

Projektskizze

zur Vorlage bei der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des
DVS, Sitzung des FA 6 "Strahlverfahren" am 06.03.2013

1. Thema

Oberflächenkonditionierung von Kupferwerkstoffen zur Stabilisierung des Lasermikroschweißens

2. Wissenschaftlich / technische Problemstellung und wirtschaftliche Motivation

Damit die Vorteile des Laser-Mikroschweißens auch bei Kupferwerkstoffen Anwendung finden, müssen insbesondere im Hinblick auf kmU, kosteneffiziente Lösungen gefunden werden. Ein wichtiges Problem beim Schweißen von Kupferwerkstoffen mit IR-Laserstrahlung ist der kleine Absorptionsgrad [1]. Definierte Prozessgrenzen lassen sich schwer ermitteln, vielmehr sind z.B. die Unregelmäßigkeiten beim gepulsten Schweißen so groß, dass über das Parameterfeld Fehlschweißungen in Form von zu kleiner oder zu großer Energieeinkopplung bei konstanten Systemparametern auftreten. Bisher untersuchte Methoden, die zur Verbesserung der Prozesssicherheit beitragen können, sind nachfolgend dargestellt und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile charakterisiert:

- *Schweißen mit frequenzkonvertierten Lasern [2]:* In den Konversionskristallen sind große Spitzenintensitäten erforderlich. Bei Laserparametern, die typisch für das Schweißen sind (Millisekundenbereich bis kontinuierlich), können aufgrund thermischer Grenzen nur moderate Laserleistungen realisiert werden. Gepulste Schweißsysteme sind heute bis lediglich ca. 5 W verfügbar (Miyachi), technisch anspruchsvoll und verursachen hohe Investitionskosten. Ähnlich verhält es sich mit kontinuierlichen frequenzkonvertierten Lasersystemen die z.Zt. als Labormuster im Leistungsbereich um 325 W [3] realisiert sind.
- *Schweißen mit frequenzkonvertierten kurzgepulsten Lasern hoher Repetitionsrate und gepulster IR-Strahlung [4]:* Kombination zweier Strahlquellen mit hohen Investitionskosten.
- *Schweißen mit zwei kontinuierlichen Quellen Grün + IR [3,5]:* Kombination zweier hochpreisiger Strahlquellen in einem Hybridprozess. Der Qualitätsvorteil gegenüber Schweißen mit IR-Quelle ist nur bei Prozessstart gegeben. Beim Übergang des Wärmeleitungsschweißens ins Tiefschweißen erhöht sich die Absorption für IR-Strahlung durch Multireflection derart, so dass die grüne Quelle redundant wird. . Somit sind Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz des Prozesses aufgrund der begrenzten Konversionseffizienz der grünen Strahlquelle fraglich.
- *Gepulstes Schweißen mit teilweise konvertierter Strahlung und restlicher IR Strahlung [6]:* Hohe Energieeffizienz, durch Schutzanmeldung auf einen Hersteller (Lasag) beschränkt.
- *SHADOW[®]- und Mikroringschweißen [7]:* Beginn der Schmelzphase nicht vorhersehbar, dadurch fehlende Anbindung am Nahtanfang (SHADOW[®]) oder variierende Energieeinkopplung in das Schmelzbad (Mikroringschweißen).

- *Echtzeitregelung* [8, 9, 10]: Besonders schnelle Systeme und Algorithmen erforderlich, um innerhalb der typischen Prozesszeiten hinreichende Regelzyklen zu ermöglichen. Konflikt zwischen erforderlicher Geschwindigkeit und Flexibilität für wechselnde Schweißapplikationen.

Bei allen genannten Methoden kann zumindest tendenziell eine Verbesserung der Prozessstabilität festgestellt werden. Die genannten Nachteile dieser Methoden werden durch den neuen hier vorgestellten Ansatz vollständig und kosteneffizient überwunden:

In eigenen Vorarbeiten konnten durch die Vorbearbeitung mit einem frequenzkonvertierten Nanosekundenpuls (Vorkonditionierung) signifikante Verbesserungen der Prozessstabilität beim gepulsten Laserschweißen von Kupfer nachgewiesen werden [11]. Interpretiert wird dieses Ergebnis mit einer Normalisierung der Anfangsbedingungen (Bildung einer definierten Oxidschicht) durch die Kurzpuls-Laserbearbeitung, woraus ein erhöhter und reproduzierbarer Absorptionsgrad eingestellt wird (Abb. 1) [12].

