

Schadungsarmes Laserstrahlschweißen mit Faserlasern und Scheibenlasern

Das Schweißen mit Laserstrahlen ist in feinwerktechnischen Anwendungen bereits weit verbreitet. Mit zunehmender Miniaturisierung und den damit verbundenen verschärften Anforderungen an die Fertigungsqualität stoßen jedoch die bisher eingesetzten Verfahren an ihre Grenzen. Gleichzeitig nimmt der Druck auf die Fertigungskosten und damit auf die Produktivität immer weiter zu. Neue diodengepumpte Faser- und Scheibenlaser erlauben aufgrund ihrer hohen Leistungen und kleinen Fokusbereiche von unter 100 µm neue Bearbeitungsstrategien. Es wurden Einschweißungen in Edelstahlproben mit brillanter Laserstrahlung ($M^2 \sim 1,2$) durchgeführt. Neben der Entwicklung eines geeigneten Spannmittels für dünne Schweißproben wurde ein grundlegendes Prozessverständnis erarbeitet, welches die Voraussetzung für einen reproduzierbaren und stabilen Schweißprozess mit sich bringt. Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N8988 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Das Schweißen mit einem Singlemodellaser ($P = 1 \text{ kW}$ @ $\lambda = 1070 \text{ nm}$) erlaubt sehr kleine Fokusbereiche bei hohen Ausgangsleistungen. Die gute Strahlqualität ermöglicht daher sehr große Aspektverhältnisse (Tiefe/Nahtbreite) also tiefe schlanke Nähte. Die kleinen Wechselwirkungszonen, aber auch die angestrebten hohen Schweißgeschwindigkeiten erfordern neue Konzepte in sämtlichen systemtechnischen Bereichen, vom Werkstückhandling über die Strahlführung bis zur Prozesskontrolle. Es wurde eine Linearachsanlage entwickelt und aufgebaut, welche eine kontrollierte Bearbeitungsgeschwindigkeit bis zu 100 m/min erlaubt. Die Anlage wurde so konzipiert, dass ausreichend Raum für das Anbringen verschiedener Diagnostikgeräte wie z.B. Hochge-

schwindigkeitskameras vorhanden ist (siehe Abbildung 1, links). Die kleinen Fokusbereiche von wenigen zehn Mikrometern ermöglichen ein effizientes Fügen von Bauteilen mit wenigen hundert Mikrometern Wandstärke. Um diese dünnwandigen Bauteile reproduzierbar fügen zu können, wurde ein niedrig aufbauendes und eng toleriertes Magnetspannmittel entwickelt (siehe Abbildung 1, rechts). Bei hohen Beschleunigungen und nicht oder schlecht magnetischen Proben drückt ein Oberblech die Probe nieder. Durch Austausch des Unter- bzw. Oberbleches kann die Probenauflagefläche und somit die Wärmeleitung beeinflusst werden. In SCHARP konnte eine Verzugsreduzierung mittels hochbrillanter Strahlquellen nachgewiesen werden. Für die

dazu durchgeführten Untersuchungen wurden verschiedene Laserstrahlquellen mit unterschiedlicher Strahlqualität verwendet und Einschweißungen durchgeführt. Für diese wurde mit Hilfe eines Topografiemesssystems der sich ergebende Querverzugswinkel ermittelt. Dabei stellt sich immer kurz vor Erreichen einer Durchschweißung der maximale Querverzugswinkel ein. Dieses Maximum wurde für die jeweiligen Parametersätze ermittelt. So konnte gezeigt werden, dass für Edelstahl der Querverzugswinkel verkleinert werden konnte durch:

- 1.) kleinere Fokusbereiche
- 2.) höhere Vorschubgeschwindigkeiten (bis zu 50 m/min)
- 3.) kleinere Divergenzwinkel.

