

Prozesssicherheit beim Kupferschweißen mit Laserstrahlung durch niederenergetisches Vorpulsen

Moalem, A.; Kling, R.; Overmeyer, L. (1)

Kupfer, insbesondere im unlegierten Zustand, weist im Unterschied zu anderen Metallen besondere Eigenschaften auf, die beim Schweißen mittels infraroter (IR) Laserstrahlung zu einer reduzierten Prozesssicherheit und Qualität führen: Der Absorptionsgrad für IR-Laserstrahlung ist klein (2 %), variiert stark aufgrund unterschiedlicher Oxidschichtdicken an der Materialoberfläche und ändert sich signifikant mit der Temperatur des Werkstoffs. Dies hat beim Kupferschweißen zur Folge, dass mit konstanten Schweißparametern die Energieeinkopplung stark variiert und neben Gutschweißungen auch Schmelzauswürfe und fehlende Anbindungsquerschnitte resultieren.

Um die Vorteile des Laserschweißens auch für das Fügen von Kupferwerkstoffen nutzen zu können, müssen für eine hinreichende Prozesssicherheit verfahrenstechnische Maßnahmen ergriffen werden. Ansätze, die bisher verfolgt wurden umfassen:

- Echtzeit-Prozessdatenerfassung und Leistungsregelung der Laserstrahlung: Bisher geometrie-, werkstoff- und oberflächenabhängig,
- Pulsformung: Moderate Qualitätsverbesserung,
- Absorber/Schwärzen (Edding): Moderate Qualitätsverbesserung,
- Lösungskonzepte mit frequenzverdoppelter („grüner“) Laserstrahlung.

Lösungskonzepte mit frequenzverdoppelter Laserstrahlung

Mit dem Ziel, die Prozesssicherheit beim Kupferschweißen mit Laserstrahlung zu verbessern, wurden in den vergangenen Jahren unterschiedliche Konzepte mit frequenzverdoppelter Laserstrahlung untersucht.

Moon et. al. ergänzten das IR-Laserschweißen durch eine überlagerte, frequenzverdoppelte Strahlung, die zwar kurzgepulst, aber mit einer Pulsfrequenz von 10 kHz auf das Werkstück gebracht wurde und so für die Zeitregime beim Laserschweißen nahezu als kontinuierlich angesehen wer-

den kann. Die mittlere Leistung der frequenzverdoppelten Strahlung betrug 40W und führte auch ohne Kombination mit IR-Strahlung bereits zu Einschweißungen. In Kombination mit der IR-Strahlquelle wurden Wechselwirkungen beobachtet [1]. Im Projekt Joitec wurde nachgewiesen, dass der Einsatz frequenzverdoppelter Laserstrahlung gegenüber traditioneller IR-Laserstrahlung zu einer deutlich verbesserten Prozessstabilität führt [2]. Allerdings sind finanziell attraktive, blitzlampengepumpte grüne Schweißlaserquellen aufgrund des Risikos thermischer Effekte in den laseroptischen Komponenten noch heute auf mittlere Ausgangsleistungen im Bereich von 5 W beschränkt. Durch Faser- und Scheibenlaserkonzepte werden Thermalmanagement und Konversions-effizienz inzwischen besser beherrscht, mit dem Nachteil, dass Blitzlampen durch Pump-Laserdioden ersetzt werden müssen

und die Kosten der Strahlquellen dadurch steigen.

Für große Schweißquerschnitte wird das Scheibenlaserkonzept im Projekt CuBriLas weiterentwickelt. Hier wird eine kontinuierliche IR-Strahlquelle mit einer kontinuierlichen frequenzverdoppelten Strahlquelle kombiniert und das (CW-) Nahtschweißen von Kupfer untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die frequenzverdoppelte Strahlquelle insbesondere in der Heizphase und im Regime des Wärmeleitungs-schweißens Vorteile bringt. Beim Übergang zum Tiefschweißen nimmt der Einfluss der frequenzverdoppelten Strahlquelle hingegen ab [3].

