

Anlagentechnik und Prozessentwicklung zum kombinierten Laserstrahllöten und -schweißen elektrischer Leistungsverbinder

Johanna Helm, M. Sc.
Dr. Alexander Olowinsky
Prof. Dr. Arnold Gillner

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Steinbachstraße 15, 52074 Aachen

Die Notwendigkeit der Erhöhung der Leistungsdichten in leistungselektronischen Komponenten erfordert immer größere Leitungsquerschnitte. Für die prozesssichere Kontaktierung der verwendeten Materialien werden robuste, präzise und flexible Fügeprozesse benötigt. Werden für die Fertigung von Leistungselektronik-Komponenten mehrere Fügeverfahren verwendet, so wird für jeden Prozess eine eigene Anlagentechnik benötigt. Ziel des Projekts „KomBond - Substratangepasstes kombiniertes Laserstrahllöten- und schweißen von elektrischen Leistungsverbindern für die Leistungselektronik - ist die Entwicklung eines robusten Prozesses zur Kontaktierung von elektronischen Bauelementen und Leiterplatten in der Leistungselektronik. Mit diesem Kombinationsprozess sollen unterschiedliche Temperaturniveaus und Werkstoff-Belastungsgrenzen von Bauelementen und Verbindern mit einer gemeinsamen Systemtechnik, aber jeweils angepassten Prozessparametern abgedeckt werden können. Hierfür werden die beiden Fügeprozesse Schweißen und Löten in einem gemeinsamen Systemansatz kombiniert, sodass als Verbindermaterial ein sowohl lötlös- als auch schweißbarer Verbinder verwendet werden kann. Die wesentlichen technologischen Herausforderungen bei diesem kombinierten Ansatz bestehen zum einen in der prozessangepassten Steuerung der zeitlichen und örtlichen Energiedeposition für beide Fügeprozesse und die verwendeten Verbindungswerkstoffe ohne die optische Systemtechnik und die Strahlquelle zu verändern und zum anderen in der schweißtechnischen Problematik des schmelzflüssigen Fügens von Werkstoffen mit stark unterschiedlichen Schmelzpunkten.

Im Rahmen dieses Beitrags werden die wesentlichen Projektergebnisse vorgestellt. Diese umfassen die Auslegung und den Aufbau der Anlagentechnik, Definition und Auswahl der Versuchsmaterialien, Parameterstudie zum Laserstrahlschweißen und Laserstrahllöten mit einem verzinnnten Kupferbändchen sowie die Überführung der kombinierten Fügeverfahren in die Anwendung.

1 Einleitung

Die Kontaktierung von Halbleiterbauelementen und Leistungselektronikkomponenten an die Leiterplatte erfolgt in der Regel über Draht- oder TAB-Bonden. Die Drahtbondtechnik ist eine ultraschallbasierte Fügemethode, durch die eine elektrisch leitende Verbindung (beispielsweise auf einer Leiterplatte) hergestellt wird. Die für die Verbindung erforderliche Energie wird entweder durch Ultraschall, eine Kombination aus Druck und Wärme oder durch Wärme, Druck und Ultraschall eingebracht, so dass durch Grenzflächendiffusion eine feste mechanische Verbindung ohne Schmelzbildung entsteht. Nachteilig ist die hohe mechanische Belastung des Substrats durch die Fügeverfahren während des Fügeprozesses. [1, 2] Des Weiteren stellt das Drahtbenden hohe Anforderungen an die Reinheit und eine eventuelle Vorbehandlung der Fügepartner, um einen fehlerfreien und stabilen Prozessablauf zu gewährleisten. [3] Eine weitere Limitierung ist der maximal fügbare Drahtquerschnitt. Grund hierfür sind die benötigte Bondkraft bei großen Drahtdurchmessern und die damit in Zusammenhang stehende Ultraschall-Leistung. Der maximale Drahtdurchmesser begrenzt gleichzeitig die maximal übertragbaren Ströme über die elektrische Verbindung.

