

LASERPUNKTSCHWEISSEN VON KUPFERLEGIERUNGEN

Резюме: Серед великої кількості компонентів електроіндустрії виготовляються з'єднання з електричними та теплопровідними властивостями. Для цих цілей широко використовуються мідні матеріали. Умова, виготовити ці з'єднання дуже малих розмірів при одночасно короткій та локально обмеженій подачі тепла, вимагає застосування способу зварювання плавленням високої густини потужності, такого як лазерне зварювання. Проте мідь має властивість виявляти як неоднорідну так і дуже температуру залежну поглинальну здатність для лазерного випромінювання. Як наслідок якість зварних з'єднань, виконаних з цього матеріалу, зазнає великих коливань і стабільність процесу є дуже низькою. В рамках дослідної роботи було зроблено спробу розробити стратегію для підвищення стабільності процесу при зварюванні міді імпульсним лазерним випромінюванням через регулювання динамічної модуляції лазерного імпульсу. Оцінку зразків отриманих лазерним точковим зварюванням було проведено з огляду на внутрішні і зовнішні недосконалість зварних пунктів за допомогою візуального контролю, металографічного дослідження, а також випробувань на міцність. Було представлено окремі вибрані результати досліджень у взаємозв'язку між параметрами впливу на стабільність процесу та досягнутою при цьому якістю зварних з'єднань.

Abstract: An einer Vielzahl von Komponenten der Elektronikindustrie sind Verbindungen mit elektrischen und wärmeleitfähigen Eigenschaften herzustellen. Für diese Anwendungen gelangen u. a. Kupferwerkstoffe zum Einsatz. Die Forderung, diese Verbindungen in sehr kleinen Dimensionen bei gleichzeitig kurzer und lokal begrenzter Wärmeeinbringung zu erzeugen, erfordert den Einsatz von Schmelzschweißverfahren hoher Energiedichte, wie z. B. dem Laserstrahlschweißen. Kupfer weist jedoch ein inhomogenes sowie stark temperaturabhängiges Absorptionsvermögen für die Laserstrahlung auf. Dies hat zur Folge, dass die Qualität von Laserstrahlschweißungen an diesem Material starken Schwankungen unterliegt und die Prozessstabilität sehr gering ist. Im Rahmen einer Forschungsarbeit wurde versucht eine Strategie für die Erhöhung der Prozessstabilität beim Schweißen von Kupfer mit gepulsten Lasern durch die Verwendung einer Regelung zur dynamischen Modulation des Laserpulses zu erarbeiten. Die Beurteilung der laserpunktgeschweißten Proben erfolgte im Hinblick auf innere und äußere Schweißnahtimperfectionen durch Sichtprüfung, metallographische Auswertung sowie Festigkeitsuntersuchungen. Vorgestellt werden ausgewählte Untersuchungsergebnisse zum Zusammenhang zwischen wesentlichen Einflussgrößen der Prozessstabilität und der erreichbaren Verbindungsqualität.

Abstract: The use of a pulse forming laser source, improved by a closed loop power output control to stabilize the laser spot welding process of copper and dissimilar copper welds. The research objective is the increased stability of the laser spot welding process of copper and dissimilar copper welds. This will be possible using a pulsed laser and a closed loop power output control that dynamically modulates the laser pulse in order to produce consistent results. While doing so the system's design must be kept as simple as possible, plus it has to be integrated into the existing power output control and pulse forming laser source. The control parameters have to be conform to the properties of the materials to be joined. In addition a process control is to be integrated. An increase of reproducibility of properties of spot welds at a reasonable cost has to be verified on industrial application samples. Increasing the laser welding process stability allows the execution of challenging joining tasks e.g. in the fields of solar engineering and photovoltaics. These fields gain importance because of the increasing use of alternative and renewable energy. These points put small and medium-sized companies in positions to use the full potential of pulse modulated laser sources producing components out earlier mentioned materials, plus gaining a competitive advantage.