Alle drei Möglichkeiten führen zu einer kleineren Nahtquerschnittsfläche und sind in Abbildung 2 exemplarisch dargestellt. Zu jedem Querschliff ist der Divergenzwinkel (Θ) des fokussierten Laserstrahls und der Fokusbereich (d_f) angegeben. Kleinere Fokusbereiche und ein kleinerer Divergenzwinkel sind bei gleichem Arbeitsabstand (Werkstück zu Fokussierlinse) nur mit einer besseren Fokussierbarkeit realisierbar, welchen die neuentwickelten Scheiben- und Faserlaser mit ihrer sehr guten Strahlqualität mit sich bringen.

Für ein grundlegendes Prozessverständnis und für die Bereitstellung von Experimentaldaten zur Prozessmodellierung wurden Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen im visuellen und infraroten Bereich durchgeführt. Daraus konnten vor allem Informationen über die Schmelzbadlänge, Schmelzbadbreite und die Kapillaröffnung bei sehr kleinen Fokusbereichen und hohen Schweißgeschwindigkeiten gewonnen werden. Querschliffe ergänzen diese Daten um Einschweißtiefe und Schweißnahtform. Eine Beobachtung mit Hochgeschwindigkeitskameras er-

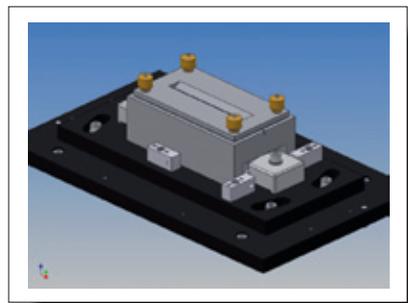
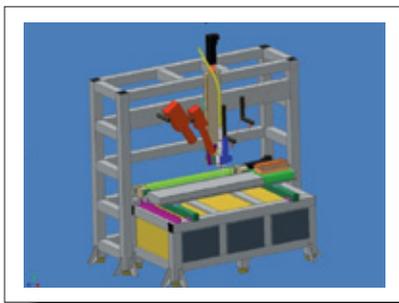


Abb. 1: links: schematischer Aufbau der Diagnostikanlage
rechts: Magnetspannmittel für Dünnblech-/Folienschweißversuche

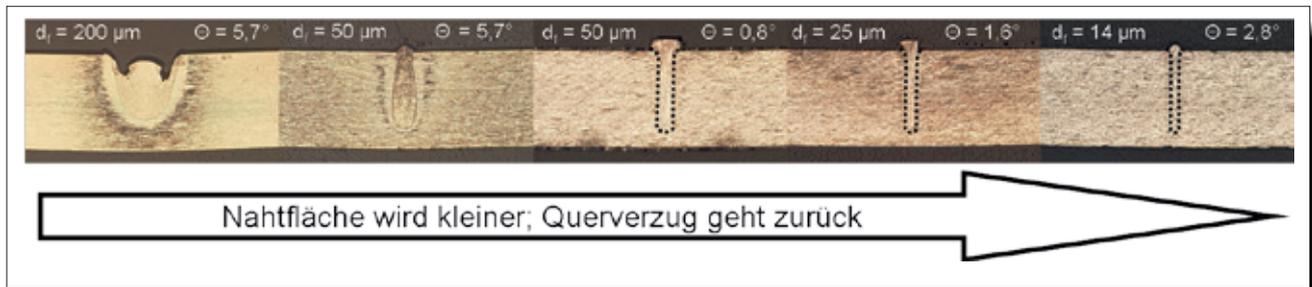


Abb. 2: Querschliffe in Edelstahl, kleinere Nahtquerschnittsflächen führen zu einem kleineren Querverzug der Schweißprobe

möglicht allerdings nur eine Betrachtung des oberflächennahen Schmelzbades. Abbildung 3 zeigt untereinander vier verschiedene Aufnahmen bei von oben

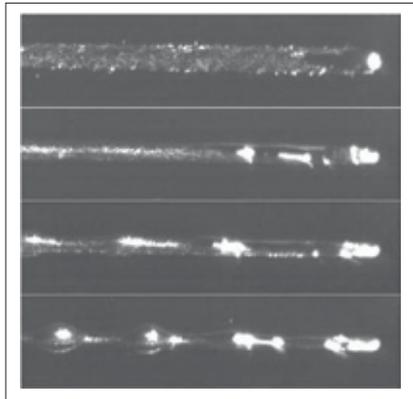


Abb. 3: Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen von Schmelzbadoberflächen ($v = 20/40/50/60 \text{ m/min}$)

nach unten zunehmender Verfahrensgeschwindigkeit. Die jeweils hellste Erscheinung rechts in den Bildern zeigt die Kapillaröffnung. Dahinter sind Erhöhungen in der Nahtberraupe zu erkennen, diese perlenschnurartigen Erhebungen sind auch als „Humping“ bekannt und