Als Kontaktierungstechnik für dünne Folien [4] und das Verbinden von Mikrobauteilen [5] ist das Laserstrahlschweißen mit lampengepumpten Festkörperlasern ($\lambda = 1 \mu\text{m}$) industriell verbreitet. Die geringe und gleichzeitig temperatur- und oberflächenabhängige Absorption von Kupferwerkstoffen sowie die große Temperaturleitfähigkeit von Kupfer führen zu einer begrenzten Reproduzierbarkeit der Schweißungen [6, 7] Dies ist beim Schweißen auf der Leiterplatte kritisch, da eine zu große Schweißtiefe bzw. zu große Schmelzvolumina zu einer Zerstörung der beteiligten Bauteile führen können. Mit diodengepumpten Strahlquellen wie Faser- und Scheibenlasern stehen Strahlquellen zur Verfügung, die kleine Strahldurchmesser ($< 30 \mu\text{m}$) ermöglichen und für das Schweißen ausreichende Pulsdauern und Leistungsdichten aufweisen. Mit diesen Strahlquellen lassen sich deutlich höhere Intensitäten erzielen und neuartige Verfahrensansätze realisieren [8, 9]. Die so realisierbaren sehr kurzen Prozesszeiten ermöglichen auch das Fügen artungleiche Metalle, wie z. B. Kupfer und Stahl oder Kupfer und Aluminium [10]. Im Vergleich zum konventionellen Drahtbenden ist das Laserstrahlschweißen weitgehend unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit der Fügepartner, so dass die komplette Verbinderdicke lokal aufgeschmolzen wird und die Verbindung nicht durch eine Diffusion an der Grenzfläche erfolgt. Damit ist der Prozess wesentlich robuster in Bezug auf Verunreinigung von Bändchen und Metallisierung. Die Schichtdicke der Metallisierung hat auch beim Laserstrahlmikroschweißen Einfluss auf den Fügeprozess. So wird für ein prozesssicheres Fügen ein Verhältnis von Metallisierungsdicke zu Verbinderdicke von etwa 1:1 angestrebt. Bei kleineren Verhältnissen steigt die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung des Substratmaterials. Dies gilt im Besonderen für thermisch empfindliche Materialien wie beispielsweise FR4. Das Schweißen von verzinnnten Blechen, insbesondere mit einem Kupferkern, wird zunehmend im Rahmen von Aluminium-Kupfer-Verbindungen untersucht, um etwaige intermetallische Phasen und

deren negative Effekte auf die mechanische Festigkeit zu beeinflussen. [11] Durch den niedrigeren Schmelzpunkt des Zinns im Vergleich zum Kupfer ($\Delta T_m \approx 800 \text{ K}$) zeigen sich Nahtdefekte in Form von Poren oder Auswürfen beim Schweißen mit NIR-Laserstrahlquellen. [12] So entstehen beim Schweißen von Kupferbasislegierungen durch Realisierung des Tiefschweißeffektes Temperaturen in der Schmelze, in denen das Zinn bereits Verdampfungstemperatur erreicht und somit durch fehlende Ausgasung, Nahtdefekte begünstigt.

Das Löten von verzinnnten Kupferbändchen wird unter anderem im Bereich der Photovoltaik eingesetzt, um einzelne Solarzellen zu einem Modul elektrisch zu verschalten. Dabei werden auf beiden Seiten der Solarzelle (Plus- und Minuspol) konventionell 2-4 Verbinder über die Solarzellenlänge aufgelötet. Der verzinnnte Verbinder selbst ist aufgrund der hohen Stückzahlen im Photovoltaik Markt ein Massenprodukt. Je Modul werden ca. 65 m verzinnnte Verbinder verwendet. Neben der Photovoltaik werden derartige Verbinder im Automobilbereich als Flachleiter für Elektronikkontakte und in Verbindung mit einer Silbermetallisierung als Schmelzsicherung eingesetzt. Jedoch sind die durch einen Lötprozess fügbaren Materialkombinationen limitiert. So lassen sich beispielsweise Stähle oder Bauteile aus Aluminiumguss nicht durch den Einsatz eines Laserstrahl-Löt-Prozesses fügen.

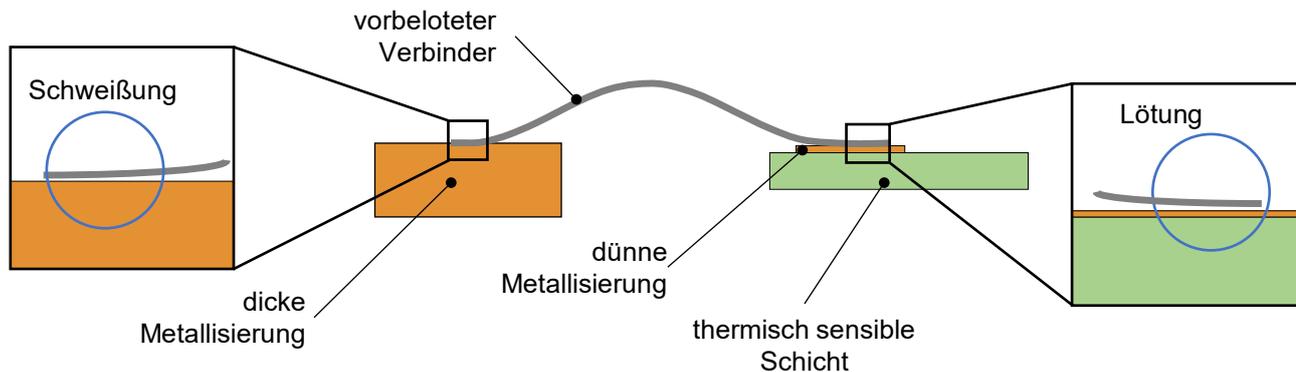


Bild 1. Prinzip des kombinierten Fügeprozesses „KomBond“. Auf dicken Metallisierungen wird ein Laserstrahlschweißprozess eingesetzt, auf dünnen Metallisierungen/Leiterplatten wiederum ein Laserstrahlötprozess.