1 Einleitung

An einer Vielzahl von Komponenten und Halbzeugen der Elektronikindustrie sowie der alternativen Energieerzeugung sind Verbindungen mit festen elektrisch- und/oder wärmeleitfähigen Eigenschaften herzustellen. Für solche Anwendungen gelangen zunehmend Kupferwerkstoffe zum Einsatz. Diese Bauteile sind zudem oftmals als Werkstoffverbunde aufgebaut, bei denen die Basiswerkstoffe, wie Silizium oder Keramiken, eine hohe Temperaturempfindlichkeit aufweisen. Die Restriktion, diese Verbindungen in sehr kleinen Dimensionen bei gleichzeitig kurzer und lokal begrenzter Wärmeeinbringung zu erzeugen, erfordert den Einsatz von Schmelzschweißverfahren hoher Energiedichte, wie z. B. dem Laserstrahlschweißen. Typische Anwendungsbeispiele sind das Kontaktieren von Verbindungsbändern zwischen Solarzellen, das Linienpunktschweißen von thermischen Solarabsorbern sowie das Schweißen elektronischer Mikrostecker und von Kühlkörpern auf Chipträger (Bild 1).

Das Laserpunktschweißen ist ein vielversprechendes und teilweise bereits eingesetztes Fertigungsverfahren, das durch

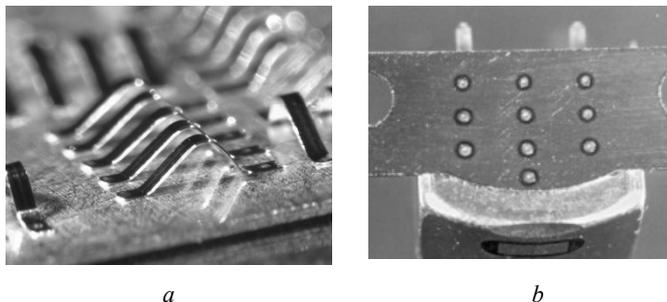


Bild 1. Beispiele für laserpunktgeschweißte Cu-Verbindungen (a) Kontakt für die Medizintechnik [1] (b) Halbleuch auf einem Magnetkopf [2]

seinen Automatisierungsgrad eine hohe Effizienz und bei ebenso hoher Qualität der erzeugten Verbindungen verspricht. Vorteile, die die Substitution bisher angewandter Fügeverfahren in der Mikrofügetechnik durch das Laserpunktschweißen forcieren, sind die kosteneffizientere Fertigung durch die Einsparung von Fertigungsschritten. Zudem erlaubt eine fügetechnische Fertigung ohne den Einsatz artfremder Zusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe eine höhere Recyclingfähigkeit der Produkte.

2 Ausgangssituation

Durch die hervorragende elektrische Leitfähigkeit hat der Werkstoff Kupfer in der Elektronik und Elektrotechnik an enormer Bedeutung gewonnen. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Kupfers ist eine Wärmequelle hochkonzentrierter Energie notwendig, um die Wärmeleitung an der Schweißstelle zu kompensieren. Auf der einen Seite eignet sich hierfür speziell das Laserstrahlschweißen, auf der anderen Seite führen die Umstände beim Laserpunktschweißen zu Problemen. Ein wichtiges Kriterium bei der Laserstrahlbearbeitung von Materialien ist der Absorptionsgrad des Werkstoffs. Kupfer weist ein schlechtes und inhomogenes sowie stark temperaturabhängiges Absorptionsvermögen für die

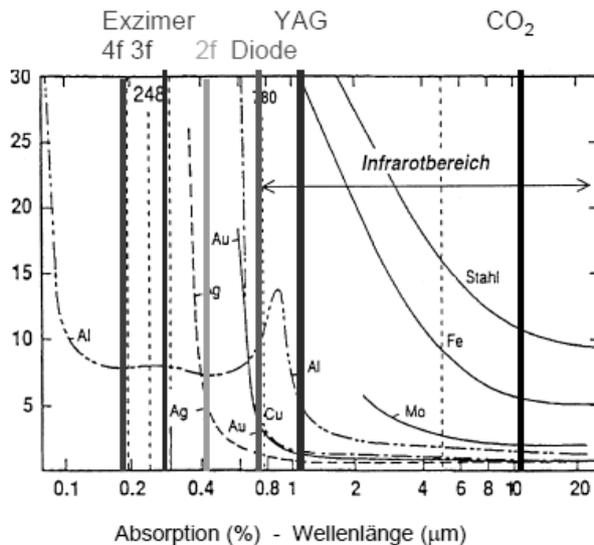


Bild 2. Absorptionsgrad verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Wellenlänge unterschiedlicher Lasertypen [5]

Laserstrahlung auf. Die glatte, oxidfreie Kupferoberfläche kann 1,5 bis 3% der Laserenergie im Wellenlängenbereich $\lambda=1,064\mu\text{m}$ absorbieren (siehe Bild 2). Im Vergleich zum Werkstoff Stahl, mit einer Absorptionsrate $A_{\text{St}}=35\%\pm 1\%$, beträgt die Schwankung der Absorption für Kupfer etwa 66,7%, was zu einer deutlichen Beeinflussung der Schweißergebnisse führt.

