

Kleiner Laser, große Wirkung

Vorpulsmodul ermöglicht prozesssicheres Schweißen von Kupfer

Das Laserschweißen von Kupfer reduzierte sich aufgrund der hohen Prozessunsicherheit bisher auf nicht automatisierte, manuelle Applikationen und Anwendungen. Mit Hilfe eines neu entwickelten Laser-Vorpulsmoduls konnte nun in Verbindung mit einem etablierten IR-Lasersystem eine 100-prozentige Prozesssicherheit beim Kupferschweißen demonstriert werden. Die zusätzlich eingebrachte Energie des Vorpulses ist dabei um einen Faktor 1000 kleiner als die Energie des eigentlichen Schweißpulses, ermöglicht jedoch definierte Prozessbedingungen. Das neue Verfahren führt weiterhin zu einer signifikanten Verbesserung der Energieeffizienz und des Schweißbilds.

Die steigenden Anforderungen an elektronische und mechanische Baugruppen der Elektro- und Feinwerktechnik erfordern höchste Zuverlässigkeit elektrischer und mechanischer Verbindungen bei gleichzeitig hohen Einsatztemperaturen. Die derzeitigen Anforderungen liegen bspw. bei Temperaturen von einigen hundert Grad und können mit bestehenden Fertigungstechnologien wie dem Lötten oft nicht erreicht werden. Verfahren wie das Widerstandsschweißen bringen hingegen einen großen, teilweise schädigenden Wärmeüberschuss in das Material ein.

Das Laserstrahl-Punktschweißen zeichnet sich durch einen räumlich sehr begrenzten Wärmeeintrag und eine hohe Flexibilität aus. Die Vorteile lasergeschweißter Verbindungen liegen vor allem in der hohen Temperaturbeständigkeit und der mechanischen Belastbarkeit. Diese Eigenschaften werden vermehrt in der Automobil- und Sensorindustrie gefordert, da Sensoren, Aktuatoren und Elektronikbaugruppen in die Bereiche der zu messenden Signale verlegt, oder in die steuernden Mechaniken integriert werden und somit hohen Temperaturen und

DIE AUTOREN

MAIK FREDE

Dr. rer. nat. Maik Frede hat nach seinem Studium der Physikalischen Technik seine Promotion an der Fakultät für Mathematik und Physik in Hannover abgelegt. Bereits während der Promotion leitete er die Gruppe Solid State Photonics am Laser Zentrum Hannover. In seinem Fachgebiet entwickelte er neben Lasersystemen für die Gravitationswellendetektion Systeme für den Weltraumeinsatz oder industrielle Hochleistungslaser. Im Jahr 2007 gründete er die neoLASE GmbH, bei der er seitdem geschäftsführend tätig ist und seine Fachkenntnisse im Bereich Festkörperlaser erfolgreich einbringt.



Dr. rer. nat. Maik Frede
neoLASE GmbH
Hollerithallee 8
30419 Hannover
Tel.: +49 (0)511 2788 515
E-Mail: mf@neolase.com
Website: www.neolase.com

ANAS MOALEM

Nach seinem Studium des Maschinenbaus an der RWTH Aachen entwickelt Dipl.-Ing. Anas Moalem seit 2006 am Laser Zentrum Hannover Prozesse und Systemkomponenten im Bereich Laser-Mikroschweißen. In der Abteilung Produktions- und Systemtechnik legt er Wert auf anwendungsorientierte Forschung und kundenorientierte Lösungen. In Zusammenarbeit mit der Gruppe Space Technologies ist er seit 2008 an der Konstruktion und Entwicklung von Raumfahrtssystemen beteiligt. Ebenfalls seit 2008 koordiniert er die Aktivitäten des LZH im Bereich Mikroschweißen.