In diesem Beitrag wird ein Prozessansatz vorgestellt, der die Möglichkeit eines Laserstrahl- und eines Laserstrahlschweißverfahrens in einer kombinierten Anlagentechnik ermöglicht. So kann in Abhängigkeit des zu kontaktierenden Substrates die eine oder andere Fügetechnik ausgewählt werden, ohne eine Umrüstung der Werkzeuge oder der Anlagentechnik vorzunehmen. **Bild 1** zeigt schematisch die Kombination des KomBond-Löt- und Schweißprozesses bei Benutzung eines vorbeloteten Verbinders.

2. Auswahl der elektrischen Verbindermaterialien

Als Benchmark-Materialien werden flexible, rundum verzinnnte Kupferbändchen ausgewählt, wie sie in der Solarindustrie verwendet werden. Die Breite dieser Bändchen beträgt 5 mm bei einer Dicke von 200 μm . Die Schichtdicke der Verzinnung liegt durchschnittlich bei 25 μm .

Als neuer Ansatz werden Kupferbändchen genutzt, auf welche ein Zinndraht einseitig aufplattiert worden ist. Das Kupferbändchen ist 2 mm breit und 300 μm dick. Im Querschnitt ist der aufplattierte Zinndraht halbmondförmig erkennbar (vgl. **Bild 2**).

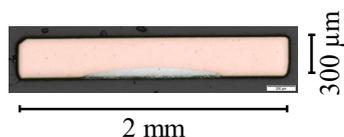


Bild 2. Ansicht des Kupferbändchens mit aufplattiertem Zinndraht im Querschnitt.

An der dicksten Stelle ist das Lotbett etwa 100 μm dick. Das Volumen des Lots beträgt somit ungefähr 10 % des gesamten Bändchens. Auf die Zugabe von zusätzlichem Flussmittel im Lot wird verzichtet. Versuche hierzu zeigten, dass das verdampfende Flussmittel während des Schweißvorgangs zu einem vermehrten Auftreten von Schweißnahtfehlern führt.

3 Auslegung der Anlagentechnik für den Kombinationsprozess

Um eine gemeinsame Anlagentechnik zu definieren und aufzubauen, werden zunächst die Anforderungen der Einzelprozesse „Laserstrahllöten“ und „Laserstrahlschweißen“ betrachtet. Als Strahlquelle soll ein NIR Faserlaser eingesetzt werden ($\lambda = 1070 \text{ nm}$). Zum einen sind diese Strahlquellen industriell bereits weit verbreitet, so dass der kombinierte Fügeprozess implementiert werden kann, zum anderen sind diese Strahlquellen in einem großen Leistungsbereich verfügbar und somit besonders flexibel einsetzbar.

Für den Einsatz einer örtlichen Leistungsmodulation und zur Realisierung von Schweißnahtgeometrien wird ein galvanometrischer Scanner eingesetzt. Durch die Ansteuerung der beiden integrierten Spiegel dieses Strahlables-

kungssysteme können innerhalb des Bearbeitungsfeldes nahezu beliebige Strahltrajektorien abgebildet werden. Die örtliche Leistungsmodulation beschreibt beim Laserstrahlschweißen die Überlagerung der Vorschubbewegung mit einer – meist kreisförmigen - Oszillationsbewegung. So wird die bestrahlte Fläche vergrößert und die Prozesseffizienz durch Ausnutzen der Wärmeleitung erhöht. [9] Im Falle des Laserstrahllöten werden in der Regel keine bewegten Strahlen eingesetzt. Im Rahmen des Projektes KomBond soll die bestrahlte Fläche durch eine Strahlbewegung während des Fügeprozesses erhöht werden, um so die Anbindungsfläche zu erhöhen. Dazu wird eine zuvor festgelegte Trajektorie bei konstanter Leistung mehrfach abgefahren. Die Leistung und die Anzahl der Wiederholungen bestimmt die dann die Haltedauer. Diese Prozessführung wird ebenfalls als örtliche Leistungsmodulation bezeichnet.

Die prozessspezifischen Anforderungen sind in der **Tabelle 1** dargestellt. Die kritischen Anforderungen bezüglich der Anlagentechnik werden dabei durch das Laserstrahlschweißen vorgegeben.