Die Absorptionseigenschaften von Kupfer bedingen, dass die Qualität von Laserstrahlschweißungen an diesem Material starken Schwankungen unterliegt und die Prozessstabilität sehr gering ist. Das Potenzial des Lasers für eine effiziente Erfüllung solcher fügetechnischer Aufgaben ist deshalb bislang nur ungenügend nutzbar. Moderne gepulste Nd:YAG-Laserquellen erlauben, die Laserleistung durch die Vorgabe von frei skalierbaren Pulsleistungskurven in zeitlicher Abhängigkeit zu regeln und abzugeben. Daher liegt der Ansatz nahe, die häufig bereits mit einer externen Schnittstelle ausgestattete Laserleistungsregelung mit Hilfe von gemessenen Prozesssignalen während des Punktschweißprozesses zu nutzen und dadurch die Prozessstabilität und -reproduzierbarkeit zu erhöhen. Über erste Ergebnisse dieser Untersuchungen berichtet der folgende Aufsatz.

3 Experimentelles

3.1 Vorgehensweise

Ausgehend von der dargelegten Situation war es Ziel der Untersuchungen, den Prozess des Laserstrahlschweißens mit pulsmulierbaren Laserstrahlquellen für Kupfer- und Cu-Mischverbindungen hinsichtlich der Stabilität zu verbessern, um so das Potenzial des Verfahrens für das Laserstrahlschweißen dieser Werkstoffe besser ausnutzen zu können als auch eine durchgängig hohe Qualität der geschweißten Verbindungen zu realisieren. Das Hauptaugenmerk lag auf der Entwicklung eines Regelungskonzeptes zur Optimierung der Laserleistung in Form einer dynamischen Pulsmodulation des Laserpulses, durch welche die Laserstrahlleistung an die lokalen Absorptionseigenschaften der Fugestelle angepasst wurde, um so einen möglichst konstanten Wärmeeintrag und optimierte reproduzierbare Fügebedingungen an der jeweiligen Fugestelle zu erreichen. Zur Umsetzung dieser anspruchsvollen Zielstellung wurde zunächst ein Versuchsaufbau realisiert, an dem das Regelungssystem entwickelt und erprobt werden konnte. In einem nächsten Schritt erfolgte die Entwicklung einer Software zur Regelung der Leistungsabgabe der Laserstrahlquelle in Abhängigkeit der momentanen optischen Oberflächeneigenschaften sowie deren Erprobung durch Versuchsschweißungen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden nachfolgend vorgestellt.

3.2 Verwendete Gerätetechnik

Für die experimentellen Versuche gelangt eine gepulste Laserstrahlquelle des Typs SLS-200 CL 60 mit einem Schweißkopf LLBK-60 zum Einsatz. Bei der Laserstrahlquelle handelte es sich um einen blitzlampengepumpten Nd:YAG-Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 1064nm und einer Pulsspitzenleistung von 6 bis 7 kW und einer mittleren Leistung von 200 W. Die Übertragung der Laserstrahlung auf das Werkstück erfolgte über ein 400 μm Hochleistungslichtleitfaser.

3.3 Versuchsschweißungen

Die in der industriellen Anwendung zu realisierenden Laserpunktschweißungen erfolgen an Blechdickenkombinationen 0,3 bis 0,5 mm als Überlappstoß. Um den Spalteinfluss sich überlappender Bleche in dieser Phase der Untersuchungen auszuschließen, sind mit dem Laserpunktschweißungen Einschweißungen an 1 mm Blechen erfolgt.

3.4 Untersuchungswerkstoff

Als Untersuchungswerkstoff kamen desoxygenierte sauerstofffreie Kupferbleche Cu 99,9 (Cu-DHP) im Zustand halbhart zum Einsatz (Tabelle 1). Das verwendete Material ist durch einen hohen Restsauerstoffgehalt, Wasserstoffbeständigkeit und sehr gute Schweißbeugung charakterisiert.

Tabelle 1

Chemische Zusammensetzung des Untersuchungswerkstoffes

Element	Cu	P
Gehalt [Gew.-%]	99,9	0,0209

In Tabelle 2 sind die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Cu-Bleche aufgeführt.