Viele für die Mikro- und Feinwerktechnik relevante Materialien lassen sich durchaus mit IR-Laserstrahlung prozesssicher schweißen. Hier haben sich die traditionellen blitzlampengepumpte, gepulsten Systeme etabliert. Solche Systeme sind von unterschiedlichen Laserherstellern in unterschiedlichen Leistungsklassen, z.B. bis 500 W mittlerer Leistung verfügbar. Um mit diesen Strahlquellen Kupfer prozesssicher zu schweißen, werden zwei weitere Konzepte verfolgt:

Die Lasag AG hat 2011 ein lampengepumptes System vorgestellt, bei dem die IR-Strahlung teilweise frequenzverdoppelt wird und sowohl der nichtverdoppelte Anteil IR-Strahlung als auch die frequenzverdoppelte Strahlung über die gleiche Lichtleitfaser zum Schweißprozess geführt und genutzt wird. Die frequenzverdoppelte Strahlung reicht aus, um das Kupfer zuverlässig aufzuwärmen und anzuschmelzen. Dabei steigt mit der Temperatur auch der Absorptionsgrad für die energiereiche IR-Strahlung um ein Vielfaches und die IR-Strahlung kann dann das erforderliche Schmelzvolumen erzeugen [4].

Ein systemtechnisch flexiblerer und in weiten Bereichen skalierbarer Ansatz für das Schweißen von Kupfer mit Laserstrahlung basiert auf niederenergetischen Vorpulsen

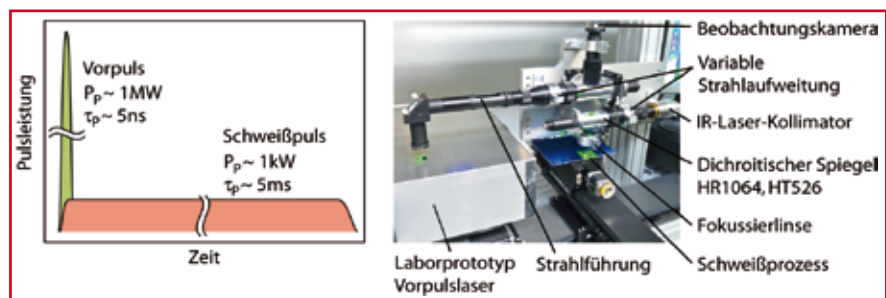


Bild 1: Schema des Leistungsverlaufs beim Vorpulsschweißen und experimenteller Versuchsaufbau zur Manipulation der Strahleigenschaften



Bild 2: OEM-Prototyp des Vorpulslasers der Firma neoLASE

mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich und soll nachfolgend ausführlich dargestellt werden.

Konzept des niederenergetischen Vorpulsens und Versuchstechnik

Am Laser Zentrum Hannover e.V. wurde das Konzept des niederenergetischen Vorpulsens entwickelt [5]. Hier wird zu Prozessbeginn ein Laserpuls hoher Leistung (~1MW) aber mit einer sehr kurzen Pulsdauer im Nanosekundenbereich auf das Werkstück gebracht (Bild 1). Dadurch wird lediglich die Materialoberfläche derart vorbereitet, dass der nachfolgende IR-Laserschweißpuls einen gleichmäßigeren und erhöhten Absorptionsgrad erfährt. Um den Einfluss einer zeitlichen Verzögerung zwischen Vorpuls und Schweißpuls zu untersuchen, werden die Laserpulse der beiden Strahlquellen durch eine gemeinsame Steuerung angefordert. In einem Versuchsaufbau wird die Strahlung der beiden Laserquellen mittels optischer Komponenten geformt und auf eine gemeinsame Strahlachse gebracht (Bild 1). Das offene Design und die für die experimentelle Prozessentwicklung erforderlichen Einstellmöglichkeiten sind in einem industriellen Einsatz nicht erforderlich, daher ist eine Integration auch wesentlich kompakter möglich. Für die Energiebilanz ist der Vorpuls praktisch vernachlässigbar: Die Energie des Vorpulses beträgt bei allen Untersu-

chungen 0,6 Millijoule und ist um drei Größenordnungen kleiner als die Energie des Schweißpulses, die im einstelligen Joule-Bereich variiert wird. Als Schweißlaser wird ein Lasag SLS200 CL16 ver-

Ergebnisse der Prozessentwicklung

Um einen visuellen Eindruck vom Einfluss des niederenergetischen Vorpulsens zu vermitteln, ist in Bild 3 das Ergebnis einer Versuchsreihe mit Blindschweißungen gezeigt. Dabei wurden die Parameter des Schweißlasers nicht variiert. Ohne Vorpuls sind die Schweißpunkte unterschiedlich groß und teilweise erfolgt keine Anschmelzung. Mit Vorpuls sind dagegen die Schweißpunkte nahezu identisch groß und alle vorhanden (Schweißwahrscheinlichkeit 100 % bei 200 Wiederholungen). Anhand der Durchmesser von Punktschweißungen wurde umfangreich nachgewiesen, dass die Durchmessererva-