Tabelle 1. Prozessspezifische Anforderungen an die Anlagentechnik getrennt nach Laserstrahllöten und Laserstrahlschweißen.

Komponente / Eigenschaft	Anforderungen	
	Laserstrahllöten	Laserstrahlschweißen
Strahlquelle	Singlemode Faserlaser ≥ 300 W Ausgangsleistung cw	Singlemode Faserlaser ≥ 500 W Ausgangsleistung cw
Resultierender Spotdurchmesser	> Laserstrahlschweißen, ~ 300 µm	≤ 50 µm
Galvanometrischer Scanner	Notwendig für die Positionierung und örtlichen Leistungsmodulation	Notwendig für Realisierung der Schweißnahtgeometrie und örtlicher Leistungsmodulation
Lotzufuhr	Nicht nötig, Verbinder beinhalten Lot	-

Die größte Diskrepanz besteht in der benötigten Strahlungsintensität am Werkstück. Während für das prozesssichere Aufschmelzen und Schweißen von Kupferwerkstoffen Intensitäten im Bereich von 10^6 W/cm^2 benötigt werden, liegen diese Intensitäten für das Laserstrahllöten bedeutend niedriger. Ziel ist es hier, lediglich den Lotwerkstoff in eine schmelzflüssige Phase zu überführen und so eine Kontaktierung der beiden Fügepartner zu ermöglichen. Ein optischer Aufbau (Strahlquelle, Strahlführung und Fokussierlinse) bedingt in der Regel einen festen Arbeitsabstand. Um die Intensität am Werkstück zu reduzieren, muss also die Leistung verringert oder der Spotdurchmesser vergrößert werden. Eine Möglichkeit der Fokussierlinse-Modulation ist die Integration eines Z-Shifters in den Strahlengang. Durch die Bewegung einer der beiden integrierten Linsen lässt sich der Arbeitsabstand des optischen Aufbaus verändern. Bei unveränderlicher Position des Werkstückträgers ist dies gleichbedeutend mit einer Veränderung der bestrahlten Fläche. **Bild 3** zeigt den im fertigen Aufbau gemessenen Zusammenhang aus Intensität, Fokussierlinse und Z-Shifters-Position. Der Laserstrahlschweißprozess wird bei geringstem Spotdurchmesser und im Falle konstanter Leistung bei höchster Intensität durchgeführt. So wird bereits bei geringen Laserleistungen die Schwellintensität am Werkstück erreicht. Dieses Prozessregime ist in **Bild 3** blau markiert. Links neben dem Diagramm ist eine dreidimensionale Prinzipskizze dargestellt. Der Laserstrahl wird beim Laserstrahlschweißen auf der Probenoberfläche fokussiert und kann durch die Ablenkung der Spiegel innerhalb des galvanometrischen Scanners abgelenkt werden. Der Laserstrahlprozess wird bei dem größten durch eine Linsebewegung im Z-Shifters realisierbaren Fokussierlinse durchgeführt. In diesem Prozessregime, welches im Diagramm rot markiert ist, wird also die bestrahlte Fläche maximiert und die resultierende Intensität minimiert. Rechts neben dem Diagramm in **Bild 3** ist eine Prinzipskizze des Aufbaus beim Laserstrahllöten dargestellt. Die Linse im Z-Shifters wird ausgelegt, so dass der Fokus oberhalb des Werkstücks liegt.

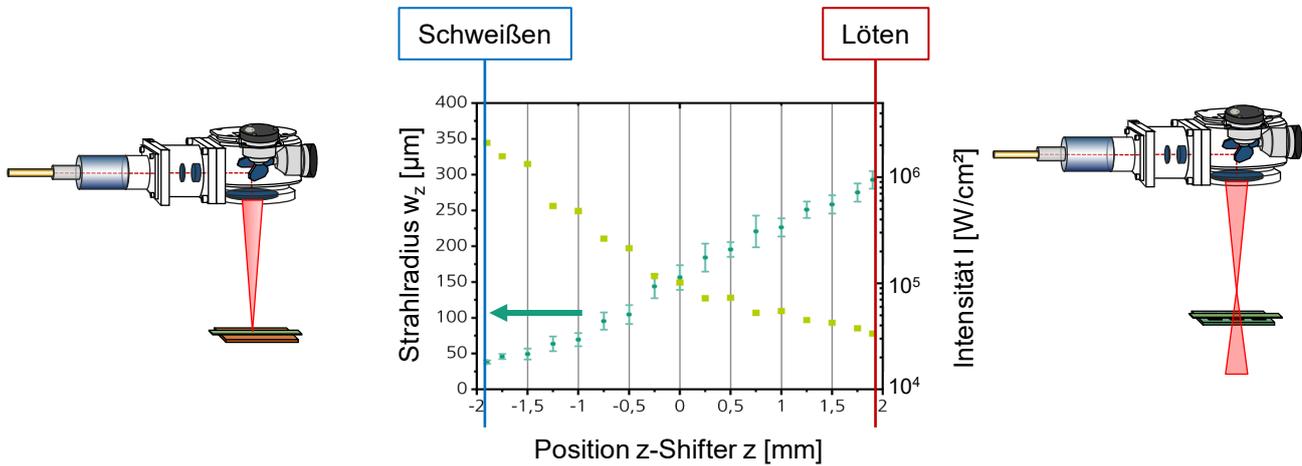


Bild 3. Zusammenhang zwischen dem Strahlradius, der Intensität am Werkstück und der Position des Z-Shifters in der KomBond-Anlagentechnik.