Tabelle 2

Mechanisch-technologische Eigenschaften des Untersuchungswerkstoffes laut Abnahmeprüfzeugnis des Herstellers [3]

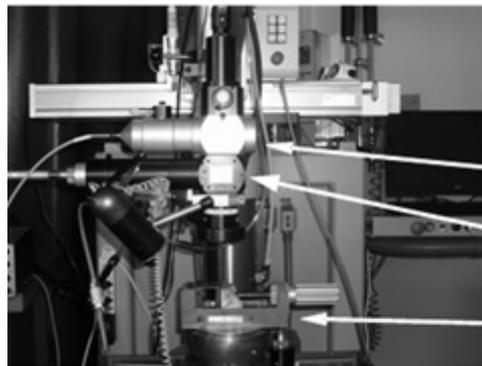
Werkstoff	mechan.-technolog. Eigenschaft		
	R_m [N/mm ²]	$R_{p0.2}$ [N/mm ²]	A_{50} [%]
Cu 99,9	279	200	30

4 Versuchsergebnisse

4.1 Entwicklung eines Versuchsaufbaus einschließlich eines Programms zur Ermittlung, Filterung und Speicherung von Prozesssignalen

Den entwickelten Versuchsstand zeigt Bild 3. Der Versuchsstand wurde durch eine CNC-Werkzeugmaschine zur Aufnahme des Schweißkopfs sowie einer zur Aufnahme und Fixierung der Schweißprobenkomplettiert.

Das Gesamtsystem zur dynamischen Anpassung der Pulsleistung ist im Bild 4 schematisch dargestellt. Grundprinzip dieses Systems ist das Detektieren des Zustandes der Fugestelle auf Basis der Prozessstrahlung. Die Kernelemente stellen eine Sensorik zur Erfassung der Prozessstrahlung, verbunden mit elektronischen Komponenten zur Verarbeitung der erfassten Daten, dar.



Sensorkopf
Schweißkopf
Wertstückaufnahme

Bild 3. Versuchsstand zum Laserpunktschweißen

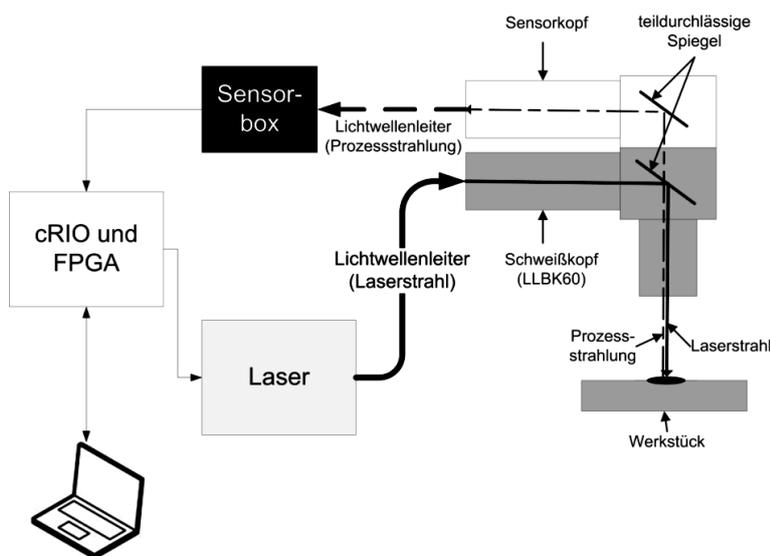


Bild 4. Schematischer Aufbau des Systems zur dynamischen Pulsmodulation

Der Laserstrahl wird über einen Lichtwellenleiter zum Schweißkopf geführt, wo er durch ein System von Spiegeln und Linsen weiter zur Schweißstelle gelenkt wird. Die reflektierte Strahlung geht über den Schweißkopf zum Sensorverarbeitungssystem. Aufgabe des Sensorsystems ist es, die Prozessstrahlungen (reflektierte Strahlungsanteile) aufzunehmen und anschließend Umwandlung in elektrische Spannungssignale für die spätere Datenverarbeitung umzuwandeln. Dabei kommen drei Photodioden zum Einsatz: Si-Photodiode (Vermessen der Intensität der Strahlung in der Dampfackel), Ge-Photodiode (Erfassung der reflektierten Laserstrahlung) und In GaAs-Diode (Temperaturmessung an der Fugestelle). Die Verarbeitung der Prozesssignale erfolgt im FPGA/cRIO, einem speziell im Rahmen der Arbeit entwickelten Algorithmus. Das cRIO ist eine Einheit zur Signalverarbeitung, die aus in Echtzeit arbeitenden Ein- und

Ausgabemodule besteht und für automatische Messungen oder für die Kontrolle von Remote-Systemen einsetzbar ist. Der speziell entwickelte und programmierte Algorithmus in Form eines Programmes (Bild 5) verarbeitete die Signale. Alle anfallenden relevanten Prozesseinflussgrößen wurden in einem Protokoll erfasst.

