

Schnelle und präzise Pyrometermesstechnik für das geregelte Laserstrahl-Mikroschweißen

Thomas Stehr*, Jörg Hermsdorf*, Rainer Kling*

*Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH), Hannover

[mailto: t.stehr@lzh.de](mailto:t.stehr@lzh.de)

Um eine höhere Prozessfähigkeit beim Mikroschweißen von Kupferwerkstoffen zu erzielen, wurde eine Online-Regelung basierend auf einem schnellen Pyrometer aufgebaut. Das Pyrometer ermöglicht Messzeiten von $3\mu\text{s}$ und Messfleckdurchmesser von unter $400\mu\text{m}$. Untersucht wurden Störeinflüsse auf das Messergebnis und die mittels Regelung erzielbaren Schweißergebnisse.

1. Einführung

Das Laserstrahl-Schweißen ermöglicht als Füge-technik für Mikrokomponenten und elektrische Kontaktierungen thermisch und mechanisch hoch belastbare Verbindungen. Während beim Schweißen von Stahlwerkstoffen bereits eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erzielt wird, besteht noch ein Defizit beim Schweißen von Kupfer und seinen Legierungen. Die geringe Prozessfähigkeit ist hierbei in dem hohen Reflexionsgrad gegenüber der konventionell eingesetzten Laserwellenlänge von $\lambda = 1064\text{nm}$ sowie der guten Wärmeleitfähigkeit begründet [1], [2]. Geringfügige Änderungen der Oberflächenqualität infolge Verschmutzung, Oxidation oder Kratzer führen bereits zu starken Änderungen der Strahlungsabsorption und dadurch zu variierenden Energieeinträgen und Schweißqualitäten. Um einen gleichmäßigen Energieeintrag zu erzielen, wurde eine Online-Regelung der Laserleistung aufgebaut, die als Messinstrument ein schnelles Pyrometer verwendet. Das Pyrometer detektiert die vom Prozess ausgehende Infrarotstrahlung, die für die Regelung der Laserleistung anhand eines vorgegebenen Sollwertes genutzt wird.

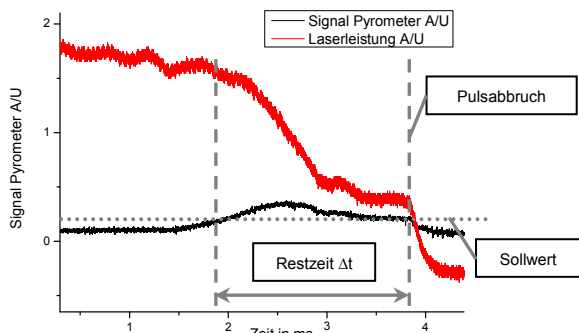


Abb. 1. Prinzip Regelung

Bei Erreichen eines Schwellwertes (z.B. gleich dem Sollwert oder darunter) wird ein Timer für die Restzeit Δt des Pulses gesetzt, nach der der Laserpuls zu beenden ist. Durch diesen neuen Ansatz erfolgt ein gleichbleibender Energieeintrag,

und eine Überhitzung des Schmelzbades wird vermieden. Die Größendimensionen und der geringe, und zudem temperaturabhängige Emissionsgrad des Kupfers stellen dabei hohe Anforderungen an die Messtechnik.

2. Versuchsaufbau

Für die Schweißuntersuchungen wurde ein Nd:YAG-Laser ($\lambda = 1064\text{nm}$) mit einer Pulsspitzenleistung $P = 5\text{kW}$ und Pulslängen bis $t_p = 20\text{ms}$ eingesetzt. Der Regelkreis beinhaltet ferner einen Echtzeit-Prozessor für die Messdatenverarbeitung und die Ausgabe der Stellgröße (Taktfrequenz bis 40kHz). Das Pyrometer ist am Bearbeitungskopf mittels Lichtleitfaser koaxial zum Laserstrahl angebracht.