4 Ergebnisse

4.1 Konstruktion einer positionserhaltenden Anpressvorrichtung

Der Positionier- und Haltevorrichtung kommt beim Laserstrahlfügen eine besondere Bedeutung zu. Beim Laserstrahlschweißen muss sie einen Nullspalt zwischen den beiden Fügepartnern generieren, um einen sicheren und reproduzierbaren Prozess sicherzustellen. Beim Laserstrahllöten steht die Positionierung der beiden Fügepartner untereinander im Vordergrund. Zudem sollte die Halterung selbst eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, um die durch den Laser ins System eingebrachte Energie nicht aus der Fügezone abzuleiten. Basierend auf den Anforderungen wird eine pneumatische Anpressvorrichtung entworfen und gefertigt. Die pneumatische Kraftaufbringung ermöglicht eine bauteileingepasste Einstellung der Anpresskraft, so dass die Bauteile durch die Haltevorrichtung nicht beschädigt werden. **Bild 4** zeigt die Konstruktionszeichnung der Anpressvorrichtung mit allen relevanten Einzelteilen.

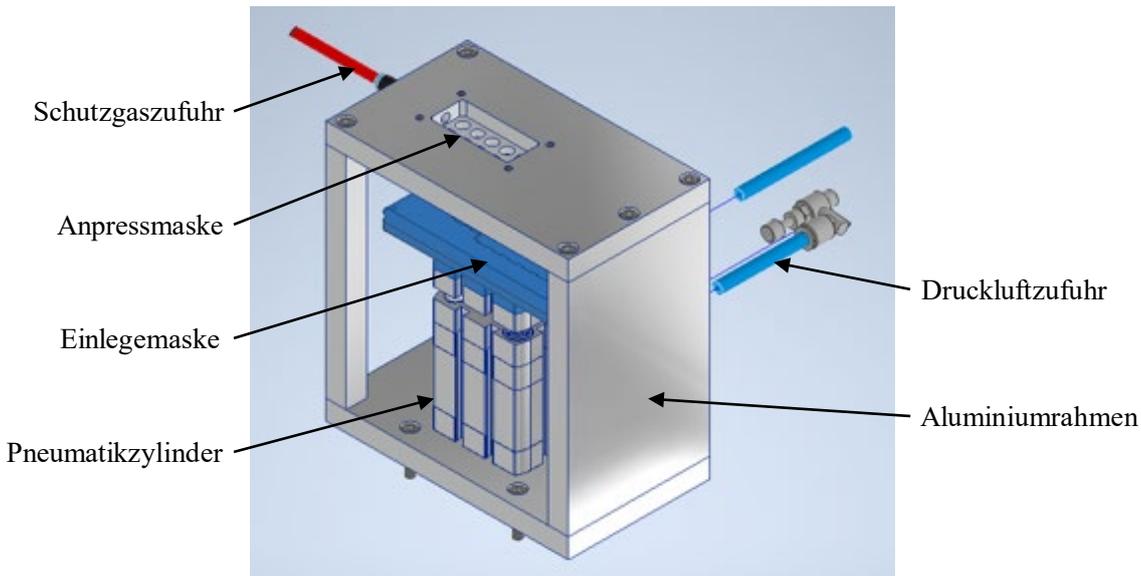


Bild 4. CAD-Zeichnung der positionserhaltenden Anpressvorrichtung.

Weitere Eigenschaften der Vorrichtung sind

- Anpress- und Einlegemaske werden gesondert, unabhängig von der oberen Platte des Aluminiumrahmens, gefertigt und können so bei Änderung des Werkstücks kostengünstig angepasst werden. Als Material für die Anpressmaske wird eine Keramik gewählt, um den Wärmefluss vom Werkstück in die Haltevorrichtung gering zu halten. Dies trägt zur Reproduzierbarkeit des Fügeprozesses bei.
- Anschlüsse für Schutzgaszufuhr.
- Probenaufnahme (Einlegemaske) aus 3D-gedruckten Kunststoffelementen ermöglichen eine hohe Formflexibilität