Dipl.-Ing. Anas Moalem
Laser Zentrum Hannover e.V.
Hollerithallee 8
30419 Hannover
Tel.: +49 (0)511 2788 281
E-Mail: a.moalem@lzh.de
Website: www.lzh.de

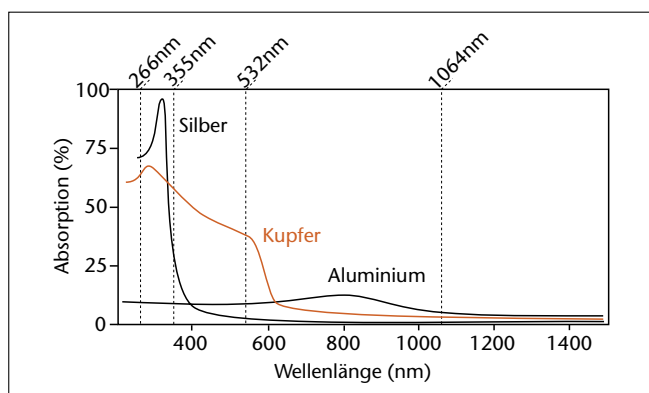


ABBILDUNG 1: Absorptionsspektrum verschiedener Metalle [3].

aggressiven Medien ausgesetzt sind [1]. Als Werkstoffe kommen in der Elektronik und Feinwerktechnik vor allem Kupferlegierungen sowie hoch legierte Stähle und Edel- und Buntmetalle zum Einsatz. Das

Laserstrahl-Mikroschweißen dieser, teilweise hoch reflektierenden Werkstoffe, zeigt mit bisherigen Anlagen eine hohe Varianz der Schweißergebnisse und damit verbunden, eine geringe Prozesssicherheit [2].

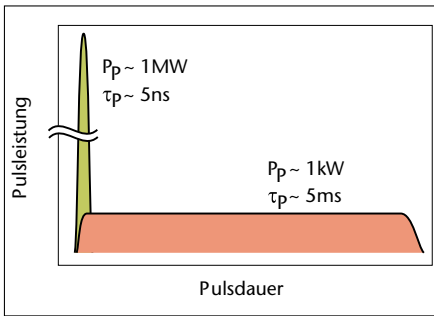


ABBILDUNG 2: Kombination des frequenzkonvertierten Vorpulses ($\lambda = 532 \text{ nm}$ oder 355 nm) mit IR Schweißpuls ($\lambda = 1064 \text{ nm}$).

Bei Metallen steigt im Allgemeinen die Absorption der Laserstrahlung mit abnehmender Wellenlänge der Bestrahlung drastisch an (siehe Abb. 1). Für Kupfer beträgt die Absorption von konventioneller Nd:YAG Laserstrahlung (1064 nm) lediglich ca. 4 %, wohingegen im sichtbaren Spektralbereich eine deutlich höhere Absorption vorliegt. So wird z.B. Strahlung der zweiten Harmonischen (532 nm) mit ca. 40 % und Strahlung der dritten Harmonischen mit ca. 60 % absorbiert (Abb. 1). Dies bedeutet, dass für die Strahlung frequenzkonvertierter Laser eine zehnfach größere Absorption vorliegt. Eine wesentliche Verbesserung der Prozesssicherheit beim Schweißen von Kupfer mit einem frequenzverdoppelten Laser konnte bereits nachgewiesen werden [3].

Speziell bei Kupfer wirkt sich weiterhin ein sprunghafter Anstieg der Absorption [5] bei Erreichen der Schmelztemperatur negativ auf die Kontrollierbarkeit der Schweißqualität aus. Zur Erhöhung der Prozesssicherheit und der Qualität der Schweißverbindungen werden derzeit Ansätze wie beispielsweise

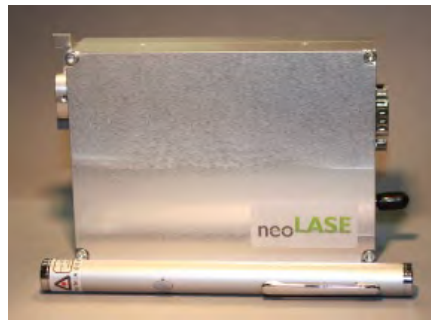


ABBILDUNG 3: OEM-Prototyp des entwickelten Vorpulsmoduls mit einer Ausgangsenergie von mehr als 2 mJ (grün) und einer Pulsdauer von einigen Nanosekunden (Außenmaße ca. $130 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$).