Demnach scheint beim Laserschweißen von Kupfer die stark variierende Oberflächenbeschaffenheit einen dominanten Einfluss auf die Prozessstabilität zu haben. Zum Beispiel variiert der Absorptionsgrad lokal auf einem Kupfer-Werkstück bereits um 10 % - 17 % [13].

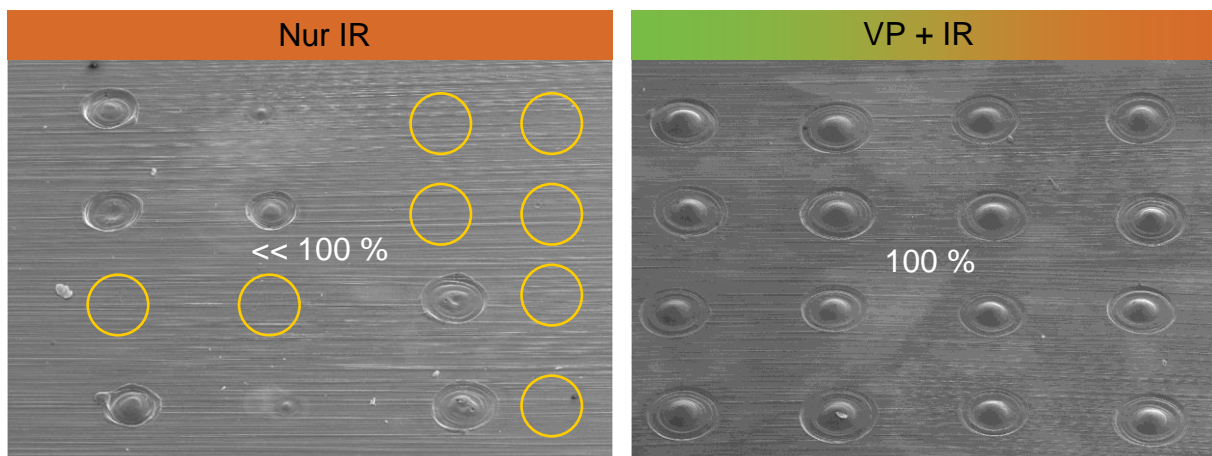


Abbildung 1: Blindschweißungen auf Kupfer im 4x4-Raster. Links: Ergebnisse beim konventionellen IR-Laserschweißen. Rechts: Ergebnisse mit zusätzlicher Kurzpuls-vorkonditionierung. Die IR-Laserparameter sind bei allen Versuchen konstant (Pulsenergie $E_P = 2,4$ J, Pulsdauer $t_P = 2$ ms) [9].

Die zusätzlich eingebrachte Energie des Vorpulses von $E_{VP} = 0,6$ mJ ist gegenüber der Energie des Schweißpulses von $E_P = 2,4$ J vernachlässigbar klein.

Das Verfahren zeichnet sich nach den Vorarbeiten durch die folgenden Merkmale aus:

- In einem großen Prozessfenster traten keine Fehlschweißungen auf (200 Wdh.).
- Die Variation der Schweißpunktdurchmesser beträgt lediglich 2 % - 5 %.
- Eine Energieeinsparung von 20 % bis 40 % ist möglich.
- Der Effekt der Kurzpuls-vorkonditionierung bleibt für mindestens 24 Stunden stabil; Vorpuls und Schweißpuls können demnach unmittelbar nacheinander oder in einem größeren zeitlichen Abstand aufgebracht werden, ohne die Prozessstabilität zu reduzieren.

In Abgrenzung zu den bisherigen Methoden wird bei der Kurzpuls-vorkonditionierung die Laserstrahlung besonders effizient genutzt: Die Vorkonditionierung erfolgt prozesssicher mit frequenzkonvertierter Strahlung mit Pulsenergien im Millijoulebereich und Pulsdauern im Nanosekundenbereich. Geeignete kommerzielle Strahlquellen werden vollständig gekapselt ca. handflächengroß realisiert. Zum Schweißen kann anschließend eine beliebige gepulste IR-Strahlquelle verwendet werden. Derartige Quellen sind heute ausgereift und mit mittleren Leistungen von bis zu 500 W erhältlich. In Kombination bilden die beiden Strahlquellen eine kosteneffiziente und hochgradig prozessfähige Lösung für das Kupferschweißen. Mithilfe der

Vorpulskonditionierung erreicht das Laserstrahlschweißen bei Kupferwerkstoffen die Prozesssicherheit, wie sie z.B. vom Schweißen von Eisenmetallen bekannt ist.

