

Laserstrahlmikroschweißen mit Faserlasern und innovativen Verfahrenskonzepten

Arnold Gillner, Kilian Klages, Jens Gedicke

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Aachen

Das Mikroschweißen mit Laserstrahlung ist in Elektronik und Feinwerktechnik eine seit langem eingeführte Technologie, bei der in der Regel lampengepumpte gepulste Festkörperlaser zum Einsatz kommen. Neuere Entwicklungen im Bereich der Strahlquellen mit Pulsdauern bis zu 100 ms und leistungsstarken Faserlasern ermöglichen in der Verfahrenstechnik innovative Ansätze, die zu deutlichen Steigerungen von Reproduzierbarkeit und Qualität der Fügeverbindung führen. So lassen sich mit Faserlasern und neuen Verfahrensvarianten, wie dem SHADOW-Verfahren, die qualitativen Vorteile von cw-Schweißungen nutzen und gleichzeitig die Energie und damit die thermomechanische Belastung für die Bauteile reduzieren.

1 Einleitung

Miniaturisierte und hochintegrierte Bauelemente mit besonderen Anforderungen an thermische Belastung und Bauteilbeeinflussung erfordern innovative Fügeverfahren, die den Anforderungen an kurze Taktzeiten und minimaler Fügegeometrie gerecht werden. Hinzu kommt ein steigender Materialmix, dem mit klassischen Füge-technologien nicht mehr begegnet werden kann. Die Laser-Mikrofügetechnik bietet hier mit neuen kompakten Strahlquellen, z.B. Faserlasern und innovativen Prozessvarianten Lösungen, mit denen artungleiche Werkstoffkombinationen mit einem Minimum an Energieeintrag bei kurze Fügezeiten im ms-Bereich erzeugt werden können. Schmelzefreie Prozessvarianten, wie das Laserbonden ermöglichen hier sogar die Verbindung von Glas und Glas/Silizium-Komponenten ohne sichtbare Fügezone.

2 Schweißen mit Laserstrahlung – Mikroverbindungen im Millisekundentakt

Vor dem Hintergrund steigender Miniaturisierungstendenzen und höheren Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit von elektrischen und mechanischen Mikroverbindungen hat die Laserschweißtechnik kontinuierlich Anwendungssegmente erobert, so dass sie heute aus der Fertigung mikrotechnischer Bauteile und Baugruppen nicht mehr wegzudenken ist. Auslöser hierfür sind zum einen die stetig steigenden Produkt-Anforderungen hinsichtlich Miniaturisierung und zum anderen die Verfügbarkeit von Verfahren und Strahlquellen, die sowohl den technischen Anforderungen einer Großserienfertigung als auch dem Kostendruck einer Massenfertigung gerecht werden. Vor allem der Bedarf nach Füge-techniken, die eine geringe Bauteilbeeinflussung und eine hohe Automatisierbarkeit mit geringem Wartungsaufwand mit sich bringen, hat die Laserfügetechnik zu einem wichtigen Werkzeug in der mikrotechnischen Produktion werden lassen. Dabei steht neben dem Laserstrahl-löten, das aufgrund der Leistungsfähigkeit alternativer

Löttechniken nach wie vor nur eine Nischenanwendung ist, vor allem das Laserschweißen im Mittelpunkt des industriellen Interesses.

Das Laserstrahlmikroschweißen kommt generell immer dann zum Einsatz, wenn besondere Anforderungen an die Beeinflussung der Bauteilgeometrie bzw. die Fügezeit gestellt werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn die thermische Belastung des Bauteils besonders niedrig gehalten werden muss, wie z.B. bei feinmechanischen Bauteilen der Sensorik und Optoelektronik. In vielen Fällen kommt die kurze Fügezeit von wenigen ms als Argument und Auswahlkriterium für das Laserfügen in Frage. Durch das berührungsfreie Verfahren ergibt sich, abgesehen von der in einigen Fällen notwendigen Spanntechnik, eine hohe Qualität der Fügeverbindung, da z.B. bei klassischen Mikrowiderstandsschweißverfahren auftretende Verschmutzungen nicht auf das Bauteil übertragen werden. Darüber hinaus unterliegt das Werkzeug Laser keiner Abnutzung, so dass auch bei hohen Taktraten mit gleich bleibender Fügequalität gerechnet werden kann.

In der industriellen Anwendung werden für das Laserstrahl-Mikroschweißen die beiden Verfahrensvarianten Punktschweißen und Linienschweißen angewendet. Das Punktschweißen findet vor allem in Elektrotechnik für Kontaktierungen Anwendung, während das Linienschweißen für den Aufbau von Komponenten und die Verbindung flächiger Bauteile verwendet wird. Bisher wurden Liniennähte z. B. zum Verschluss von Gehäusen oder zur Anbindung von Wellen an Zahnrädern mittels Pulsüberlappnähten hergestellt. Bei diesem Verfahren werden einzelne Laserpulse mit Pulsdauern von 1-5 ms überlappend entlang der Naht geführt. Dadurch entstehen starke Temperaturgradienten und durch die wiederholte Ableitung der eingebrachten Energie zwischen den Laserpulsen wird das Bauteil übermäßig aufgeheizt mit der Folge eines erhöhten Verzuges.