Pulsformung, Echtzeitleistungsregelung oder der Einsatz von frequenzkonvertierten Lasern verfolgt. Die Verwendung von frequenzkonvertierten Lasern ist auf Grund der deutlich erhöhten Absorption der vielversprechendste Ansatz. Problematisch ist jedoch die Bereitstellung von Lasersystemen bei diesen Wellenlängen mit den derzeit zum Schweißen verwendeten Parametern, wie Pulsenergien im Bereich einiger Joule und Pulsdauern von einigen Millisekunden.

Konventionelle, frequenzkonvertierte Festkörperlaser finden auf Grund ihrer kurzen und intensiven Nanosekunden-Laserpulse eher Anwendung bei Abtragprozessen und sind somit nicht für das Schweißen geeignet. Eine Frequenzkonvertierung der bereits bestehenden, herkömmlichen Schweißlaser ist zwar möglich, jedoch aufgrund der geringen Pulsspitzenleistung äußerst ineffizient und für eine akzeptable Konversionseffizienz mit hohem technologischen Aufwand verbunden.

Ein neuer Ansatz wird derzeit im Rahmen des vom BMBF geförderten und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreuten KMU-innovativ Projektes „Supreme“ entwickelt. Bei diesem Ansatz wird die Nutzung der größeren Absorption eines grünen, kurzgepulsten Lasers ausgenutzt, um eine Vorkonditionierung und gleichmäßige Initiierung des Schweißprozesses zu erreichen.

Das hierzu entwickelte Lasermodul stellt einen frequenzkonvertierten Vorpuls mit einer Pulsdauer von einigen Nanosekunden, einer Pulsspitzenleistung bis ca. 1 MW und einer exzellenten Strahlqualität zur Verfügung, der mit dem eigentlichen, infraroten Schweißlaserstrahl räumlich und zeitlich überlagert wird (siehe Abb. 2).

Mit diesem Konzept kann erreicht werden, dass die Absorption der Laserstrahlung an der Oberfläche der zu schweißenden Fügepartner vor Einsetzen der Materialschmelze erheblich gesteigert und eine effektive Einkopplung der Schweißlaserstrahlung ermöglicht wird. Die eigentliche, energiereiche Schweißlaserstrahlung kann durch etablierte und in einem großen Leistungsbereich verfügbare IR-Strahlquellen geliefert und durch Variation von Pulsdauer und Pulsleistung wohl dosiert eingebracht werden. Der vorgestellte Ansatz kombiniert somit die Vorteile zweier grundlegend unterschiedlicher Lasersysteme. Schon im Einsatz befindliche infrarote Schweißlaser können durch das kompakte und kostengünstige Vorpulsmodul einfach erweitert werden.

Für die Realisierung des Vorpulsmoduls, wurde ein endgepumpter, passiv gütgeschalteter Festkörperlaser mit anschließender Frequenzkonversion entwickelt (Abb. 3).

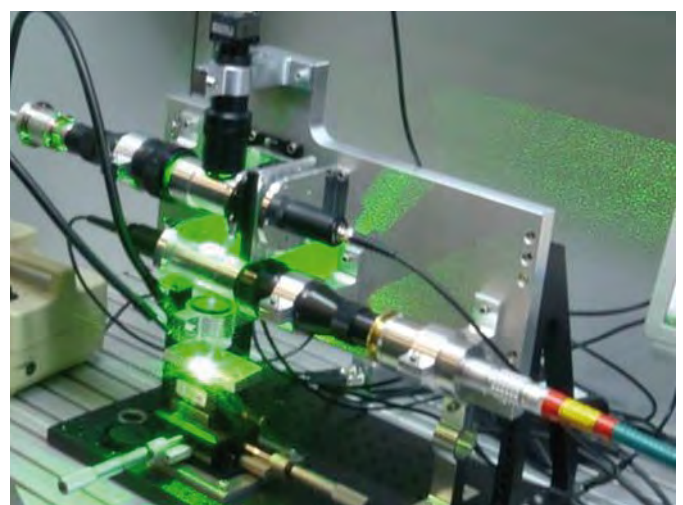
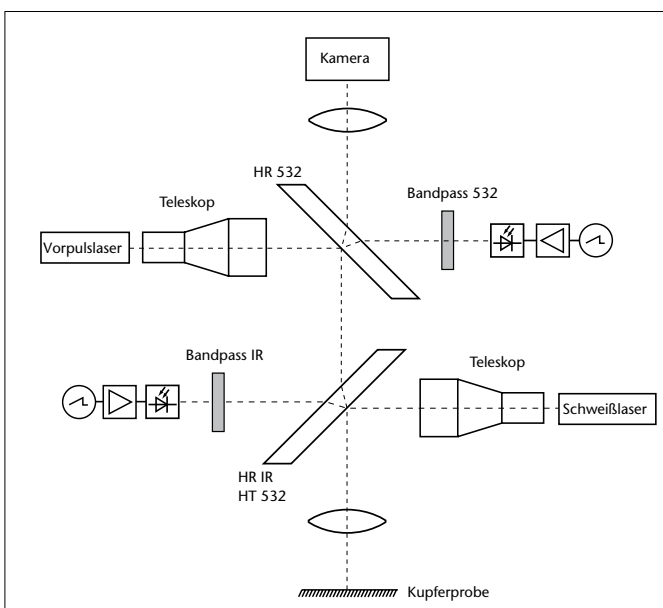