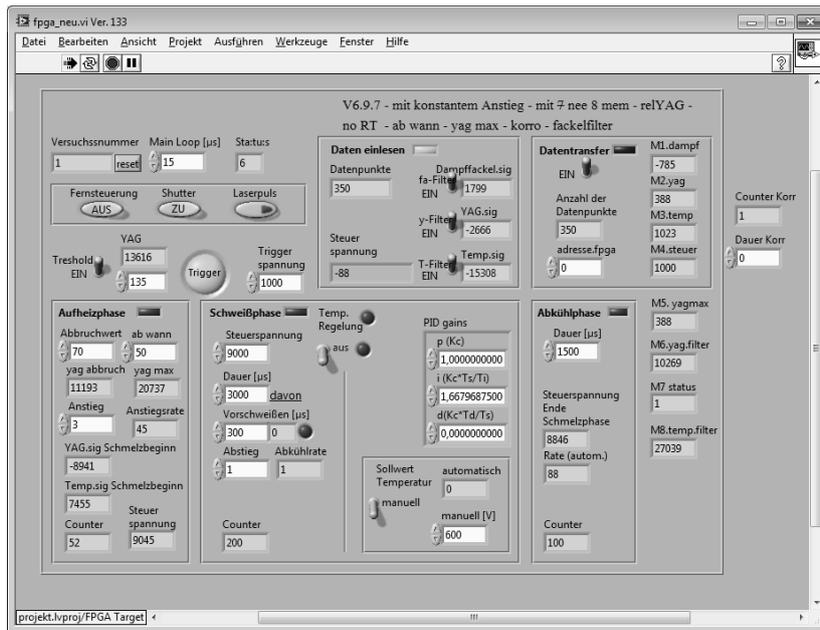


Bild 5. Bedienoberfläche des Programms zur Erfassung, Filterung, Verarbeitung und Speicherung der Prozessdaten während des Schweißens

Das Ergebnissignal, die Vorgabe für die Pulsform des Lasers, ist als Rückkopplung an die Laserleistungsregelung weitergegeben worden um sicherzustellen, dass die Laserleistung an die jeweiligen örtlichen Materialeigenschaften angepasst wird.

4.2. Analyse von Einflussgrößen auf die Prozessstabilität von Kupferschweißungen durch Ermittlung der Korrelation der Prozesssignale mit den Prozessergebnissen.

Der Laserschweißprozess ist u. a. gekennzeichnet durch die Einkopplung von Laserstrahlung in das Material. Naturgemäß wird nur ein Teil der Strahlung absorbiert, der andere weitaus größere wird reflektiert, d. h. dieser Anteil der Laserstrahlung wird nicht in Prozesswärme umgewandelt. Aufgrund der stark variierenden lokalen Absorptionseigenschaften ist ein konstanter Wärmeeintrag durch die Laserstrahlung bei einem festen Parametersatz nicht möglich und die Prozessstabilität und -reproduzierbarkeit sind daher sehr gering.

Nach Überprüfung der Funktionalität der Software erfolgte in einem weiteren Arbeitsschritt die Untersuchung des Einflusses ausgewählter relevanter Prozessparameter auf die Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit von Laserpunktschweißungen.

Um den Prozessschwankungen entgegen zu wirken ist das Verständnis zwischen den einzelnen Einstellparametern und dem Resultat zu grundlegend. Die Pulsform, die für die jeweiligen lokalen Eigenschaften an der Fugestelle generiert wurde, ist in drei Phasen untergliederbar (Bild 6):

- Phase 1: Aufheizphase (von der Absorption bis zum Schmelzbeginn des Werkstoffs)
- Phase 2: Schweißphase
- Phase 3: Abkühlphase.