Neue Entwicklungen in der Strahlquellentechnik, die bei hohen Strahlqualitäten gleichzeitig lange Pulsdauern bis hin zu cw-Strahlquellen und eine flexible Steuerung der Pulsleistung ermöglichen, eröffnen Verfahrensprinzipien, die den Anforderungen nach Geschwindigkeit, Sauberkeit und Robustheit des Laserstrahlmikroschweißen entgegenkommen. Neben den reinen cw-Lasern, wie z.B. Scheiben- oder Faserlasern ermöglichen neuartige gepulste Strahlquellen das Mikroschweißen mit kontinuierlicher Bestrahlung, die gegenüber der gepulsten Beaufschlagung deutlich höhere Nahtqualitäten erlauben. Mit dem sog. SHADOW®-Schweißen können z.B. mit konventionellen lampengepumpten Nd:YAG-Lasern bei Pulsdauern bis zu 100 ms quasi-kontinuierliche Schweißnähte erzeugt werden. Dabei wird innerhalb eines einzigen Laserpulses beim Fügen von Klein- und Mikrobauanteilen die gesamte Laserschweißnaht erzeugt. Am Bauteil entsteht eine Schweißnaht, wie sie aus dem Schweißen mit cw-Lasern bekannt ist, allerdings mit deutlich geringeren Investitionskosten, da die Laserleistung nur für die Zeitdauer der Schweißung zur Verfügung gestellt werden muss und dies mit gepulsten Festkörperlasern erreicht werden kann. Im Vergleich zu Pulsnähten wird für die SHADOW®-Nähte in vielen Fällen nur ca. 1/10 der Laserenergie benötigt. Dadurch wird der Verzug der Bauteile reduziert und eventuelle Nacharbeiten vermieden. Vorteilhaft bei diesem Verfahren ist darüber hinaus, dass aufgrund der kontinuierlichen Verfahrensführung das Bauteil in der Fügezone nicht wiederholt aufgeschmolzen wird. Dadurch kann die Oberflächenqualität auch bei sonst schwer schweißbaren Werkstoffen drastisch gesteigert werden. Spritzer und Schmelzauswürfe, wie sie bei Pulsschweißungen häufig auftreten, lassen sich auf diese Weise weitgehend vermeiden.

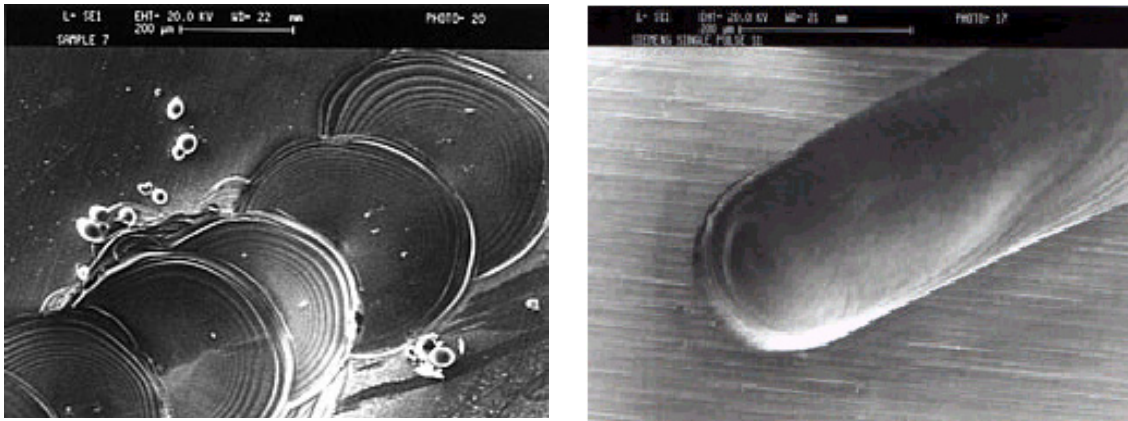


Bild 1: Vergleich der Oberflächenqualitäten einer gepulsten Lasernaht (links) und einer SHADOW-Naht

Das SHADOW®-Verfahren ist insbesondere für kontinuierliche Nähte bis zu einer Schweißnahtlänge von bis zu ca. 20 mm geeignet und ermöglicht gegenüber dem konventionellen Pulsschweißen eine drastische Verkürzung der Prozesszeit um mindestens 1 Größenordnung bei gleichzeitiger Reduzierung der eingebrachten Energie. Die Folge ist einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und eine Verringerung des Bauteilverzugs. Neben diesen wirtschaftlichen Vorteilen lassen sich mit dem SHADOW-Verfahren auch besondere technologische Vorteile gegenüber dem klassischen Pulsschweißen erzielen.