ABBILDUNG 4: Schema und Foto des Versuchsaufbaus für die räumliche und zeitliche Kombination zweier Strahlquellen beim Schweißen mit Vorpuls.

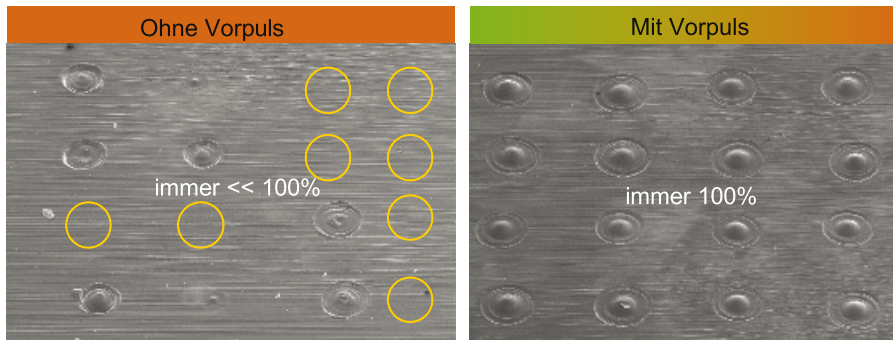


ABBILDUNG 5: REM-Aufnahmen von Punktschweißungen auf Kupfer mit konstanten Laserparametern (Infrarotlaser mit $\lambda_{IR} = 1064 \text{ nm}$, $E_{IR} = 2,4 \text{ J}$, $\tau_{IR} = 2 \text{ ms}$). a) Nur IR-Laser (traditioneller Ansatz), b) wie a) jedoch mit Vorpuls.

Das verwendete Lasermedium Nd:YLF, ermöglicht aufgrund seiner im Vergleich zu Nd:YAG längeren Fluoreszenzlebensdauer eine größere Speicherung von Energie und den Einsatz von Pumplaserdioden mit geringerer Pulsspitzenleistung. Die verwendete, fasergekoppelte Laserdiode wird gepulst betrieben und ist durch die Faserkopplung räumlich vom Lasermodul getrennt. Diese Eigenschaften ermöglichen einen kompakten Aufbau und vereinfachen die Integration des Vorpulsmoduls. Mit einer Pulsdauer von einigen Nanosekunden und einer Pulsenergie von bis zu 5 mJ im infraroten Wellenlängenbereich, kann eine effiziente, externe Frequenzkonversion realisiert werden. Der erste OEM-Prototyp dieses Lasers wurde mit einem quasi monolithischen, robusten mechanischen Design aufgebaut und wird derzeit in verschiedenen Anlagen getestet.

Für die experimentellen Untersuchungen zum Kupferschweißen wurde das ent-

wickelte Vorpulsmodul mit einem typischen Schweißlaser (Lasag SLS CL16) kombiniert. Zur räumlichen Überlagerung der beiden Laser wurde ein experimenteller Aufbau entwickelt (Abb. 4).