4.2 Parameterstudie zum Laserstrahllöten mit örtlicher Leistungsmodulation

Beim Laserstrahllöten bezeichnet die örtliche Leistungsmodulation eine schnelle Bewegung des defokussierten Laserstrahls auf der Probenoberfläche in zuvor festgelegten Trajektorien. Diese Trajektorien können beliebig häufig wiederholt werden, um die Einwirkzeit zu variieren. So lässt sich die bestrahlte Fläche während des Prozesses erhöhen, die Energie wird gleichmäßig verteilt und eine lokale Überhitzung, die mit der Strahlkaustik korreliert, kann vermieden werden. Im Rahmen von Vorversuchen werden drei Trajektorien ausgewählt, die auf der Anordnung mehrerer Kreise zueinander basieren. Für beide Bändchenvarianten werden umfangreiche Parameterstudien durchgeführt, um in Abhängigkeit der Trajektorie, der Laserleistung und der Vorschubgeschwindigkeit die Prozessparameter zu untersuchen und mögliche Defekte zu identifizieren. Die Analyse der Ergebnisse erfolgt durch die Anfertigung metallografischer Schläffe. **Bild 5** zeigt vier Schlibfbilder, die einer Trajektorie aus 3 konzentrischen Kreisen zuzuordnen ist. Die Vorschubgeschwindigkeit v beträgt für alle hier gezeigten Versuche 100 mm/s.

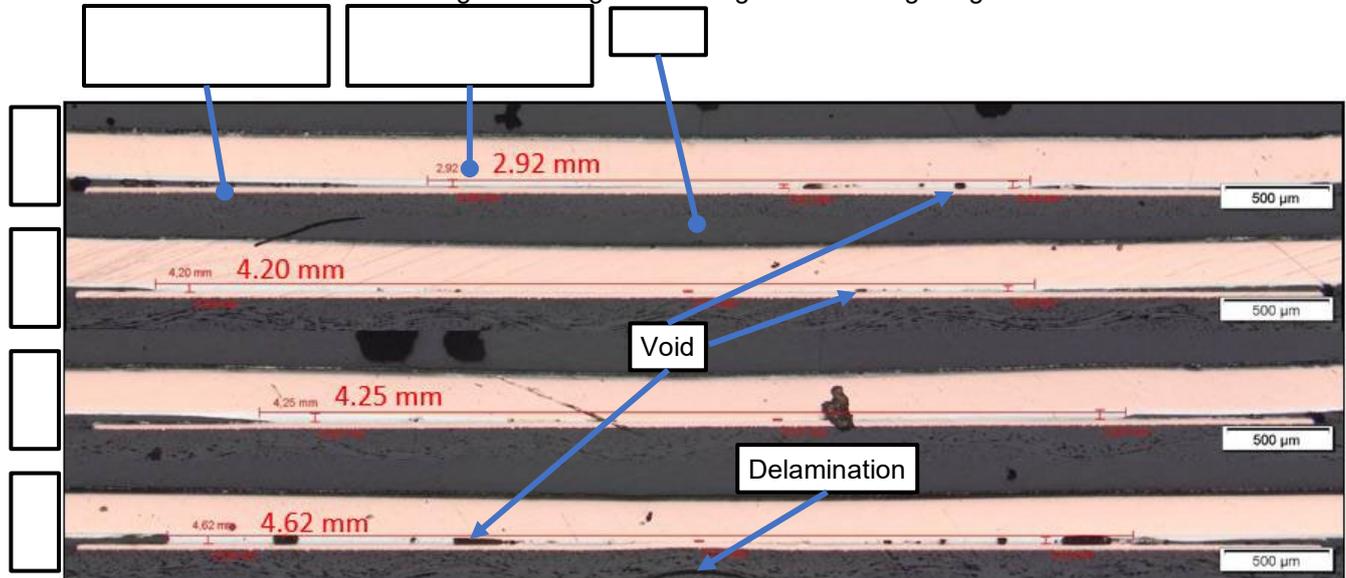


Bild 5. Laserstrahllöten von rundum verzinnnten Kupferbändchen mit örtlicher Leistungsmodulation auf Leiterplatte. Als Trajektorie werden drei konzentrische Kreise verwendet, die Vorschubgeschwindigkeit beträgt 100 mm/s, die Laserleistung wird variiert.