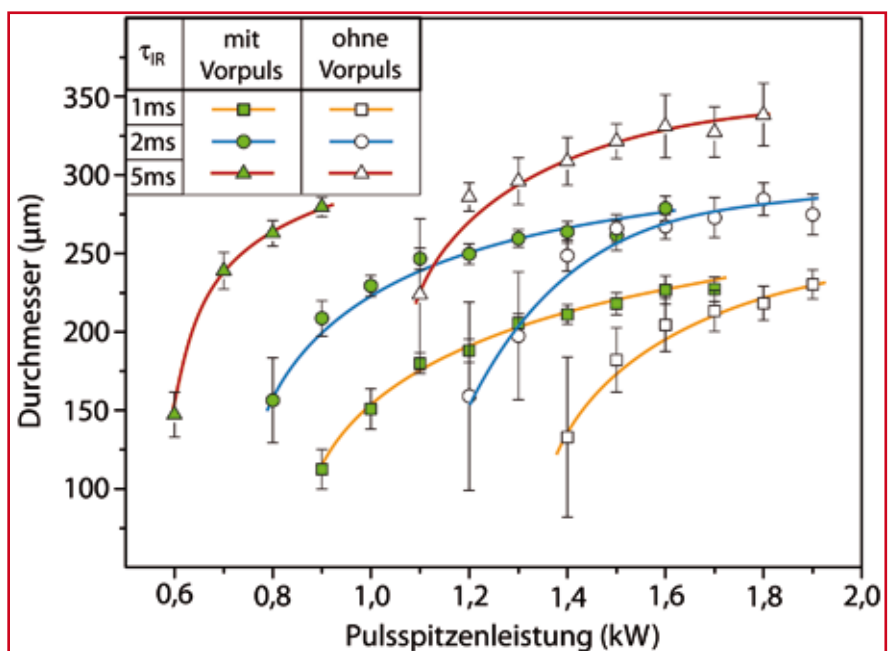


Bild 4: Mittlerer Schweißpunktdurchmesser und Standardabweichung über Pulsspitzenleistung und für unterschiedliche Pulsdauern τ_{IR}

wendet, während der Vorpulslaser von der Firma neoLASE bereitgestellt wird. Dieser ist inzwischen als OEM-Prototyp mit großen Leistungsreserven verfügbar (Bild 2).

riation bei erfolgten Schweißungen über die gesamten Prozessfenster deutlich reduziert wird. In Bild 4 sind die mittleren Schweißpunktdurchmesser für unterschiedliche Prozessparameter dargestellt. Die Fehlerbalken kennzeichnen dabei die Standardabweichung.

Der Variationskoeffizient ist definiert als die Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert. Der kleinste ermittelte Variationskoeffizient beträgt für das neue Verfahren lediglich 2 %. Ein weiteres Merkmal des neuen Verfahrens ist das erhebliche Potential für die Energieeinsparung: Um vergleichbare Schweißpunktdurchmesser zu erreichen, kann mit dem neuen Verfahren die Leistung

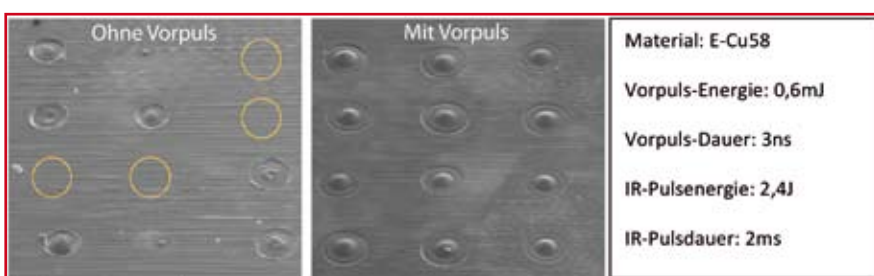


Bild 3: Blindschweißungen ohne Vorpuls und mit Vorpuls bei ansonsten gleichbleibenden Versuchsparametern