Der Aufbau verfügt über zwei dichroitische Spiegel und ermöglicht so die koaxiale Anordnung der beiden Laserstrahlachsen und der Beobachtungsachse einer Kamera. Diverse optische und mechanische Bauteile bieten umfangreiche Justage- und Einstellmöglichkeiten. Für eine industrielle Anwendung kann dieser Aufbau in einen kompakten Bearbeitungskopf überführt werden.

Um die Ausgangssituation zu dokumentieren und die Ergebnisse des neuen Verfahrens besser vergleichen zu können, wurden mit dem dargestellten Versuchsaufbau Schweißversuche mit und ohne Vorpuls durchgeführt. Als Versuchsmaterial wurde Kupfer-Bandmaterial (E-Cu) der Dicke 80 μm und der Breite 2 mm verwendet. Bereits während der ersten Experimente wurde deutlich, dass die bekannten Probleme beim konventionellen Laserschweißen von Kupfer mit IR-Strahlung allein durch den Vorpuls drastisch reduziert werden. In Abb. 5 sind Schweißpunkte dargestellt, die ohne und mit Vorpuls und bei ansonsten gleich bleibenden Versuchsparametern erzeugt wurden. Es ist deutlich zu erkennen, dass ohne Vorpuls nur jeder zweite Puls zu einer Schweißung führt und dass die Schweißungen zudem sehr unregelmäßig ausfallen. Die Ergebnisse mit Vorplus zeigen hingegen bei 200 Wiederholungen eine 100-prozentige Schweißwahrscheinlichkeit und ein gleichmäßiges Schweißbild.

Beim konventionellen Laserschweißen steigt im Allgemeinen die Prozessstabilität mit zunehmender Pulsspitzenleistung des Schweißlasers. Zur Ermittlung des Prozessfensters wurden daher die Pulsspitzenleistung und Pulsdauer des Schweißlasers variiert und die Ergebnisse in Abb. 6 dar-

gestellt. Die Farbskala entspricht hierbei der Schweißwahrscheinlichkeit S , also der Anzahl erfolgreicher Schweißungen bezogen auf die Anzahl der Wiederholungen (jeweils 200). Die Ergebnisse bestätigen die ersten Beobachtungen, dass ohne Vorpuls keine der gewählten Parameter eine 100-prozentige Schweißwahrscheinlichkeit ermöglicht. Hinzu kommt, dass es im gesamten Parameterbereich unvorhersehbar zu signifikanten Schmelzauswürfen kommt, also der Schweißprozess teilweise in einen Bohrprozess übergeht. Für die Experimente mit Vorpuls ergibt sich hingegen eine hohe Variationsbreite von Pulsdauer und Pulsspitzenleistung und somit ein großes Prozessfenster, bei dem eine 100-prozentige Schweißwahrscheinlichkeit demonstriert wurde. Auch das völlige Ausbleiben von Bohrungen ist ein Hinweis auf die gute Dosierbarkeit der eingekoppelten Schweißenergie bei Einsatz eines Vorpulses.

Zur weiteren Quantifizierung der Schweißergebnisse wurden im jeweiligen Prozessfenster die Schweißpunktdurchmesser in Abhängigkeit der Pulsspitzenleistung und der Pulsdauer ausgewertet. Abbildung 7 zeigt die mittleren Schweißpunktdurchmesser und die Standardabweichungen, basierend auf 60 Wiederholungen. Die Vor-

DIE FIRMA

neoLASE GmbH
Hannover

Die neoLASE GmbH gründete sich 2007 als Spin-Off aus der Abteilung Laserentwicklung des Laser Zentrums Hannover. Das aus Wissenschaftlern und Technikern bestehende Team der neoLASE kann auf eine mehrjährige Erfahrung im Bereich diodengepumpter Festkörperlaser zurückgreifen. Diese Erfahrung ermöglicht neoLASE eine produktnahe Entwicklung und Produktion kundenspezifischer Lasersystemen aber auch die Durchführung von grundlegenden Forschungsprojekten zur Entwicklung neuartiger Laserstrahlquellen.