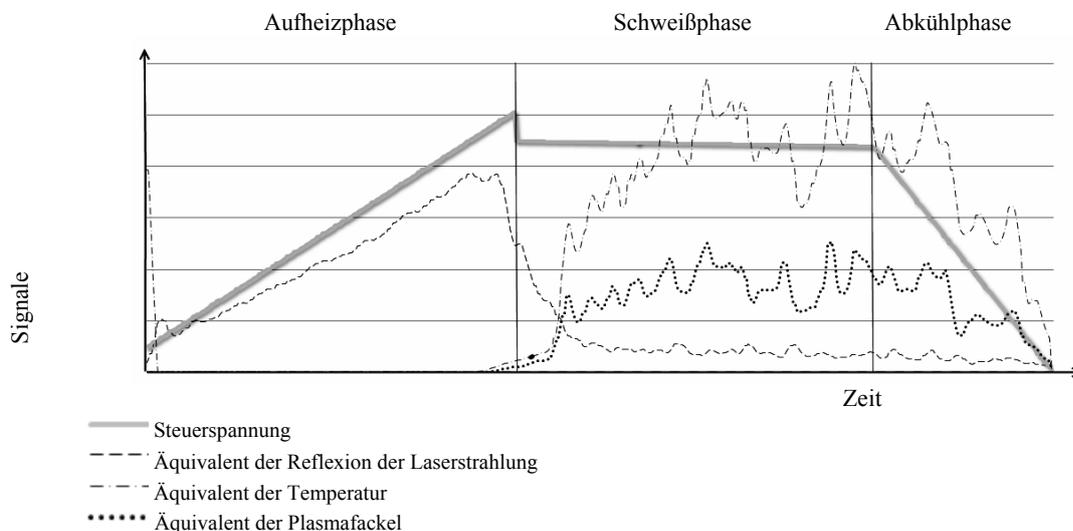


Bild 6: Pulsform und Prozesssignale innerhalb eines Pulses beim Laserpunktschweißen von Kupfer

Diese Einteilung basiert auf Erkenntnissen von [4]. In der Aufheizphase steigt die Steuerspannung, d. h. äquivalent die Laserpulsleistung, mit einer errechneten experimentell ermittelten Rate linear an, um die Fügestelle auf Schmelztemperatur zu erhitzen und so die Ausbildung des Schmelzbades herbeizuführen. Bei einem plötzlichen Einbruch der Reflexion erfolgt der Übergang zur Schweißphase. Der zunächst mit den Einsetzen der Materialverflüssigung und anschließend mit der Ausbildung der Dampfkapillare verbundenen Anstieg des Absorptionsvermögens erfordert eine Reduzierung der Laserleistung, um einen zu hohen Energieeintrag in die Fügestelle zu verhindern. Diese Drosselung der in das Schmelzbad eingebrachten Leistung ist notwendig, um der Verdampfung eines zu großen Materialvolumens und damit einem Durchbrennen an der Fügestelle vorzubeugen. Nach einer frei wählbaren Zeit schließt sich dann die Abkühlphase an, bei welcher die Steuerspannung und somit auch die Laserleistung auf den Wert Null gesetzt werden.

Die Versuchsschweißungen wurden mit dem Zieldurchgeführt, den Einfluss nachstehender ausgewählter Prozessparameter zu erfassen:

- Versuchsreihe 1 (VR1) → Variation der Pulsleistung (4 unterschiedliche Pulsleistungen)
- Versuchsreihe 2 (VR 2) → Variation der Schweißzeit (4 verschiedene Schweißzeiten)
- Versuchsreihe 3 (VR3) → Anstieg der Steuerspannung (einem Äquivalent der Pulsleistung) (5variierte Anstieg).

Als Referenzproben wurde die Versuchsserie 4 (VR 4) gefertigt, bei der alle Proben ohne Regelung geschweißt wurden.

Die mit dem Laserpunktschweißen realisierten Schweißverbindungen wurden nach folgenden Kriterien ausgewertet:

- Beurteilung des Aussehens der Schweißpunkte hinsichtlich dem Auftreten von Nahteinfall und Schmelzbadauswürfen (durch Sichtprüfung der Ober- und Unterseiten der Proben)
- Bestimmung des Durchmessers der Laserpunkte (mit einem Messprogramm an der Oberseite der Proben)
- Ermittlung des Anbindungsquerschnitts und der Einschweißtiefe (mit Messprogrammen an den Querschliffen der Proben)
- Überprüfung bezüglich Vorliegen von Schweißpunktunregelmäßigkeiten (an den Probenquerschliffen)

Vorgelegt werden im Weiteren die Ergebnisse der Sichtprüfung. Die gemessenen Durchmesser der Schweißpunkte sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3