So kann vor allem beim Punktschweißen von Kupfer eine deutliche Erhöhung der Schweißnahtqualität und eine Erhöhung der Reproduzierbarkeit erreicht werden, wenn mittels des SHADOW-Verfahrens eine Mikro-Ringschweißung erzeugt wird. Dadurch können Schweißfehler reduziert und die Festigkeit der Verbindung erhöht werden. In **Bild 2** ist im Vergleich eine klassische Überlappverbindung an Kupfer mittels eines „normalen“ Laserpunktschweißung einer SHADOW-Mikroringschweißung gegenübergestellt. Bei der klassischen Verfahrenstechnik mit stehendem Laserstrahl treten in ungünstigen Fällen Schweißfehlern auf, die sich in Lunkern und einem Nahteinfall äußern. Demgegenüber zeigt die Mikroringschweißung bei gleichzeitig größerer Einschweißtiefe keine Schweißfehler und eine glattere Oberfläche. Der einzustellende Kreisdurchmesser sollte dabei in der Größenordnung des doppelten Laserstrahlfokus liegen, um ein kontinuierliches Schweißbad zu erzielen.

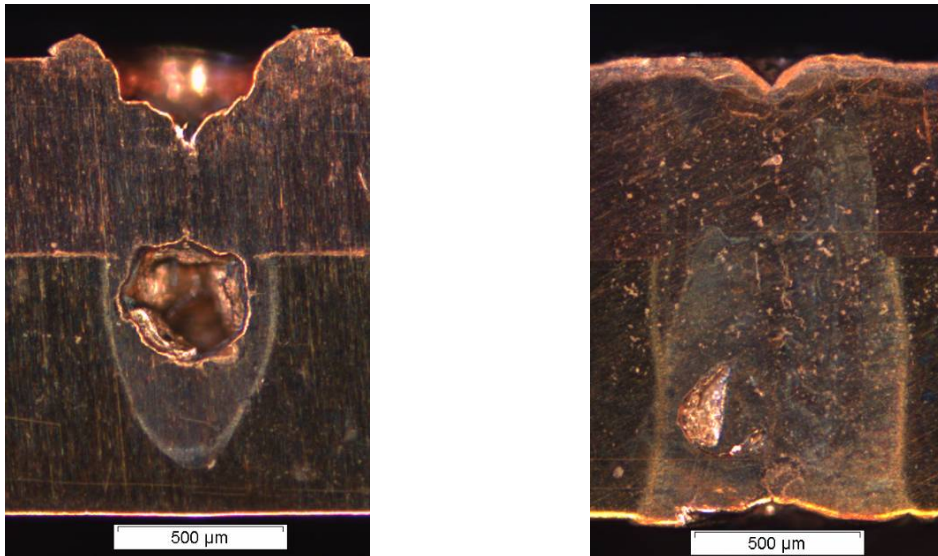


Bild 2: links: Kupfer-Überlappverbindung (1.4 mm), Pulsschweißung 1.5 kW, 14 ms
rechts: Kupfer-Überlappverbindung (1.4 mm), SHADOW-Mikroringschweißung
2.4 kW, 14 ms, 300 µm Ringdurchmesser

Neben der Erhöhung der Schweißnahtqualität birgt das Mikroringschweißen gegenüber dem klassischen Punktschweißen mit stehendem Strahl vor allem bei Kupferwerkstoffen auch deutliche Vorteile hinsichtlich einer reproduzierbaren Einschweißtiefe. Bedingt durch variierende Einkoppelverhältnisse aufgrund von Oxidation ergeben sich bei klassischen Punktschweißungen bei gleicher Pulsdauer deutliche Unterschiede in der Einschweißtiefe. Da beim SHADOW-Schweißen, wie auch beim Schweißen mit Faserlasern sehr hohe Intensitäten bei gleichzeitig schnell bewegtem Strahl verwendet werden, ergibt sich eine sofortige Einkopplung des Laserstrahls und die Ausbildung einer Dampfkapillare unabhängig vom Werkstoffzustand. Die Einschweißtiefe kann dann lediglich über eine Variation der Laserleistung sehr exakt eingestellt werden. In **Bild 3** ist eine Serie von Einschweißungen in Kupfer nach dem SHADOW-Verfahren mit unterschiedlicher Laserleistung bei sonst gleichen Bedingungen dargestellt.