www.neolase.com

DAS INSTITUT

Laser Zentrum Hannover e.V.
Hannover

Am 20. Juni 1986 konstituierte sich das Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH) unter der Schirmherrschaft des Ministeriums für Wirtschaft, Technologie und Verkehr des Landes Niedersachsen in der Rechtsform eines eingetragenen Vereins. Aufgabe des Vereins ist die selbstlose Förderung der angewandten Forschung auf dem Gebiet der Lasertechnologie. Zu diesem Zweck übernimmt das LZH:

- Forschungs- und Entwicklungsvorhaben in den Bereichen Laserentwicklung und Laseranwendung
- Technische und wissenschaftliche Beratungen mit dem Ziel, Forschung und Praxis zusammenzuführen
- Industriennahe Ausbildung von Fachkräften für die Entwicklung, Anwendung und Bedienung von Lasersystemen

www.lzh.de

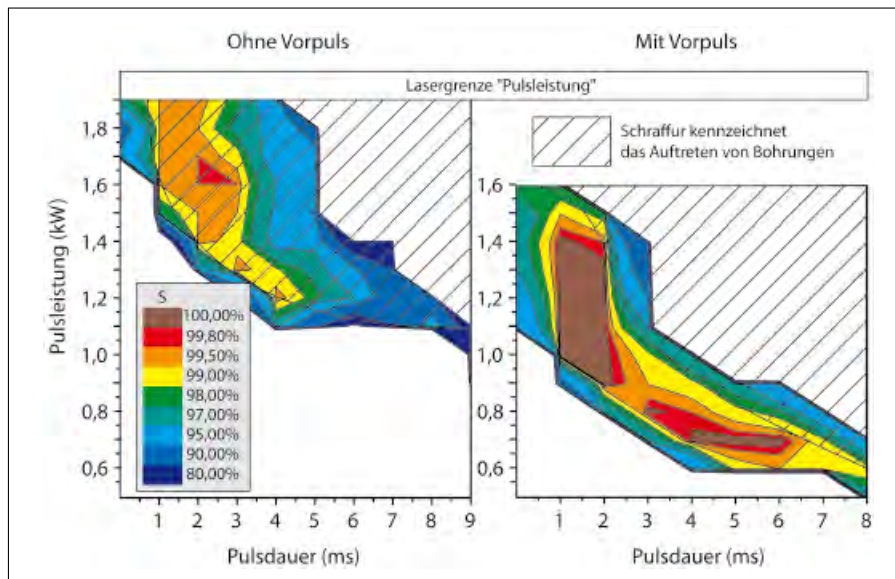


ABBILDUNG 6: Schweißwahrscheinlichkeit *S* für das Kupferschweißen mit und ohne Vorpuls bei Variation der Pulsdauer und Pulsleistung.

pulsparameter blieben hierbei unverändert. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Vorpulsmodul kleinere Standardabweichungen des Schweißpunktdurchmessers als ohne Vorpulsmodul erzeugt wurden. Gleichzeitig fällt auf, dass für einen identischen Durchmesser mit Vorpulsmodul eine deutlich kleinere Pulsspitzenleistung benötigt wird. Die durch das Vorpulsmodul erreichte, hohe Schweißwahrscheinlichkeit geht demnach einher mit einer Reduzierung der Gesamtenergie und der Varianz.

Die Reduzierung der Gesamtenergie lässt sich über die geringere Pulsspitzenleistung des Schweißlasers bestimmen. Die Leistungsersparnis *PS* im kombinierten Betrieb mit dem Vorpulsmodul als Funktion des zu erzielenden Schweißpunktdurchmessers *D* ergibt sich zu

