

Laserstrahl-tiefschweißen von Kupferwerkstoffen im Dauerstrichbetrieb

Mit der Weiterentwicklung von Scheiben- und Faserlasern werden bestmögliche Strahlqualitäten realisiert, die sehr kleine Fokussdurchmesser von wenigen Mikrometern ermöglichen. Die daraus resultierenden hohen Leistungsdichten erlauben ein Tiefschweißen in Materialien, wie beispielsweise Kupfer, was bisher so nicht möglich war. Ein Tiefschweißeffekt kann außerdem durch eine Anpassung der Wellenlänge der Laserstrahlquelle auch bei kleineren Leistungen erreicht werden. Bisher wurden solche Materialien fast ausschließlich mit gepulsten Lasersystemen im Wärmeleitungsschweißen also mit einem sehr kleinen Aspektverhältnis (Tiefe/Breite) der entstehenden Schweißnaht gefügt. Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Laserstrahlquellen vorgestellt, die das Tiefschweißen von Kupferwerkstoffen im Dauerstrichbetrieb (cw) ermöglichen.

Nach Stahl und Aluminium nimmt Kupfer den dritten Platz beim jährlichen Werkstoffverbrauch ein. Eingesetzt wird Kupfer in Bereichen wie z. B. dem Automobilbau, in der Elektrotechnik, im Bauwesen und immer häufiger in den Komponenten zur Nutzung von erneuerbaren Energien (z. B. Solarkollektoren). Das große Einsatzgebiet von Kupfer erfordert ein sicheres Fügeverfahren. Das Laserstrahl-schweißen spielt dabei eine immer wichtigere Rolle, die durch das Verbot bleihaltiger Lote und durch erhöhte thermodynamische Anforderungen noch verstärkt wird. Das Tiefschweißen zeichnet sich durch ein hohes Aspektverhältnis aus, so können bei kleinsten Nahtbreiten sehr große Einschweiß-tiefen (vgl. Abb. 1) erzeugt werden. Beim Auftreffen des Laserstrahls auf das Kupfer wird ein Teil reflektiert und ein anderer Teil vom Werkstück absorbiert. Der absorbierte Leistungsanteil erwärmt das Material solange, bis ein Schmelzbad entsteht. Bei weiterer Erwärmung bildet sich eine

Dampfkapillare aus, die die Voraussetzung für den gewünschten Tiefschweißeffekt erfüllt. Mit dem Ausbilden der Kapillare nimmt der Anteil der absorbierten Leistung weiter zu, da der Laserstrahl in der Kapillare mehrfach hin und her reflektiert wird. Bei jedem Auftreffen auf der Kapillarwand wird dabei ein Teil der Laserenergie vom Kupfer absorbiert. Die Schwierigkeit für das Fügen von Kupfer mit dem Laser liegt in der im Vergleich zu Stahl sehr viel höheren Wärmeleitfähigkeit, der größeren Wärmeausdehnung und der geringeren Absorption der Laserleistung. Es gibt zwei Möglichkeiten, wie ein sicherer Tiefschweißprozess in Kupfer mit dem Laser realisiert werden kann. Die erste Möglichkeit erfordert eine hohe Leistungsdichte, die mit neuentwickelten Laserstrahlquellen bereitgestellt werden kann. Als Strahlquelle wurde ein Faserlaser der Firma IPG (YLR-1000-SM) verwendet. Dieser emittiert Laserstrahlung bei einer Wellenlänge von 1070 nm. Mit diesem System kann bei einem

theoretischen Fokussdurchmesser von 14 μm , einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 m/min und einer Leistung von 860 W eine Einschweiß-tiefe von annähernd 1 mm realisiert werden (vgl. Abb. 1). Aufgrund der geringen Absorption der Laserleistung von Kupfer bei der verwendeten Wellenlänge von 1070 nm wird die Laserleistung zu einem großen Anteil von der Kupferoberfläche zurückreflektiert. Diese Rückreflexe können dazu führen, dass die Laserstrahlquelle bzw. das Faserende beschädigt wird. Ein kleiner Anstellwinkel zwischen Laserstrahlung und Werkstück kann dabei helfen, dass nur ein Bruchteil zurück in den Strahlengang gelangt. Sobald das Kupfer aufge-

schmolzen ist, nimmt die Absorption der Laserstrahlung schlagartig zu, was zu weniger Rückreflexen führt. Diese gehen mit der beschriebenen Ausbildung der Dampfkapillaren noch weiter zurück. Derzeitige Schwierigkeiten im Umgang mit hochbrillanter Strahlung sind Leistungsschwankungen oder thermisch induzierte Änderungen des Fokussdurchmessers auf der Werkstückoberfläche. Diese können zu einem Einbrechen der Leistungs-dichte bis auf ein Zehntel des erwarteten Wertes führen. Dies zeigt sich in einem instabilen Schweißprozess. In Abb.1 ist dieser Sachverhalt wiedergegeben und eine Schweißnaht-oberraupe in Kupfer dargestellt, bei der mit fortschreiten-