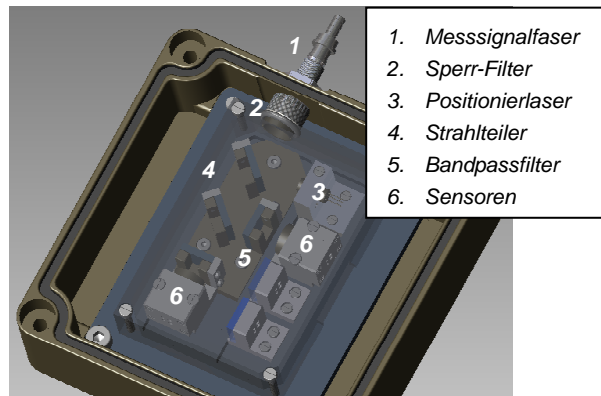


Abb. 2. Quotientenpyrometer der Jencontrol GmbH

Ein Sperrfilter (2.) am optischen Eingang des Pyrometers unterbindet jeglichen Einfluss der Laserstrahlung auf das Messsignal (Abb. 2). Die Messwertaufnahme erfolgt mittels Photodioden (6.) und Bandpassfilter (5.) bei $\lambda_{M1} = 1550 \pm 24,5\text{nm}$ und $\lambda_{M2} = 1620 \pm 24,5\text{nm}$. Bei Anwendung beider Messwellenlängen (Quotientenpyrometrie) ist die Kenntnis des Emissionsgrades für die Berechnung der Ist-Temperatur nicht erforderlich. Im Rahmen der hier veröffentlichten Ergebnisse wurde mit nur einer Wellenlänge gearbeitet, da aktuell noch an einer weiteren Reduzierung des Grund-

rauschens gearbeitet wird, um den Quotienten exakt auswerten zu können.

Für die Schweißuntersuchungen wurde Kupferband mit einer Länge von jeweils 20mm, einer Breite von 2mm und einer Dicke von 0,15mm blind und 0,1mm im Überlapp geschweißt. Um die Laserfaser nicht durch Rückreflexionen zu schädigen, wurde unter einem Winkel von $\alpha = 85^\circ$ eingestrahlt.

3. Ergebnisse

Die Signalamplitude und der -verlauf zeigen bei Blindschweißungen eine starke Abhängigkeit von den Laserparametern, der Werkstückoberfläche und dem Wärmefluss. Dies zeigt sich bereits im Einfluss der Walzspuren auf dem Kupferband. Der Durchschnitt der maximal gemessenen Signalspannungen U liegt um 20,1% höher, wenn quer zu den Walzspuren unter dem Winkel α eingestrahlt wird (je 100 Proben). Durch die von Punkt zu Punkt variierenden Oberflächeneigenschaften ergibt sich ferner eine starke Streuung der Signalamplituden, unterhalb des Schmelzpunktes des Kupfers. Bei einfarbiger Messung erschwert dies die Wahl eines Schwellwertes für die Regelung. Die geringste Streuung der Werte fand sich für diese Anwendung bei Pulsspitzenleistungen $P_L \geq 4\text{kW}$. Unter Anwendung dieser Leistung wurde eine auf Einfarbenpyrometrie ($\lambda = 1620\text{nm}$) basierende Regelung aufgebaut.

Bei Blindschweißungen ließ sich durch die Regelung eine definierte Ausdehnung der Schmelze in Form des Schweißpunktdurchmessers erreichen (Tab. 1; je 60 Proben). Dabei wurde mit jeder Zeile die Pulsdauer bzw. mit Regelung die Restzeit Δt um jeweils 0,5ms erhöht. Mit Hilfe der Regelung konnte eine bessere Reproduzierbarkeit der Schweißergebnisse in Form einer um durchschnittlich 84% geringeren Standardabweichung vom Mittelwert des Durchmessers erzielt werden.