Falls große Verbindungsquerschnitte erzeugt werden müssen, z.B. Schweißnähte von mehreren mm Länge, so weist das gepulste Schweißen ein Geschwindigkeitsdefizit gegenüber dem kontinuierlichen Schweißen auf. Um beim kontinuierlichen Schweißen ebenfalls eine hohe Prozesssicherheit zu erhalten, sind eingehende Untersuchungen notwendig.

Literatur:

- [1] Blom, A., Dunias, P., van Engen, P., Hoving, W. & de Kramer, J. (2003) Process spread reduction of laser microspot welding of thin copper parts using real-time control, in Proc. SPIE 4977, 493-507.
- [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., Ramseyer, R. & Poprawe, R. (2011) Process Studies on Laser Welding of Copper with Brilliant green and Infrared Lasers, Physics Procedia, Volume 12, 349 – 346.
- [4] 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.
- [5] Hess, A., Heider, A., Schuster, R., Weber, R. & Graf, T. (2010) Benefits From Combining Laser Beams With Different Wavelengths (Green and IR) For Copper Welding, in proceedings of ICALEO 2010, Anaheim, USA.
- [6] Rüttimann, C., Dürr, U. & Moalem, A. (2010) Reliable Laser Micro-Welding of Copper, in proceedings of ICALEO 2010, Anaheim, USA.
- [7] Gillner, A., Olowinsky, A., Klages, K., Gedicke, J., Sari, F. (2006) Proc. SPIE Vol. 6161, 616102.
- [8] Schmidt, M. (2002) Ph.D. thesis, Erlangen, Germany
- [9] Stehr, T., Hermsdorf, J., Henning, T. & Kling, R. (2010) Closed loop control for laser micro spot welding using fast pyrometer systems, Physics Procedia, Volume 5, Part 2, 2010, 465-471.
- [10] Jüttner, S., Hübner, A., Kovalska, O., Leis, S. (2012) Erhöhung der Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit beim Laserpunktschweißen dünner kupferbleche durch dynamische Modulation des Laserpulses, In: 32. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik, Düsseldorf: DVS media GmbH, 151 – 156.
- [11] 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.
- [12] Moalem, A., v. Witzendorff, P., Stute, U. & Overmeyer, L. (2012) Reliable Copper Spot Welding with IR Laser Radiation through Short Prepulsing, Procedia CIRP, Volume 3, 459 – 464.
- [13] Amorosi, S. (2004) Laser micro-spot welding of copper by real-time process monitoring, Ph.D. thesis, EPFL Lausanne, Switzerland.

3. Zielsetzung / Nutzen für kmU

Ziel des Vorhabens ist, die gezeigten Vorteile der Kurzpulsvorkonditionierung beim Schweißen von Kupferwerkstoffen mit *gepulster* IR-Laserstrahlung auf das *kontinuierliche* Schweißen zu übertragen und dadurch die Prozesszeit für das Nahtschweißen erheblich zu verkürzen. Demnach wird mit einem Kurzpulslaser vorkonditioniert und mit einem kontinuierlichen *hochbrillianten Diodenlaser* die Schweißenergie zugeführt (Abb. 2).