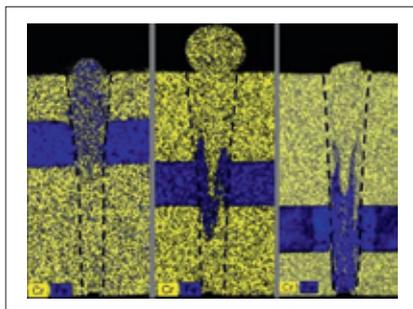


Abb. 4: EDX – Aufnahmen von Schweißnahtquerschliffen mit Indikatormaterial

sind abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit und der Laserleistung beziehungsweise dem sich daraus ergebenden Aspektverhältnis.

Die Betrachtung mit den Hochgeschwindigkeitskameras gibt allerdings keine Informationen über die Strömungen im Inneren des Schmelzbades. Aus diesem Grund wurde Indikatormaterial an verschiedenen Stellen in die Schweißprobe eingebracht. Nach erfolgreicher Schweißung wurde diese metallografisch in Quer-, Längs- und Flachschnitten ausgewertet und durch EDX-Aufnahmen (Abbildung 4) die Verteilung des Indikatormaterials nach der Erstarrung ausgewertet. Die dunklen Bereiche geben das Indikatormaterial wieder und die hellen Bereiche das Grundmaterial. Das Indikatormaterial wurde in verschiedene Tiefen des Grundmaterials eingebracht und so konnten innere Schmelzbadströmungen, die zum Transport des Indikatormaterials führten, analysiert werden.

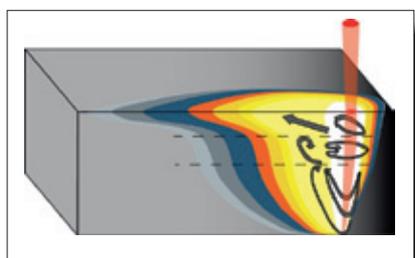


Abb. 5: sich ergebendes Schmelzbadynamikmodell beim Schweißen mit sehr kleinen Foki

In Abbildung 5 ist ein sich daraus ergebendes Modell für die Schmelzbadströmung bei hohen Schweißgeschwindigkeiten (40-60 m/min) dargestellt. Dabei

zeigt sich im unteren Bereich ein starker Antrieb der Schmelze nach unten. Durch den nach oben abströmenden Metaldampf wird ein Impuls auf die Schmelze übertragen, welcher diese nach unten „drückt“. Im mittleren Bereich strömt die Schmelze im Wesentlichen horizontal um die Kapillare, wohingegen im Bereich darüber die Strömung nach oben gerichtet ist. Ein Grund dafür könnte die Reibung des ausströmenden Metaldampfes sein, welcher im oberen Bereich die Schmelze mit nach oben „zieht“.

Die so sichtbar gemachten Strömungsverläufe wurden dazu verwendet, eine ebenfalls im Rahmen des Projektes entwickelte FEM-Simulation zu kalibrieren. Des Weiteren konnten Simulationen zeigen, dass die Schmelze im Nahtgrund und der Nahtmitte sehr schnell erstarrt, während sie oberflächennah relativ lange erhalten bleibt.

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. Axel Heß
axel.hess@ifsw.uni-stuttgart.de

Kontakt / Redaktion:

Dipl.-Bw. (FH) Susanne Kern
IFSW -Institut für
Strahlwerkzeuge mbH
Pfaffenwaldring 43
70569 Stuttgart

Tel.: +49 (0)711 685 66861
Fax: +49 (0)711 685 56861
E-Mail: susanne.kern@ifsw.uni-stuttgart.de