Mittelwert Schweißpunktdurchmesser in μm			
ohne Regelung		mit Regelung	
Pulsdauer in ms	Mittelwert \varnothing in μm	Restzeit Δt in ms	Mittelwert \varnothing in μm
4,0	516,6 \pm 79,8	1,5	410,3 \pm 12,6
4,5	544,2 \pm 126,5	2,0	430,8 \pm 32,4
5,0	541,8 \pm 101,8	2,5	438,0 \pm 5,4
5,5	623,7 \pm 50,1	3,0	465,1 \pm 6,8

Tab. 1. Blindschweißungen ohne/mit Regelung

Im Anschluss wurden Überlappschweißungen mit 0,1mm dickem Kupferband und jeweils 60 Proben durchgeführt und die erzielten Schweißqualitäten mit Hilfe von Zugversuchen analysiert. In Abb. 3 sind die erlangten Zugkräfte mit und ohne Regelung sowie der Mittelwert und die Standardabweichung dargestellt. Unter Einsatz der Regelung ergibt sich eine Reduzierung der Standardabweichung der maximalen Zugkräfte um fast 60% gegenüber den Schweißungen ohne Regelung.

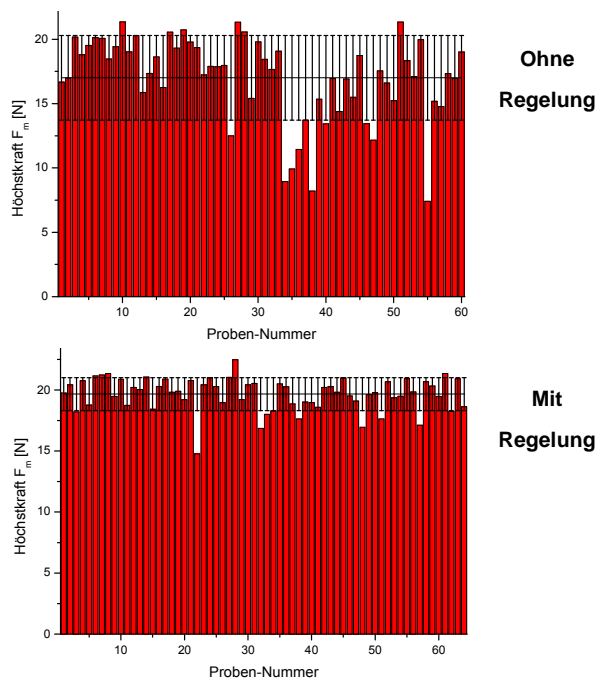


Abb. 3. Maximale Zugkräfte mit / ohne Regelung

4. Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe des aufgebauten Regelkreises konnte die Standardabweichung im Schweißdurchmesser um durchschnittlich 84% reduziert und eine definierte Ausdehnung der Kupferschmelze erreicht werden. Ferner konnte mit Regelung die Schweißqualität in Form der Standardabweichung der Zugfestigkeit um fast 60% erhöht werden. Beides spiegelt eine bessere Reproduzierbarkeit mittels Regelung und somit einen robusten Schweißprozess wider. Und dies auch bei sehr kurzen Puls-längen (<4ms) und dadurch reduzierter Bauteilbelastung infolge Wärmeflusses.

Die Signalwerte bei Messung mittels einer Wellenlänge zeigen eine starke Abhängigkeit von den Oberflächeneigenschaften des Werkstoffs. Die Festlegung eines Schwellwertes für die Regelung wird dadurch erschwert. Durch die Verwendung als Quotientenpyrometer lässt sich diese Problemstellung lösen. Die gemessenen Signalwerte weisen hierfür einen gleichmäßigen Verlauf auf, jedoch wird noch an einer weiteren Reduzierung des Grundrauschens gearbeitet, um eine exakte Quotientenbildung und damit Temperaturberechnung zu gewährleisten.

5. Referenzen

- [1] Dürr, U.: Reproduzierbares Laserschweißen von Kupferwerkstoffen. In: *Metall – Internationale Fachzeitschrift für Metallurgie-* 10 (2008), Nr. 10, S. 647–651
- [2] Otte, F.; Stehr, T.; Stute, U.; Ostendorf, A.: Micro-welding of electronic components with 532nm laser radiation. In: *Lasers and applications in science and engineering*, LASE Bd. 6452 SPIE, 2007