stromfluss erfolgte im Experiment, dessen Ergebnisse in Abbildung 4 gezeigt werden, parallel zur Schweißnaht und das Magnetfeld war quer dazu angeordnet.

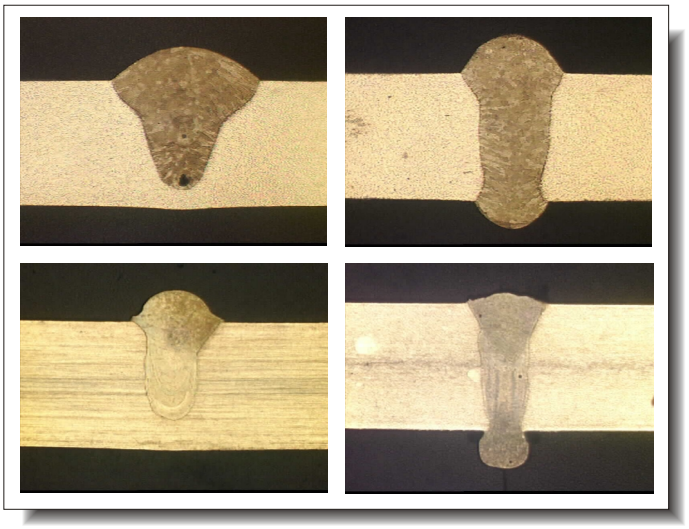

Abb. 3: oben: Nd:YAG-Schweißung eines 3 mm starken Blechs aus AA6009, P_L = 3 kW, v = 3 m/min, Zusatzdraht: AlSi12, Ø 1,2 mm, v_D = 5 m/min; links: ohne externen Strom; rechts: 200 A zugeführt über Zusatzdraht; unten: CO_2-Schweißung eines 3 mm starken Blechs aus AlMg3; P_L = 3 kW, v = 4 m/min, Zusatzdraht: AlSi12, Ø 1,2 mm, v_D = 4 m/min; links: ohne externen Strom; rechts: 100 A zugeführt über Zusatzdraht.

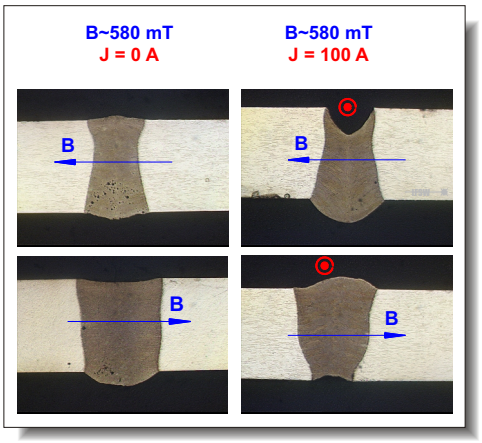

Abb. 4: Nahtquerschliffe (Blick in Schweißrichtung) von CO_2-Schweißungen in ein 3,2 mm starkes Blech aus AA6XXX; P_L = 3 kW, v = 4 m/min.

Wie Abbildung 4 zeigt, kann je nach Kombination der Richtungen von Strom und Magnetfeld die Naht angehoben oder abgesenkt werden. Bei Einschweißungen kann mit dieser Technik ein hoher Druck auf die Schmelze ausgeübt werden. Dies fördert die Entgasung in erheblichem Maße und sorgt nach erstem Anschein für eine Stabilisierung der Kapillare. Als Ergebnis erhält man eine weitgehend porenfreie Naht mit einer flachen Oberraupe, die so gut wie keine Nahtkerben aufweist (siehe Abb. 5).
Mit einem hochfrequent arbeitenden Experimentalmagneten konnte nachgewiesen werden, dass für beide beschriebenen Anwendungsfälle die gleiche Wirkung auch induktiv, d.h. ohne Kontaktstellen zum Werkstück, realisiert werden kann. Eine an die Problemstellung angepasste Magnettechnik soll in den nächsten zwei Jahren im Rahmen eines anlaufenden Projekts entwickelt werden.

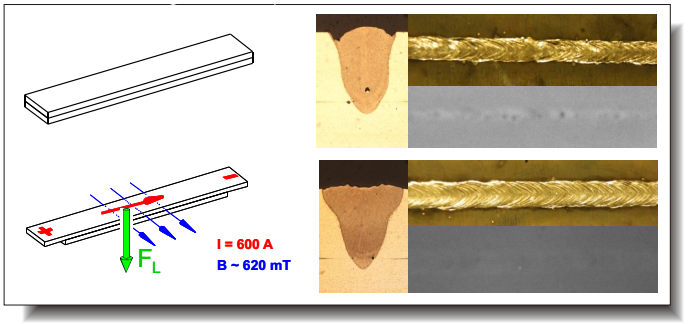

Abb. 5: Nahtquerschnitte, Oberraupen und Röntgenbilder zweier Überlappschweißungen, P_L = 3,7 kW, v = 3 m/min, AA6XXX, 2 x 3 mm; oben: Referenzschweißung, unten Schweißung mit Stromführung durch das Werkstück und externem Magnetfeld wie in der Skizze angegeben.

Institutsadresse:
Institut für Strahlwerkzeuge
Pfaffenwaldring 43
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 66840
Fax: +49 (0)711 685 66842
http://www.ifsw.uni-stuttgart.de

Autor:
Dipl.-Ing. Peter Berger
berger@ifsw.uni-stuttgart.de

Kontakt / Redaktion:
Dipl.-Ing. Friedemann Lichtner
FGSW - Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge mbH
Pfaffenwaldring 43
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 351 451-28
Fax: +49 (0)711 351 451-29
E-Mail:
friedemann.lichtner@fgsw.de
http://www.fgsw.de