Bei allen drei Trajektorien ist eine Verbindung der beiden Fügepartner möglich. Im Querschliff sind in einigen Bereichen Voids bzw. Fehlstellen erkennbar und im Randbereich der Metallisierung ist die Anbindung zwischen beiden Fügepartnern weniger ausgeprägt als im mittleren Bereich. Die Delaminationen im Bereich des FR4s in der Leiterplatte deuten auf eine temporäre Überhitzung des Bauteils hin. Das Volumen des Kupferverbinders ist im Vergleich zu der Metallisierung auf der Leiterplatte sehr groß, so dass viel Energie notwendig ist, um den Verbinder so weit zu erwärmen, dass die zwischen den Fügepartnern liegende Zinnschicht aufgeschmolzen werden kann. Dabei kann die Schädigungstemperatur für das FR4 überschritten werden, so dass Delaminationen entstehen. Diese Delaminationen sind visuell am Bauteil nicht erkennbar und zeigen sich erst im Schlibfbild. Um dieser Schädigung entgegenzuwirken, wäre der Wechsel hin zu einem temperaturstabileren Leiterplattenmaterial sinnvoll, welches kurzzeitig höheren Temperaturen standhält als das hier verwendete FR4.

Dieselben Parameterstudien werden auch mit dem Kupferbändchen mit aufplattiertem Zinn Draht durchgeführt. Die notwendige Laserleistung ist hier deutlich höher beziehungsweise die verwendete Vorschubgeschwindigkeit geringer, als bei der Nutzung der rundum verzinnnten Kupferbändchen, da das Kupfer, nur einen geringen Teil der eingestrahlten Laserleistung absorbiert und so mehr Leistung notwendig ist, um das Weichlotbett durch Wärmeleitung aufzuschmelzen. Analog zu **Bild 4** sind in **Bild 5** exemplarisch Schlibfbilder der Variation der Laserleistung für die Trajektorie aus drei konzentrischen Kreisen gezeigt. Insgesamt sind die gelöteten Bereiche sehr gleichmäßig, im Vergleich zu den rundum verzinnnten Bändchen sind weniger Voids erkennbar und die Metallisierung ist über den gesamten Bereich benetzt. Allerdings sind hier größere Bereiche mit Delaminationen im Leiterplattengrundmaterial sichtbar, die sogar zu einer Verformung der Metallisierung führen können.

Das Laserstrahllöten des Kupferbändchens mit aufplattiertem Zinn Draht ist möglich und erzielt im Bereich der Lotstelle sehr gute Ergebnisse auf Grund geringer Voidanzahl und einer sehr guten Benetzung. Nachteilig ist das Entstehen von Delaminationen in tiefer liegenden Bereichen der Leiterplatte, die zu einem Bauteilversagen führen können. Für den Einsatz dieser Prozessvariante sollte eine Leiterplatte gewählt werden, die höheren Temperaturen standhält, da durch Wärmeleitung viel Energie in das Leiterplattengrundmaterial abfließt.