Voraussetzung für die Verfahrensführung nach dem SHADOW-Prinzip ist eine hohe Strahlqualität der verwendeten Strahlquellen. Da zur Aufrechterhaltung konstanter Bedingungen die Laserstrahlung bei lampengepumpten gepulsten Lasern möglichst in einer Glasfaser geführt werden sollte, sind Faserdurchmesser von 0.2 mm bei einer numerischen Apertur von 0,11 anzustreben. Hiermit werden bei Brennweiten von 100 - 150 mm genügend hohe Intensitäten erzielt, um einen Tiefschweißeffekt mit schmalen Keyhole zu erzielen. Mittels eines Galvanometerscanners, wie er üblicherweise für Laserbeschriftungen eingesetzt wird, lassen sich damit beliebige Fügenähte bei Schweißgeschwindigkeiten je nach Werkstoff und Bauteilgeometrie bis zu 1 m/s erzeugen. Für einfache Geometrien, wie z.B. Ringnähte kann eine spezielle Rotations-Optik verwendet werden, die als Zusatz zu einer konventionellen Optik bei sonst gleichen maschinentechnischen Voraussetzungen eingesetzt werden kann.

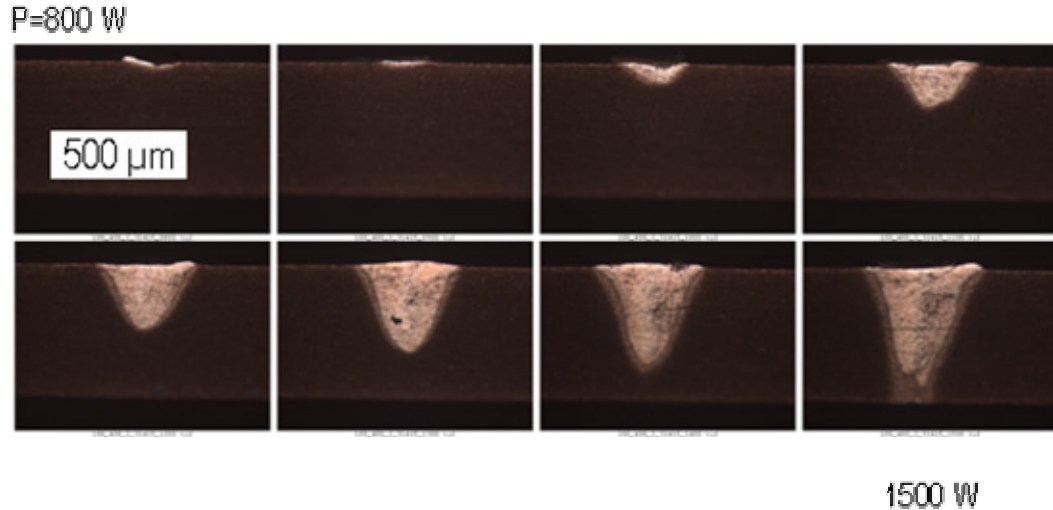


Bild 3: Mikroringschweißungen nach dem SHADOW-Verfahren
 CuNi3Si1Mg, $h=500\ \mu\text{m}$, $r=100\ \mu\text{m}$, $v=400\ \text{mm/s}$, $t_H=3,2\ \text{ms}$, $d_0=180\ \mu\text{m}$

Mit dem Mikro-cw-Schweißen nach dem SHADOW-Verfahren bzw. mit Faserlasern können nicht nur Reproduzierbarkeit von Einschweißtiefe und Schweißnahtqualität erhöht werden. Im Gegensatz zum Punktschweißen ergibt sich eine Verfahrensführung mit veränderter Schmelzbadströmung, die auch metallurgische Vorteile mit sich bringt. Durch die Ausbildung eines Mikro-Keyholes mit hohen thermischen und Oberflächenspannungsgradienten erfolgt die wesentliche Schmelzbadströmung parallel zur Vorschubrichtung. Die senkrechten Komponenten sind im Gegensatz zum Punktschweißen nur sehr gering. Aufgrund der damit verbundenen schwachen Durchmischung der Fügepartner bei einem Überlapstoß lassen sich mit diesem Verfahren artungleiche Werkstoffkombinationen wie Stahl und Kupfer, Stahl-Bronze, Aluminium-Kupfer und andere verschweißen. Intermetallische Phasen, die bei starker Durchmischung entstehen und eine hohe Sprödigkeit aufweisen, können hier weitgehend vermieden werden.