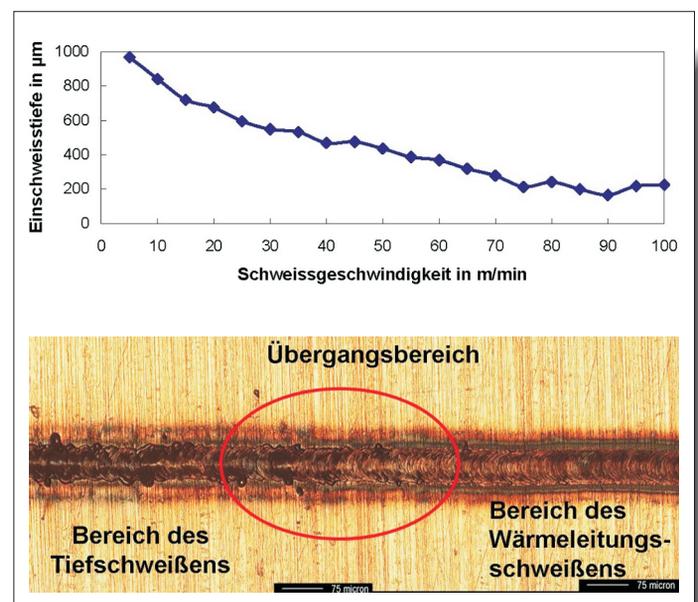


Abb. 1: oben: Einschweißtiefe in reines Kupfer über Vorschubgeschwindigkeit mit einem Singlemode-Faserlaser bei einem Fokussdurchmesser von 14 μm und einer Laserleistung von 860 W. unten: Übergang vom Tief- zum Wärmeleitungsschweißen einer Schweißnaht in Kupfer.

der Schweißnahtlänge der Übergang vom Tiefschweißen in das Wärmeleitungsschweißen deutlich wird. Dabei ist der Bereich des Tiefschweißens durch eine ungleichmäßigere Oberraupe und kleine erstarrte Spritzer gekennzeichnet. Das Wärmeleitungsschweißen weist hingegen eine sehr gleichmäßige, glatte Oberraupe ohne Spritzer auf. Die Einschweißtiefe kann dabei auf einen Bruchteil der im Tiefschweißen erzielten Einschweißtiefe zurückgehen. Für die zweite Möglichkeit, einen stabilen Tiefschweißprozess in Kupfer umzusetzen, kommt eine Laserstrahlquelle zum Einsatz, die Laserlicht bei einer kleineren Wellenlänge emittiert. Durch die Verringerung der Wellenlänge von $1\mu\text{m}$ auf $0,5\mu\text{m}$ kann die Absorption für das Kupferschweißen um den Faktor zehn erhöht werden. Im Rahmen des SCHARP-Projektes wurde von der Firma TRUMPF ein Prototyp eines frequenzverdoppelten Scheibenlasers aufgebaut und zur Verfügung gestellt. Das System hat eine Ausgangsleistung von 100 W. In Abb. 2 links sind die Laserstrahlquelle und die Freistrahlführung für den kollimierten „grünen“ Laser-