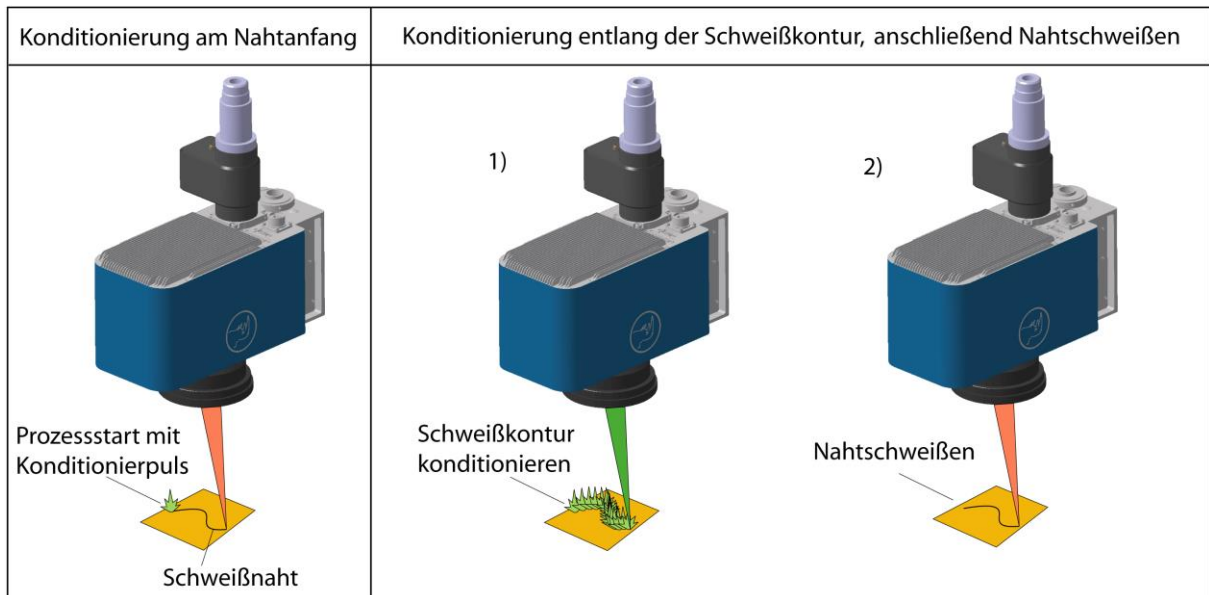


Abbildung 2: Konzepte für die Vorkonditionierung und das anschließende Nahtschweißen.

Die Kurzpulsvorkonditionierung kann zu Prozessbeginn den Einstechvorgang der kontinuierlichen Laserstrahlung beschleunigen und die Dauer der Heizphase stabilisieren. Sobald eine Schmelze bzw. Keyhole vorliegt, wird die Diodenlaserstrahlung mit erhöhtem Absorptionsgrad in Wärme umgewandelt. Alternativ kann das Werkstück entlang der Schweißkontur in diskreten Abständen konditioniert und anschließend mit kontinuierlicher IR-Laserstrahlung geschweißt werden.

Insbesondere für kmU werden die folgenden Vorteile erwartet:

- Prozesssicheres Punktschweißen von Kupferwerkstoffen mit kontinuierlicher Laserstrahlung wird ermöglicht, dadurch weniger Ausschuss.
- Prozesssicheres Nahtschweißen von Kupferwerkstoffen wird ermöglicht und der Nahtanfang wird wiederholbar definiert, dadurch weniger Ausschuss bzw. Nacharbeit.
- Verbesserte Robustheit gegenüber wechselnden Legierungen und Chargen.
- Um ein Vielfaches größere Prozessgeschwindigkeit als beim gepulsten Nahtschweißen.
- Keine Leistungsmodulation am Nahtanfang erforderlich (Einstechen), dadurch geringe Einrichtungskosten bei wechselnden Bauteilgeometrien.
- Hohe Energieeffizienz durch Einsatz eines Diodenlasers
- Energieeinsparung durch geringere Reflexionsverluste.
- Bestehende IR-Lasersysteme lassen sich durch ein Kurzpulsmodul mit geringen Investitionskosten für das Kupferschweißen aufrüsten (ca. 10 T€).
- Konventionelle Verfahren, z.B. Widerstandsschweißen oder Bonden (Bändchen), können aufgrund der erreichten Prozesssicherheit durch Laserschweißen ersetzt werden.

4. Methodischer Ansatz

Obwohl der positive Einfluss der Vorkonditionierung auf die Schweißergebnisse umfangreich nachgewiesen ist, werden die physikalischen Ursachen noch nicht vollständig verstanden. Daher umfassen die Untersuchungen auch grundlegende Fragestellungen zum Materialverhalten (Oxidschichtbildung) bei Kurzpulsbeaufschlagung. Der Schwerpunkt der Untersuchungen wird jedoch auf das dynamische Verhalten beim kontinuierlichen Schweißen gelegt. Falls ausschließlich am Nahtanfang vorkonditioniert und somit allein das Einstechen verbessert wird so erfolgt das Nahtschweißen hauptsächlich aufgrund der erhöhten Absorption der Diodenlaserstrahlung in der Schmelze und beim Tiefschweißen durch Multireflection. Die Schweißgeschwindigkeit und –stabilität kann möglicherweise weiter gesteigert werden, wenn entlang der Schweißkontur in regelmäßigen Abständen vorkonditioniert wird. In diesem Fall können aufgrund der erhöhten Absorption der vorkonditionierten Bereiche, die vom traditionellen Nahtschweißen bekannten Effekte der Vorwärmung im Vorlauf der Schweißzone wieder positiv an Einfluss gewinnen. Die Untersuchungen werden an für die Elektronikfertigung

typischen Kupferlegierungen durchgeführt (Cu-ETP, CuSn 0,15, CuSn4, CuFe2P). Die Dimensionierung der Schweißproben und die Fügegeometrien orientieren sich an den industriellen Anforderungen des PbA.