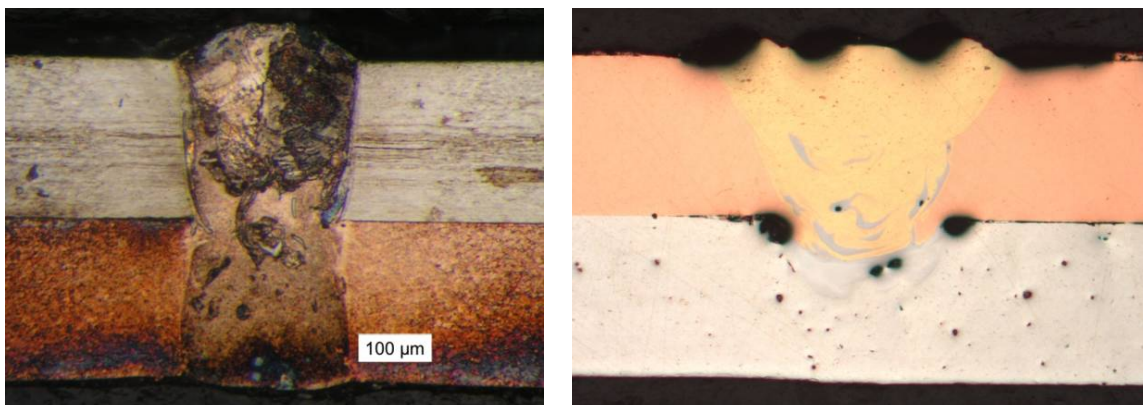


Bild 4: Überlappverbindung, geschweißt mit dem SHADOW-Verfahren, links die Werkstoffkombination Kupfer-Stahl, rechts die Werkstoffkombination Kupfer-Aluminium

Mit dem beschriebenen SHADOW-Verfahren lassen sich im Vergleich zum konventionellen Punktschweißen bzw. Pulsüberlappschweißen kurze Prozesszeiten bei gleichzeitig hoher Prozesssicherheit erreichen. In **Bild 5** sind hierfür 2 Beispiele gezeigt, die im Großserieneinsatz laufen und die Eignung des Verfahrens dokumentieren.

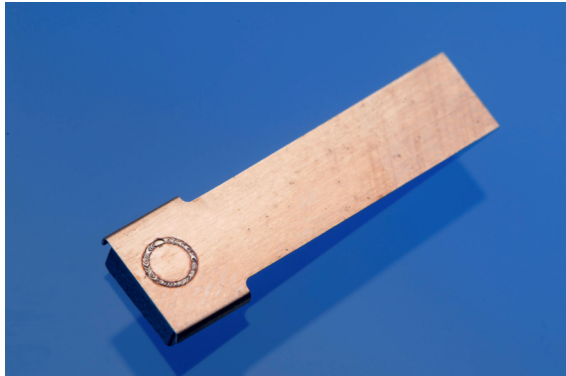
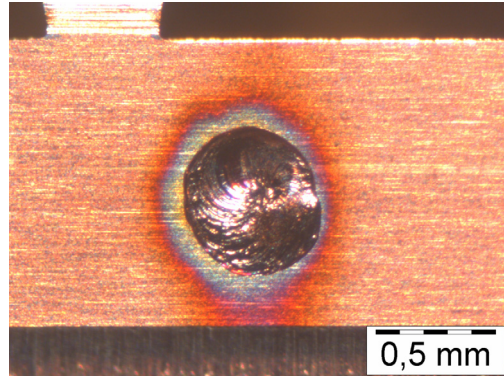


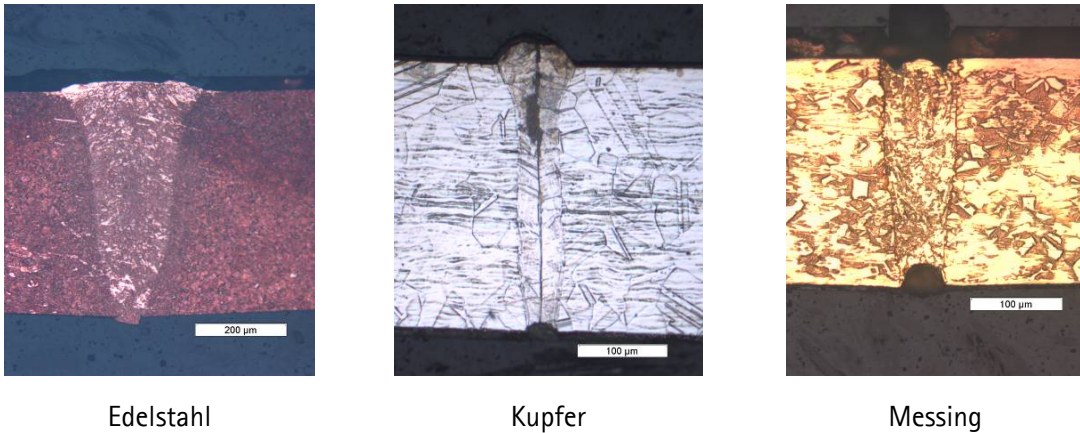
Bild 5: Kontaktierung einer Stromübertragungskohle mit einer Kupferfeder als integriertes Bauelement eines miniaturisierten Motors, Schweißkreisdurchmesser 3 mm



Mikroringschweißung mit dem SHADOW-Verfahren zur Verbindung zweier Kupferkomponenten eines Lead-Frames