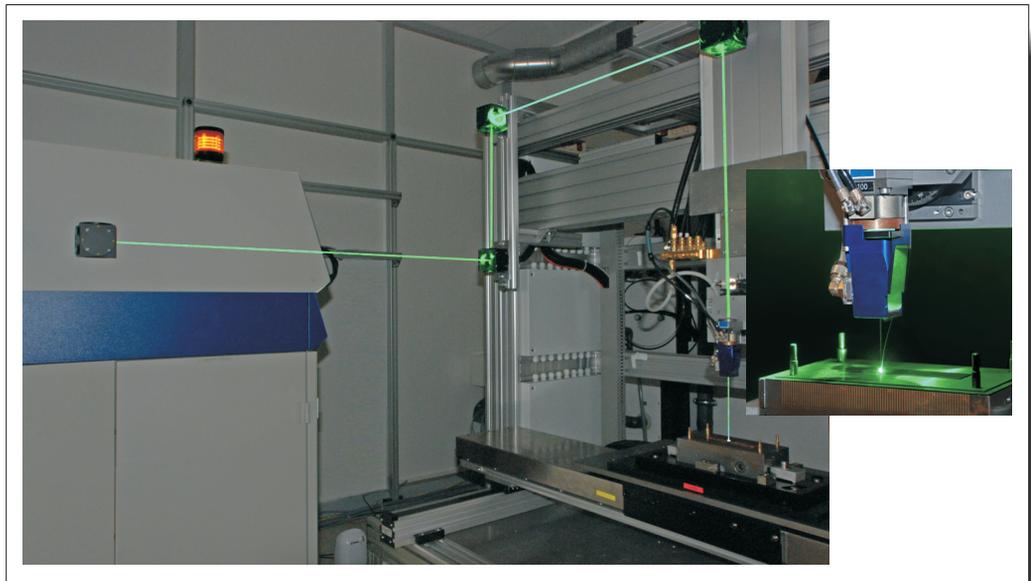


Abb. 2: Freistrahlführung des „grünen“ Scheibenlasers (links). Fokussiereinheit für das Laserstrahlschweißen von Kupferwerkstoffen bei einer Laserleistung von $P = 100\text{ W}$ und einem Fokusbereich von $df = 15\mu\text{m}$ (rechts).

strahl bis zum Werkstück abgebildet. Auf der rechten Seite ist die Fokussiereinheit mit Querjet und das Auftreffen des Laserstrahls auf den Kupferwerkstoff zu sehen. Erste Schweißversuche mit dem System sind vielversprechend. So lassen sich zum Beispiel dünne Kupferfolien im cw-Betrieb verschweißen (Abb. 3 links) und das bei einem Aspektverhältnis, das bei

einem Wert von größer vier liegt. Zusätzlich zur besseren Absorption ist bei grüner Laserstrahlung der Fokusbereich bei gleicher Brennweite aufgrund der kleineren Wellenlänge nur noch halb so groß, was einer Vervielfachung der Leistungsdichte gleichkommt. Ein weiterer Vorteil der kleineren Wellenlänge ist, dass das Auftreten eines Plasmas über der Wechselwirkungszone mit kleinerer Wellenlänge unkritischer wird. Die untere Darstellung in Abb. 3 soll exemplarisch die winzigen Dimensionen zeigen, in denen ein Schweißprozess durchgeführt werden kann. Dabei wurde der $15\mu\text{m}$ kleine Fokusbereich in einer Kreisbahn auf dem „Einser-Steg“ eines 1-Cent-Stückes bewegt. Mit den Geräten des Diagnostikzentrums der FGSW wird die Optimierung des Schweißprozesses weiter vorangetrieben. Dazu gehören umfangreiche Messreihen zu den optischen Elementen und deren Beschichtungen, die mit hohen Intensitäten und „grüner“ Laserstrahlung beaufschlagt werden. Weiterhin sollen Hochge-

schwindigkeitsaufnahmen im infraroten sowie visuellen Spektrum Aufschluss über die Wärmeverteilung im Kupfer sowie die Bewegungen der Schmelze liefern. Die hier dargestellten Ergebnisse sind ein Auszug aus dem vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) geförderten SCHARP-Projekt (schadungsarmes und produktives Mikroschweißen mit brillanten Strahlquellen).

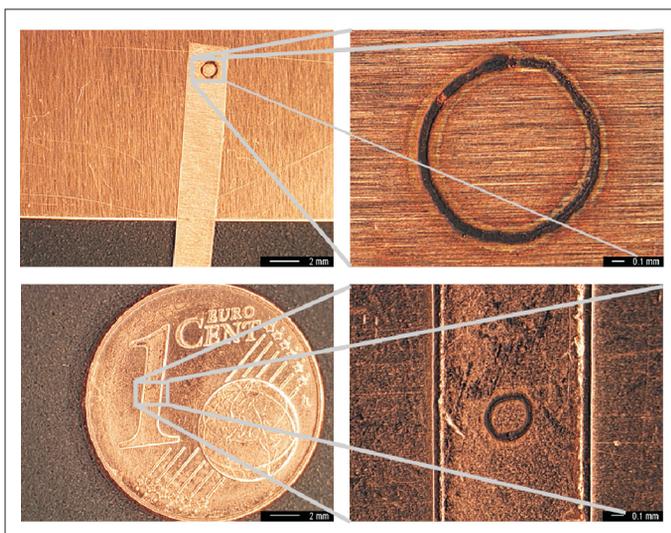


Abb. 3: oben: $50\mu\text{m}$ dicke Kupferfolie auf Grundkörper geschweißt. unten: Einschweißung auf einem 1-Cent-Stück zum Größenvergleich.

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>

Autoren:
 Dipl.-Ing. Axel Heß
axel.hess@fgsw.de
<http://www.fgsw.de>

Dipl.-Ing. Felix Abt
felix.abt@fgsw.de
<http://www.fgsw.de>

Kontakt / Redaktion:
 Dipl.-Phys. Thomas Liebig
 IFSW
 Tel.: +49 (0)711 685 67882
 Fax: +49 (0)711 685 66842
 E-Mail: thomas.liebig@ifsw.uni-stuttgart.de