Die zu beantwortenden Fragen lauten hierbei:

- Welche Oxide liegen in der Oxidschicht vor und wie ist diese aufgebaut? Wie ist die Wechselwirkung zwischen dem Schichtsystem und der hochbrillianten Diodenlaserstrahlung und für welchen Aufbau wird der Absorptionsgrad maximiert?
- Mit welchen Laserparametern des KurzpulsLasers können dann gezielt Oxidschichten mit für die hochbrillante Diodenlaserstrahlung optimiertem Absorptionsgrad erzeugt werden?
- Welches Prozessfenster wird beim Nahtschweißen mit einfacher Vorkonditionierung am Nahtanfang und mehrfacher Vorkonditionierung entlang der Schweißkontur erreicht?
- Welche mechanischen, elektrischen und metallurgischen Eigenschaften weisen die Schweißnähte auf? Kommt es zum Nahteinschluß der Oxidschicht?

Dazu werden die folgenden Aufgaben definiert:

- ⇒ Prozessentwicklung: Einfluss der Parameter der beiden Laserquellen und der Verfahrensführung auf das Schweißergebnis prüfen, Untersuchungen mit unterschiedlichen Schutz-, Arbeitsgasen und Kupferlegierungen,
- ⇒ Diagnose: Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen, Mikro-CT-Aufnahmen, EDX-, XPS-Messungen und REM-Aufnahmen an metallographischen Schliffen, Scher- /Zugtests sowie elektrische Kontaktwiderstandsmessung und nach Bedarf weitere Analysetechniken,
- ⇒ Auswertung und Modellbildung.

5. Arbeitsschritte / Projektorganisation

Arbeitspakete	Zeitraum								PM
	Jahr 1				Jahr 2				
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	
Versuchsaufbau									3
Prozessentwicklung									
○ Konditionierung am Nahtanfang									5
○ Konditionierung entlang der Schweißkontur									5
Diagnose und Analyse									6
Auswertung und Modellbildung									4
Bericht									1
								Summe	24

6. Projektvolumen / Personaleinsatz / Projektlaufzeit

Forschungsstelle LZH	Kosten
24 Monate Wissenschaftlicher Mitarbeiter TV-L EG13	121.700,- €
24 Monate Studentische Hilfskraft 19h/Woche	21.250,- €
Verbrauchskosten	18.000,- €
Reise- und Konferenzkosten	3.000,- €

Die umfangreichen experimentellen und theoretischen Arbeiten erfordern bei der Planung, Durchführung und Auswertung die Projekterfahrung und das Prozessverständnis eines Wissenschaftlichen Mitarbeiters (Dipl.-Ing./Dipl.-Phys.).

Die studentische Hilfskraft unterstützt den Wissenschaftlichen Mitarbeiter über die gesamte Projektlaufzeit mit der Durchführung von Teilaufgaben, z.B. Versuchsreihen, Analyseaufgaben und Dokumentation.

An Verbrauchsmaterial werden Schutz- und Arbeitsgase, Metallographiebedarf sowie mechanische und optische Komponenten für den Versuchsaufbau benötigt.

7. Angestrebter Transfer in die Praxis

Die Projektergebnisse werden auf Messen, Konferenzen und in Zeitschriften veröffentlicht. Die angestrebten Plattformen umfassen die Konferenzen ICALEO (USA), LIM (München), die Messen SMT (Nürnberg), die Hannover Messe (Hannover), die COMPAMED (Düsseldorf) und Fachzeitschriften. Der Zwischen- und Abschlussbericht wird interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt. Ergänzt wird der Wissenstransfer durch Pressemitteilungen und eine Internetseite.

8. Geplante Zusammensetzung des PbA

arteos GmbH	W. Korb	zugesagt
B-P-E International	W. Hornig	zugesagt
neoLASE GmbH	M. Frede	zugesagt
Wieland-Werke AG	P. Herzog	zugesagt
Direct Photonics Industries GmbH	S. Heinemann	zugesagt
LMB Laser-Materialbearbeitung GmbH	K. Margraf	zugesagt
Hesse GmbH	H. Hesse	zugesagt
Power Systems & Solutions GmbH	H. Teckhaus	angefragt
Infineon Technologies AG	C. Stahlhut	angefragt
LLT Applikation GmbH	L. Pause	zugesagt
Class 4 Laser Professionals AG	R. Holtz	angefragt
Alpha Laser GmbH	H. Meyndt	angefragt

9. Forschungsstelle(n)

Laser Zentrum Hannover e.V.
Hollerithallee 8
30419 Hannover

Projektleiter:
Dr.-Ing. Stefan Kaielerle

Forschungsstellenleiter:
Dr. rer. nat. Dietmar Kracht

Genehmigt durch den FS-Leiter:
Hannover, 04.03.2013