Mit Faserlasern, einer neuen Klasse von Festkörperlasern, die ursprünglich aus der Telekommunikationstechnik stammen und die nun zu hohen Leistungen skaliert wurden, lassen insbesondere bei kleinen Geometrien Schweißnahtqualitäten und Geschwindigkeiten erzielen, die deutlich über die des SHADOW-Verfahrens hinausgehen. Durch die Bauart der Strahlquellen werden hier bei Leistungen von 100 – 500 W Strahldurchmesser von wenigen 10 μm möglich, mit denen Intensitäten größer 10^7 W/cm^2 erreicht werden. Damit können an sonst schwierig zu schweißenden Werkstoffen bereits Tiefschweißeffekte mit nur 100 W Laserleistung erzielt werden. Weitere Vorteile liegen in der Verwendung von Scannern, bei denen der Laserstrahl über ein großes Bearbeitungsfeld gescannt und der Fokus aufgrund der hohen Strahlqualität dennoch im Bereich 50 μm gehalten werden kann. Damit ergeben sich anlagentechnische Vorteile im Hinblick auf einen großen Arbeitsabstand sowie eine Erhöhung der Prozesssicherheit durch Vermeidung von Verschmutzungen der Optik.

In der Füge-technik für artungleiche Werkstoffe bieten diese Laser in Kombination mit einer schnellen Strahlscantechnik ein hohes Potential für Schweißprozesse mit sehr exakter Energiedeposition und Schweißtiefensteuerung. In **Bild 6** sind Überlappschweißungen für verschiedene Werkstoffe dargestellt, die die schmale Schweißnahtbreite und die hohe Qualität der Schweißungen verdeutlichen. Mit einer geeigneten Verfahrenstechnik, bei der Energiedeposition und Einschweißtiefe sehr exakt kontrolliert werden kann, lassen sich auch dünne Folien ohne Verzug fügen, so dass diese Technik z.B. für die Kontaktierung auf dünnen Kupferlagen, wie z. B. auf einer Leiterplatte geeignet ist. Damit ergeben sich für Anwendungen in der Elektrotechnik und der Elektronik neue Möglichkeiten der Hochtemperaturkontaktierung mit einem erweiterten Festigkeitsbereich, wenn Einzelkontakte anstatt über Lötverfahren durch Schweißverfahren ohne Beeinflussung der übrigen Bauteileigenschaften miteinander gefügt werden können.



Edelstahl

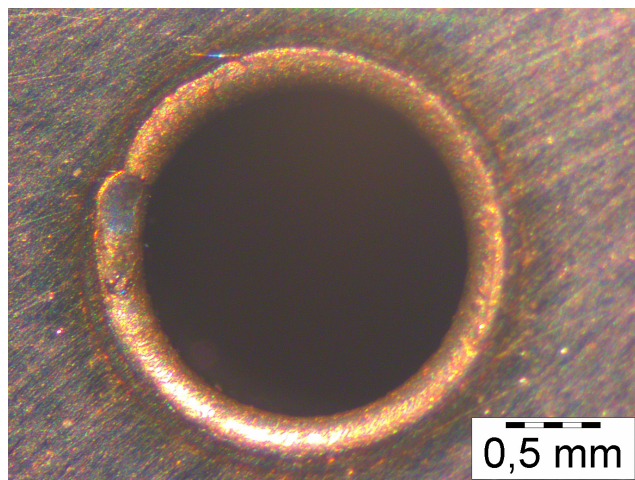
Kupfer

Messing

Bild 6: Faserlaserschweißungen an unterschiedlichen Werkstoffen und Kombinationen

Durch Neuentwicklungen bei den Laserstrahlquellen erweitert sich dieses Gebiet auf Fügegeometrien $< 100 \mu\text{m}$ mit Anforderungen an die Genauigkeit, die im μm -Bereich liegen. Insbesondere die Elektronik mit der Chipmontage greift verstärkt auf das Laserschweißen als Fügeverfahren in der Herstellung von Hochleistungsbauteilen zurück.

Durch die geringe notwendige Leistung von wenigen 100 W und die hohen Schweißgeschwindigkeiten von bis zu 1 m/s bei Stahl und mehreren 100 mm/s bei Kupferwerkstoffen eignet sich das Faserlaserschweißen vor allem für temperatur- und verzugempfindliche Bauteile. Beispiele hierfür sind in der Sensortechnik und der Mikrooptik zu finden, bei denen dünne Membranen, Hülsenverbindungen und Montageelemente für Optiken verschweißt werden. Hier werden durch den Schweißvorgang lediglich Energien im Bereich 1 – 10 J in das Bauteil eingebracht, die gegenüber konventionellen Laserschweißungen mit Energien von bis zu 100 J eine kaum merkbare Temperaturbelastung des Bauteils bewirken. In **Bild 7** ist eine Hülsenschweißung an Edelstahl mit einer Schweißzeit von 60 ms bei einer Schweißenergie von 3 J gezeigt. Die Oberfläche der Schweißnaht ist das sehr glatt, wie sie für cw-Faserschweißungen in der Regel üblich sind.