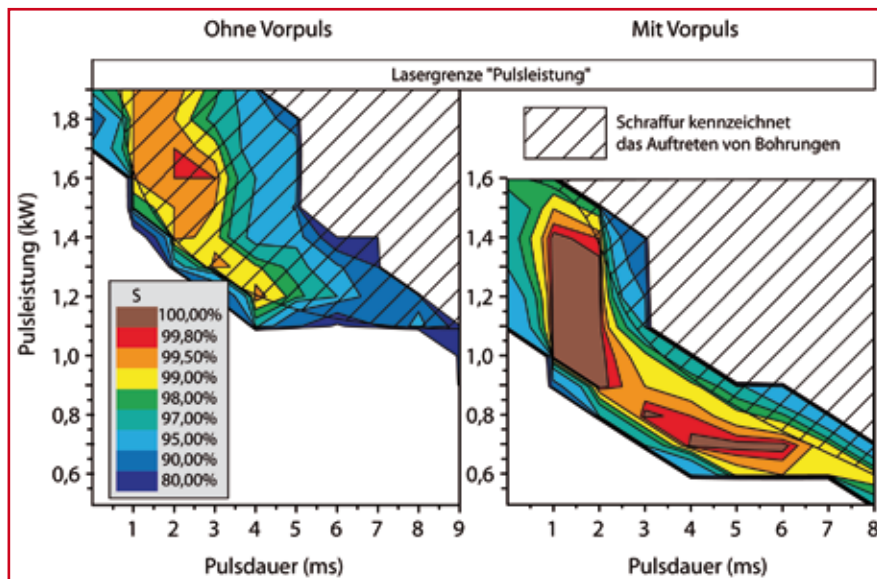


Bild 5: Schweißwahrscheinlichkeit S für unterschiedliche Kombinationen aus Pulsleistung und Pulsdauer

des Schweißlasers um mehr als 30 % reduziert werden [5].

Beim Laser-Punktschweißen kann der Erfolg in der Regel maßgeblich über eine geeignete Wahl der Pulsleistung und Pulsdauer eingestellt werden. Daher wurde die Schweißwahrscheinlichkeit über diese beiden Versuchsparameter ermittelt (Bild 5). Diese wird definiert als die Anzahl erfolgter Anschmelzungen bezogen auf die Anzahl der Versuche.

Während beim traditionellen Verfahren Schweißwahrscheinlichkeiten von 80 % - 99,8 % erreicht werden und spontan Schmelzauswürfe auftreten, führt der zusätzliche Vorpuls in einem großen Prozessfenster zu einer 100%-igen Schweißwahrscheinlichkeit (basierend auf 200 Wiederholungen). Dabei ist die eingebrachte Energie so gut dosierbar, dass kein Schmelzauswurf oder Bohrcharakter beobachtet wird.

Eine zeitliche Verzögerung des Schweißpulses gegenüber dem Vorpuls zeigt keinen Einfluss. Die Verzögerung betrug bis zu einem Tag zwischen Vorpuls und Schweißpuls, bei jeweils 60 Wiederholungen.

Applikationen

Die Ergebnisse aus der Prozessentwicklung wurden an unterschiedlichen Applikationen getestet:

Für die Herstellung von Gassensoren müssen Drähte auf eine Leiterplattenmetallisierung geschweißt werden. Während beim Ultraschallschweißen durch die Materialverdrängung auch in axialer Richtung

Kräfte auf den Draht wirken und diesen verformen, bietet das Laserschweißen mit

niederenergetischem Vorpuls eine praktisch kraftfreie Fügetechnik und der Draht behält zwischen den beiden Landeflächen seine Form bei (Bild 6).

In der Leiterplattenbestückung bietet das Laserstrahlschweißen potentiell den Vorteil, dass die Verbindungen im Vergleich zum Löten höher temperaturbeständig sind. Die darüber hinaus bessere elektrische und Wärmeleitfähigkeit bietet gute Voraussetzungen für Hochstrombaugruppen und hohe Packungsdichten. In Bild 7 ist ein IC dargestellt, dessen Leads mit dem Verfahren des niederenergetischen Vorpulsens auf die Pads einer Leiterplatte geschweißt wurden.

Ein weiterer Ergebnistransfer findet in Zusammenarbeit mit der Firma Nexans Deutschland GmbH statt. Hier wird unter anderem Kupfer-Bandmaterial zur Herstellung von Spezialkabeln und -rohren verschweißt. Da zurzeit noch bei vielen Anwendern die Kupferoberfläche behelfsmäßig geschwärzt wird, um mit Laserstrah-

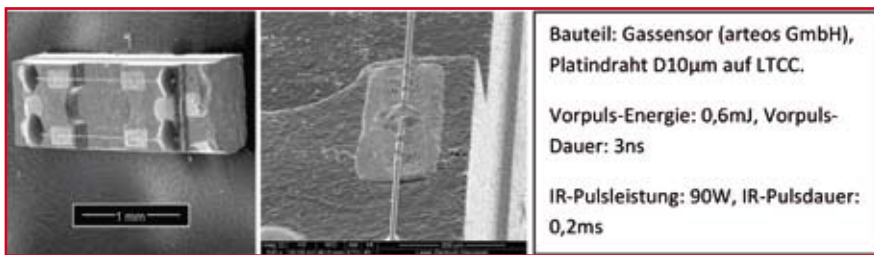


Bild 6: Mit Vorpuls lasergeschweißter Platindraht, Durchmesser 10 µm auf LTCC (arteos GmbH)