$$PS(D) = 1 - \frac{P_{PIR}(D)}{P_{IR}(D)}$$

Im Wesentlichen wird für einen bestimmten zu erzielenden Schweißpunktdurch-

messer *D* das Verhältnis aus erforderlicher Pulsspitzenleistung mit Vorpuls $P_{PIR}(D)$ und ohne Vorpuls $P_{IR}(D)$ gebildet. Für die Funktionen $P_{PIR}(D)$ und $P_{IR}(D)$ werden die Funktionsapproximationen aus Abb. 7 herangezogen. Die Berechnungen (Abb. 8) zeigen eine signifikante Reduzierung der notwendigen Pulsspitzenleistung beim Einsatz des Vorpulsmoduls. Für einen großen Bereich zu erzielender Schweißpunktdurchmesser wird eine Leistungsersparnis von 30 bis 40 Prozent erreicht. Der Leistungsaufwand des Vorpulsmoduls ist hierbei vernachlässigbar, da für jeden Schweißpuls mit Pulsenergien im einstelligen Joule-Bereich lediglich ein Vorpuls im einstelligen Millijoule-Bereich eingebracht wird. Unter Berücksichtigung der elektrischen Effizienz von Schweißlasern kann durch Verwendung des Vorpulsmoduls durchaus elektrische Energie im Kilowattstundenbereich eingespart werden.

Zusammenfassend können beim Vergleich der Ergebnisse die folgenden Beob-

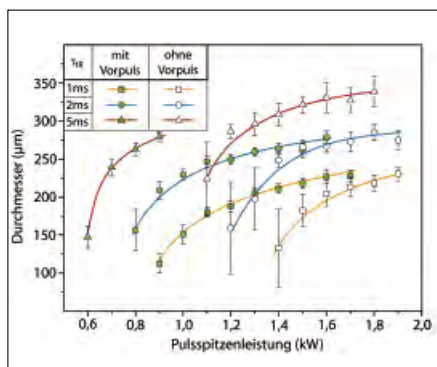


ABBILDUNG 7: Schweißpunktdurchmesser mit und ohne Vorpuls und unterschiedlicher Pulsspitzenleistung.

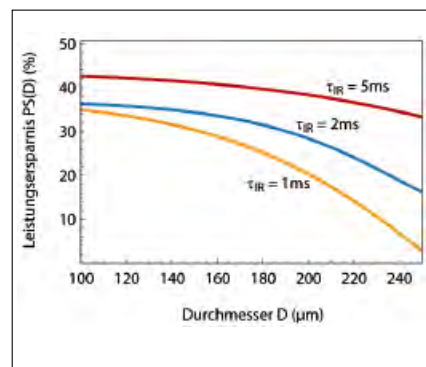


ABBILDUNG 8: Leistungsersparnis *PS(D)* als Funktion des Schweißpunktdurchmessers *D* für verschiedene Pulsdauern.

achtungen für den Einsatz des Vorpulsmoduls beim Kupferschweißen festgehalten werden:

- Die Schweißwahrscheinlichkeit beim Kupferschweißen konnte auf 100 Prozent gesteigert werden.
- Das Prozessfenster für Kupferschweißungen wurde deutlich erweitert.
- Die Präzision und Qualität der Schweißung konnte erheblich verbessert werden.
- Bei gegebenem Schweißpunktdurchmesser wird eine Leistungsersparnis von bis zu 40% erreicht.

Die Entwicklung des Vorpulsmoduls und experimentellen Untersuchungen wurden im Rahmen des vom BMBF geförderten und vom PTKA betreuten KMU-innovativ Projektes „Supreme“, durchgeführt.

Referenzen

[1] W. Neher: „Beanspruchungen von Steuergeräten im Fahrzeug“ in Innovative Produktionsprozesse für die Hochtemperatur-Elektronik am Beispiel der Kfz-Elektroniksysteme, 151 (2005)

[2] N. Tiesler, C. Pletzenauer: „Anforderungen der modernen Großserie an das Laserstrahl-Schweißen“ in Laser in der Elektronikproduktion und Feinwerktechnik LEF, 133 (2005)

[3] O. Suttmann, A. Moalem, R. Kling, A. Ostendorf: „Drilling, Cutting, Welding, Marking and Microforming“ in K. Sugioka u.a. (Hrsg.): Laser Precision Microfabrication, Springer, Berlin, 311 (2010)

[4] F. Otte, A. Ostendorf, U. Stute, T. Stehr: „Micro Welding of Electronic Components with 532 nm Laser Radiation“. in Proc. of SPIE 6458, 645804-1 (2007)

[5] A. Blom, P. Dunias, P. van Engen, W. Hoving, J. de Kramer: „Process spread reduction of laser microspot welding of thin copper parts using real-time control“, in Proc. SPIE 4977, 493 (2003)