**Bild 7:** Mit Faserlaser geschweißte Hülsenkombination, Laserleistung $P = 50 \text{ W}$, Geschwindigkeit $v = 50 \text{ mm/s}$

Im Vergleich zum Laserschweißen von Metallen ist das Kunststoffschweißen mit Laserstrahlung eine Technologie, die erst in den vergangenen Jahren zur industriellen Reife gelangt ist. Bei diesem Verfahren wird in der Regel das Durchstrahlschweißen verwendet, bei dem einer der beiden Fügepartner transparent für die eingesetzte Laserwellenlänge sein muss und der zweite Fügepartner, der die Laserstrahlung absorbiert, aufgeheizt wird. Durch Wärmeleitung werden beide Partner gleichermaßen erwärmt und es entsteht eine Schmelze. Bisher wurden für dieses Verfahren je nach Verfahrensvariante Diodenlaser oder auch kontinuierliche Festkörperlaser eingesetzt. Die Applikationen dieses Verfahrens liegen heute überwiegend im Bereich elektronischer Bauelemente und Komponenten der Automobilzulieferindustrie, wobei Schweißnahtbreiten von typischerweise 1-2 mm realisiert werden. Für kleinere Schweißnahtbreiten wurde bisher nur das Verfahrensprinzip des Maskenschweißens eingesetzt.

Mit der Verfügbarkeit leistungsstarker kompakter Faserlaser eröffnet sich jedoch auch für das Kunststoffschweißen ein neues Applikationsfeld, das mit innovativen Verfahrensvarianten neue fertigungstechnische Möglichkeiten für die Mikroverbindungstechnik erschließt. So lassen sich z.B. mikrofluidische Komponenten mit Geometrien $< 100 \mu\text{m}$ mit Faserlasern bei Leistungen $< 10 \text{ W}$ bei hohen Geschwindigkeiten ohne Verlust von Geometriedetails miteinander verschweißen. Durch die entsprechende Anpassung der Laserwellenlänge an die Absorptionscharakteristik ist dies auch bei transparenten Werkstoffen ohne die Zuhilfenahme spezieller Absorber möglich.

3 Neue laserbasierte Mikrofügeverfahren

Die Lasertechnik bietet mit seinen Verfahren nicht nur in der klassischen Feinwerktechnik für Metalle neue fügetechnische Lösungen, sondern auch für Werkstoffkombinationen, die bislang anderen Verfahren vorbehalten waren. So hat z.B. das Laserfügen in der Kunststofftechnik seit einigen Jahren erfolgreich dort Einzug gehalten, wo die zum Fügen notwendige Energie sehr lokal und ohne Beeinflussung des Bauteils eingebracht wird. Damit wurden vor allem die Verfahren der Ultraschall- und Hochfrequenztechnik abgelöst, die Partikel generieren und mit mechanischen Einflüssen auf z.B. Sensoren deren Funktion beeinflussen.

Für mikrosystemtechnische Bauteile, in denen vor allem die Werkstoffkombinationen Silizium und Glas eingesetzt werden, wird mit dem Laserstrahlbonds ein neues Verfahren bereit gestellt, bei dem die Verbindung nicht wie sonst üblich über eine Schmelzphase erzeugt wird, sondern analog zu den klassischen Silizium-Verbindungsverfahren über eine schmelzefreie chemische Verbindung der Fügepartner.

Das Prinzip des Laserstrahlbondverfahrens beruht auf dem sogenannten Durchstrahl- oder Transmissionsfügen, **Bild 8**. Dabei werden die Fügeteile – von welchen mindestens eines für die eingesetzte Laserstrahlung transparent, das andere jedoch absorbierend ist – aufeinander gelegt und aneinander gepresst. Der Laserstrahl wird nun durch das transparente Fügeteil hindurch auf die Oberfläche des absorbierenden Fügeteils fokussiert. Der Hauptteil der Energie des Laserstrahls wird in der Kontaktebene der Fügeteile in Wärme umgesetzt und die Kontaktstelle gezielt erwärmt. Der Fügevorgang selbst basiert auf der Bildung einer Sauerstoffverbindung durch thermische Aktivierung einer Hydroxylgruppe an der Oberfläche und der Bildung von Wassermolekülen in der Fügezone, die anschließend ausdiffundieren oder in das Kristallgitter eingebaut werden.