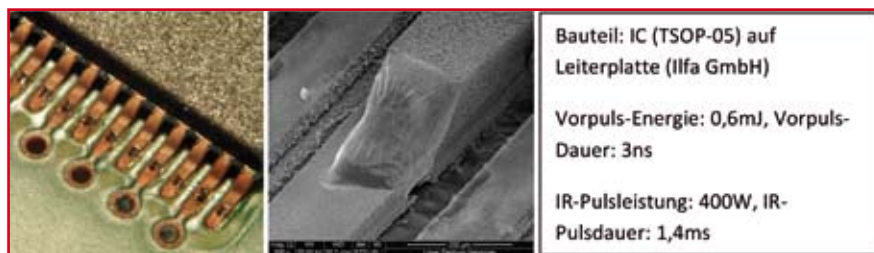


Bild 7: Mit Vorpuls lasergeschweißtes IC (TSOP-05) auf Leiterplatte (Ilfa GmbH)

lung besser schweißen zu können, wurden hier unter anderem geschwärzte Kupferbleche ohne Vorpuls und ungeschwärzte Kupferbleche mit Vorpuls geschweißt und die Ergebnisse verglichen (Bild 8).

Hier ist deutlich zu erkennen, dass das Laserschweißen mit niederenergetischen Vorpulsen auch beim Nahtschweißen deutliche Vorteile aufweist und erstmals die Prozesssicherheit bietet, die beim Laserschweißen anderer Metalle bereits lange geschätzt wird.

Zusammenfassung

Die Prozesssicherheit beim Kupferschweißen mit Laserstrahlung wird signifikant verbessert, indem die Werkstückoberfläche mit einem intensiven Laser-Vorpuls kleiner Energie vorbereitet wird. Anschließend wird mit IR-Laserstrahlung geschweißt. Die für die Qualitätssteigerung verantwortlichen physikalischen Effekte durch die Vorpulsbearbeitung werden zurzeit untersucht. Von besonderem Interesse ist, dass für den Anwender weiterhin eine große Auswahl an etablierten IR-Laserstrahl-

quellen für die unterschiedlichen Schweißapplikationen zur Verfügung steht. So sind gepulste und kontinuierliche Strahlquellen mit einem großen Bereich an unterschiedlichen mittleren Ausgangsleistungen am Markt verfügbar. Der zusätzlich erforderliche Vorpuls laser stellt lediglich eine geringe Zusatzinvestition dar.

Danksagung

Ein wesentlicher Anteil der dargestellten Ergebnisse ist im Rahmen des Projekts

SUPREME entstanden. Wir danken dem BMBF für die finanzielle Förderung und dem Projektträger Karlsruhe (PTKA) für die Betreuung (Fkz.: 02PK2034 – 02PK2038). Weiterhin danken wir unseren Projektpartnern Ilfa GmbH, arteos GmbH, Sill Optics GmbH&Co. KG und neOLASE GmbH für die gute Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] Moon, J. H., Mizutani, M., Katayama, S. & Matsunawa A. (2003) Melting characteristics of metals by combined laser beams with different wavelengths, J. Laser Appl. 15, 37-42.
- [2] Otte, F., Pamin, S., Hermsdorf, J., Kracht, D. & Kling, R. (2009) Enhancement of Process stability for Laser Spot Micro Welding by using 532 nm Radiation, in Proceedings of LAMP2009 - the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, Kobe, Japan.
- [3] Engler, S.; Ramsayer, R. & Poprawe, R. Process Studies on Laser Welding of Copper with Brilliant Green and Infrared Lasers, Physics Procedia, Elsevier, 2011, 12, 342-349
- [4] Rüttimann, C., Dürr, U., Moalem, A., Priehs, M.: Reliable Laser Micro-Welding of Copper, in proceedings of SPIE Photonics West 2011, DOI: 10.1117/12.875033, San Francisco, USA.
- [5] Moalem, A., von Witzendorff, P., Frede, M., Kling, R.: Enhancing Process Stability in Infrared Laser Micro Welding of Copper using Frequency Converted Short Prepulses, in proceedings of ICALEO 2010, Anaheim, USA

(1) *Anas Moalem, Rainer Kling, Ludger Overmeyer, Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, 30419 Hannover*



Bild 8: Nexans UniCross Quernahtschweißanlage für die Herstellung von Rohren und Kabeln; mit Nexans UniCross erzeugte Quernahte auf Kupfer (Wieland K12), Dicke 0,2 mm