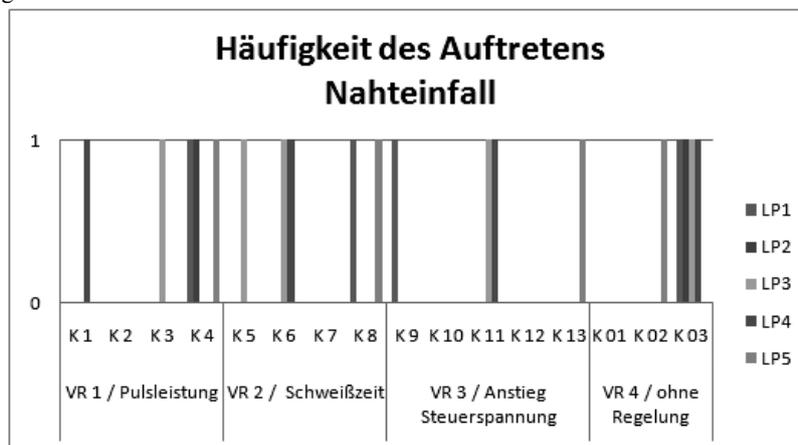
An der Blechoberseite ermittelte Durchmesser (Mittelwerte) der Schweißpunkte

Versuchsreihe 1			Versuchsreihe 2			Versuchsreihe 3		
Probe	\bar{x} [µm]	S [µm]	Probe	\bar{x} [µm]	S [µm]	Probe	\bar{x} [µm]	S [µm]
K 1	639	33,2	K 5	520	24,5	K 9	538	49,5
K 2	644	34,8	K 6	463	27,2	K 10	504	51,9
K 3	604	36,01	K 7	550	29,6	K 11	553	20,2
K 4	518	62,9	K 8	528	52,1	K 12	526	40,4
						K 13	543	29,5
Versuchsreihe 4								
Probe	\bar{x} [µm]	S [µm]						
K 01	574	19,1						
K 02	510	18,3						
K 03	510	30,7						

\bar{x} - Mittelwert, S – Standardabweichung

Wie aus Tabelle 3 hervorgeht, wurden bei durchgeführten Versuchen mit und ohne Regelung relativ identische Schweißpunktdurchmesser erzielt. Ein Einfluss ist hier nicht ableitbar. Auch innerhalb jeder Versuchsserie zeigt sich kein Zusammenhang.

In einem weiteren Schritt wurde von allen Laserpunkten der Nahteinfall erfasst (Bild 7). Diese Erscheinung ist typisch für das Laserstrahlschweißen und als eine Vertiefung in der Probenoberfläche (Eintritt des Laserstrahls) infolge der Materialverdampfung erkennbar.



LP – Laserpunkt Schweißzeit [ms]
Bild 7. Auftreten von Nahteinfall (0: kein Nahteinfall; 1: Nahteinfall vorhanden)

Aus der dargestellten Graphik geht hervor, dass durch die Prozessregelung während des Schweißprozesses bei den Proben der Versuchsreihen 1 und 3 ein deutlich positiver Effekt eingetreten ist. Hier sind durch die Prozessregelung Verbesserungen hinsichtlich der Prozessstabilität erreicht worden, die zu einem geringeren Nahteinfall führten. Weniger eindeutig ist dieser Einfluss bei der Versuchsreihe 3.

Bei den verschiedenen Laserpunktschweißungen ist es teilweise zum Auftreten von Schmelzbadauswürfen gekommen (Bild 8).