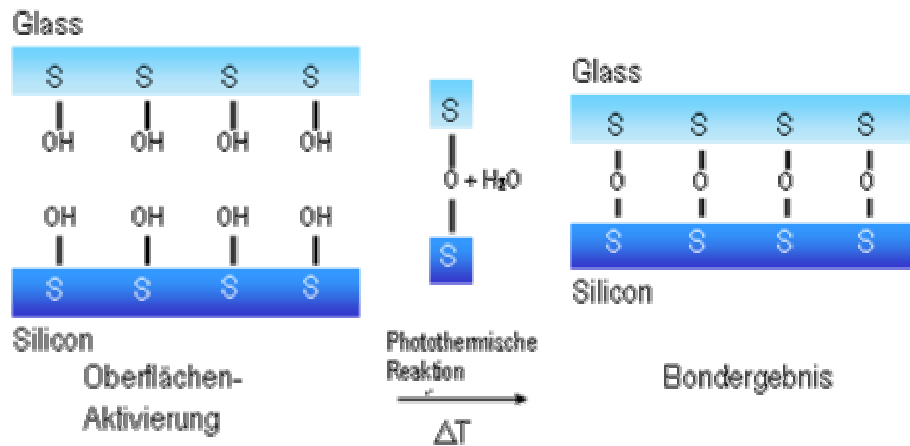


Bild 8: Prinzipielle Darstellung des Laserbondens von Silizium-Glas-Verbindungen

Das Laserstrahlbondverfahren verspricht große Potentiale hinsichtlich der möglichen Einsatzmöglichkeiten für die mikrooptische Aufbau- und Verbindungstechnik. So können mit diesem Verfahren dreidimensionale Einzelkomponenten wie Linsen, Spiegel und Fasern auf einem Silizium-Substrat ohne zusätzliche Werkstoffe bei Fügezeiten kleiner 100 Millisekunden fixiert werden, Bild 9. Dabei ist das Verfahren nicht, wie in der klassischen Silizium-Fügetechnik auf Werkstoffe mit angepassten Ausdehnungskoeffizienten beschränkt. So können heute bereits normale optische Gläser und auch Quarzglas mit Silizium verbunden werden ohne spezielle Übergangsschichten zur Anpassung der Werkstoffe zu applizieren. In der Erweiterung des Verfahrens können auch keramische Werkstoffe, wie Saphir und technisches Aluminiumoxid mit Gläsern und Silizium verbunden werden.

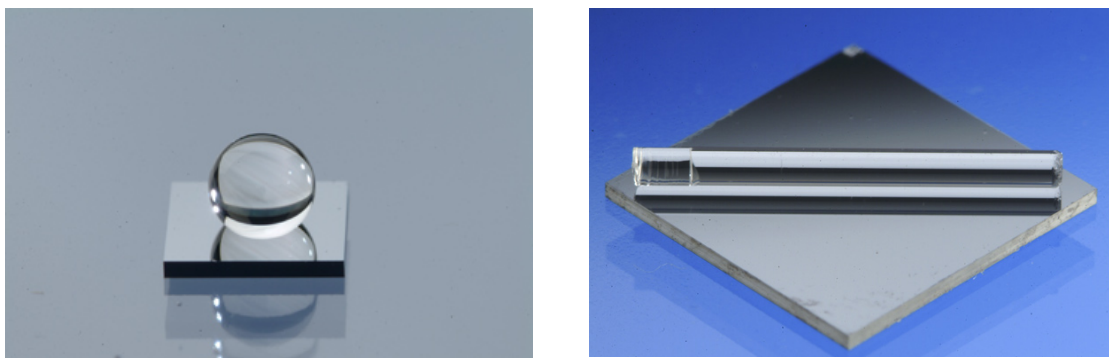


Bild 9: Fügeergebnisse des lasergestützten Bondens von Glasbauteilen mit Silizium

4 Zusammenfassung

Durch die Verfügbarkeit von Strahlquellen mit hoher Strahlqualität, hohen Leistungen und neuen Modulationsmöglichkeiten, wie diodengepumpter Festkörperlaser, Diodenlasern und modifizierten Langpuls-Festkörperlaser mit kleinen Faserdurchmessern ergeben sich für die Aufbau- und Verbindungstechnik und die Mikromontage neue Fertigungsmöglichkeiten mit bis dahin nicht erreichbaren Bearbeitungsdimensionen und -genauigkeiten. Dadurch eröffnen sich für

viele Anwender der Mikro- und Feinwerktechnik sowie der Elektrotechnik neue Fügeprozesse, die eine weitere Verkleinerung der Fügezone mit geringeren Nebenwirkungen auf das Bauteil zur Folge haben. Hier sind insbesondere Hochleistungs-Diodenlaser mit Faserdurchmessern $< 200 \mu\text{m}$ und Nd:YAG-Festkörperlaser mit extrem langen Laserpulsen für neuartige SHADOW-Schweißprozesse zu nennen. In Zukunft wird sich durch die Verfügbarkeit von Faserlasern mit hoher mittlerer Leistung und nochmals höherer Strahlqualität ein weiterer Sprung zu noch kleineren Fügezonen bei Fügegeometrien $< 50 \mu\text{m}$ ergeben, die bei kleineren Geometrien und steigender Werkstoffvielfalt zu einem wichtigen Werkzeug in der Herstellung mikrotechnischer und elektrotechnischer Produkte werden.