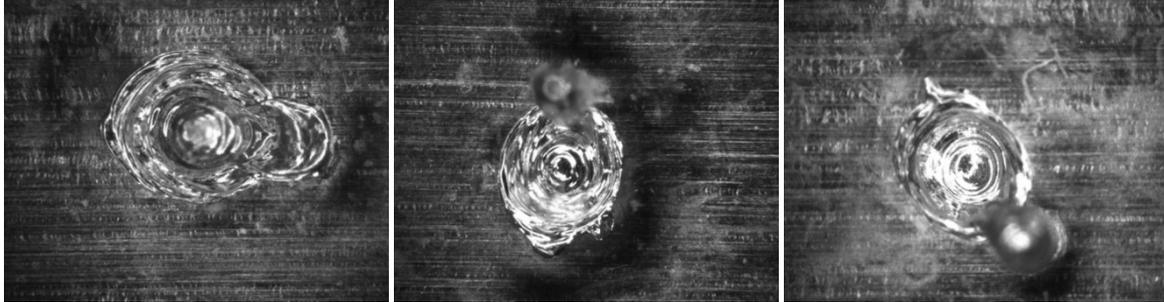


Bild 8. Laserpunktschweißungen mit Schmelzbadauswürfen

Den gravierenden Unterschied in Bezug auf das Auftreten von Schmelzbadauswürfen zwischen Laserpunktschweißungen mit Regelung und ohne Regelung veranschaulicht Bild 9. Es ist erkennbar, dass insbesondere bei den Proben aus den Versuchsreihen 1 und 2 deutlich weniger Schmelzbadauswürfen aufgetreten sind. Bei den Proben der Versuchsreihe 3 war hingegen kein Einfluss der Prozessregelung nachweisbar. Ebenso traten bei Versuchsreihe 4 viele Schmelzbadauswürfe auf. Solche Auswürfe können durch die Beruhigung des Schmelzbades vermieden werden.

In der weiteren Auswertung erfolgt die Bewertung der Laserpunkte auf die noch ausstehenden Kriterien. Für die Ableitung von aussagefähigen Schlussfolgerungen sind dann insbesondere die Zusammenhänge zwischen dem Schweißpunktdurchmesser und Anbindungsquerschnitt sowie der Einschweißtiefe von wesentlicher Bedeutung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Vorgelegt wurden Untersuchungen sowie erste Ergebnisse zur Erhöhung der Prozessstabilität beim Schweißen von Kupfer mit gepulsten Lasern durch die Verwendung einer Regelung zur dynamischen Modulation des Laserpulses. Nach dem Aufbau und der Inbetriebnahme des Versuchsstandes sowie der Entwicklung eines Algorithmus sind erste Laserpunktschweißungen erfolgt, um die Einflüsse ausgewählter relevanter Prozessparameter auf Laserpunktschweißungen zu analysieren. Wie die ersten Ergebnisse zeigen, waren innerhalb einer Versuchsreihe Laserpunkte mit relativ konstanten Punktdurchmessern erreichbar. Bei den Schmelzbadauswürfen war ein positiver Einfluss der Regelung bei Variation der Pulsleistung und Schweißzeit erkennbar.

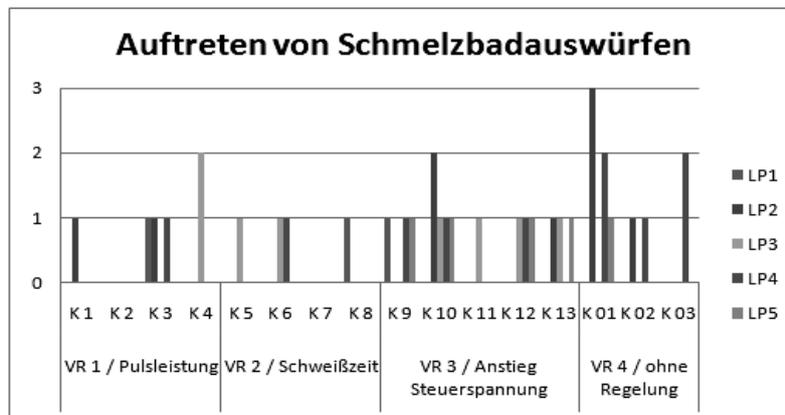


Bild 9. Auftreten von Schmelzbadauswürfen (0: keine Schmelzbadauswürfe; 3: viele Schmelzbadauswürfe)

Inhalte der folgenden Arbeitsschritte sind die weitere Auswertung der ersten Laserpunktschweißungen und in Phase 2 (Schweißphase) der Pulsformung das Schmelzbad über eine Regelung der Plasmafackelintensität bzw. der Prozess Temperatur in der Schmelze bei konstanter Temperatur zu halten. Danach soll die Eignung des Algorithmus für Laserpunktschweißungen von Kupfer mit variierenden Randbedingungen (Material, Geometrie, Materialdicke) erprobt werden.

Schrifttum

- [1] Mundt & Associates, Inc, Scottsdale/Arizona, USA, 2009.
- [2] Laser-Tec GmbH, Emmering, Deutschland, 2010.
- [3] Abnahmeprüfzeugnis 172211, ThyssenKrupp, 2011.
- [4] Amorosi, S.: „Laser micro-spot welding of copper by real-time process monitoring“, EPFL, Lausanne/Switzerland, 2004.
- [5] Vortrag Industriearbeitskreis OPTOMAT - LASAG AG, ILT, 2004, URL: <http://www.optomat.de/Vortrag%20Industriearbeitskreis%20LASAG.pdf>