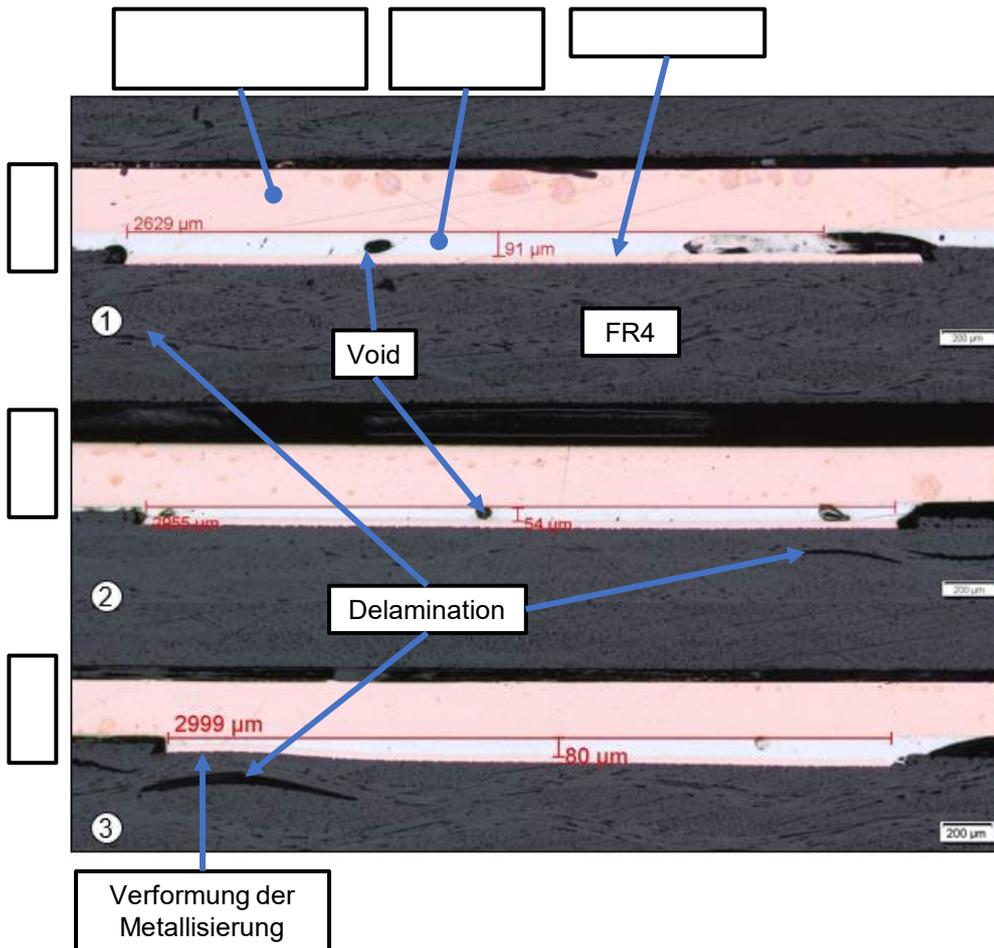


Bild 6. Laserstrahl­löten des Kupferbänd­chens mit auf­plat­tiertem Zinndraht unter Verwen­dung der örtlichen Lei­stungs­mo­du­la­tion auf Lei­ter­plat­te. Als Trajekto­rie wer­den drei kon­zen­tri­sche Kreise verwen­det, die Vor­schub­ge­schwin­dig­keit be­trägt 30 mm/s, die Laserlei­stung wird va­riert.

4.3 Parameterstudie zum Laserstrahlschweißen mit örtlicher Leistungsmodulation

Im vorangegangenen Kapitel wurde gezeigt, dass beide Verbindervarianten (rundum verzinkt und aufplattierter Zinndraht) durch einen Laserstrahl­lötprozess an eine Leiterplatte kontaktiert werden können. Um in einer industriellen Anwendung frei zwischen einem Laserstrahlschweiß- und Laserstrahl­lötprozess wählen zu können, muss der eingesetzte Verbinder für beide Prozesse einsetzbar sein. Im Folgenden werden Teile der Parameterstudien zum Laserstrahlschweißen beider Verbindervarianten vorgestellt. Als unterer Fügepartner werden Cu-ETP Bleche verwendet. Für die Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen werden die Laserleistung, der Fokussdurchmesser, die Vorschubgeschwindigkeit sowie die Parameter der örtlichen Leistungsmodulation variiert. Die örtliche Leistungsmodulation bezeichnet im Falle des Laserstrahlschweißens eine der linearen Vorschubbewegung überlagerte Kreisfrequenz. Die örtliche Leistungsmodulation wird durch die Amplitude und die Frequenz charakterisiert. Wissenschaftliche Untersuchungen dieser Prozesstechnik zum Laserstrahlschweißen von Reinstmetallen, Legierungen oder artungleichen Verbindungen sind vom Fraunhofer ILT publiziert worden (z.B. [8], [9], [10] und [13]). Beim Verschweißen der rundum verzinkten Verbinder mit dem Kupfersubstrat bildet sich eine Bronze. Diese entsteht bei der Mischung des Zinns mit dem Kupfer und besitzt gute mechanische Eigenschaften, die elektrische Leitfähigkeit ist allerdings gegenüber dem reinen Kupfer reduziert. In der Fügezone des verzinkten Kupferverbinders mit dem Kupferterminal ist die Durchmischung von Zinn und Kupfer weitestgehend homogen, wie EDX-Analysen der Schweißnaht zeigen. [14]

Vergleichend zu diesen Benchmark-Versuchen mit einem rundum verzinkten Kupferbändchen, werden Schweißversuche mit einem Kupferbändchen mit Weichlotbett durchgeführt. Dabei wird die Schweißnaht in Bändchenrichtung positioniert, um eine über dem Nahtvorschub sich veränderte Zusammensetzung des Schmelzbades zu vermeiden. Analysen durch Querschliffe zeigen, dass eine mittig auf dem Bändchen liegende Schweißnaht nicht ausreicht, um das gesamte Lotmaterial aufzuschmelzen. In den nicht aufgeschmolzenen Zinnbereichen entstehen neben dem wiedererstarteten Schmelzbad kreisförmige Kavitäten an deren Innenseite Kupfer-Zinn-Kristalle in die Kavitätsmitte hineinwachsen. Diese Kavitäten können zu einer Kerbwirkung in der Fügezone im Falle einer mechanischen Belastung der Verbindung führen und sollten möglichst vermieden werden. Für weitere Versuche werden somit mehrere parallele, sich überlappende Schweißnähte auf dem Bändchen platziert, um das insgesamt aufgeschmolzene Volumen zu erhöhen. Für das vollständige Umschmelzen des Zinnbereichs sind mindestens fünf parallele Schweißnähte notwendig.

Zur näheren Untersuchung der Durchmischung von Kupfer und Zinn werden EDX-Analysen der Querschliffe angefertigt. Die Analyse der Elementverteilung von zwei parallelen Schweißnähten wird in **Bild 7** dargestellt.

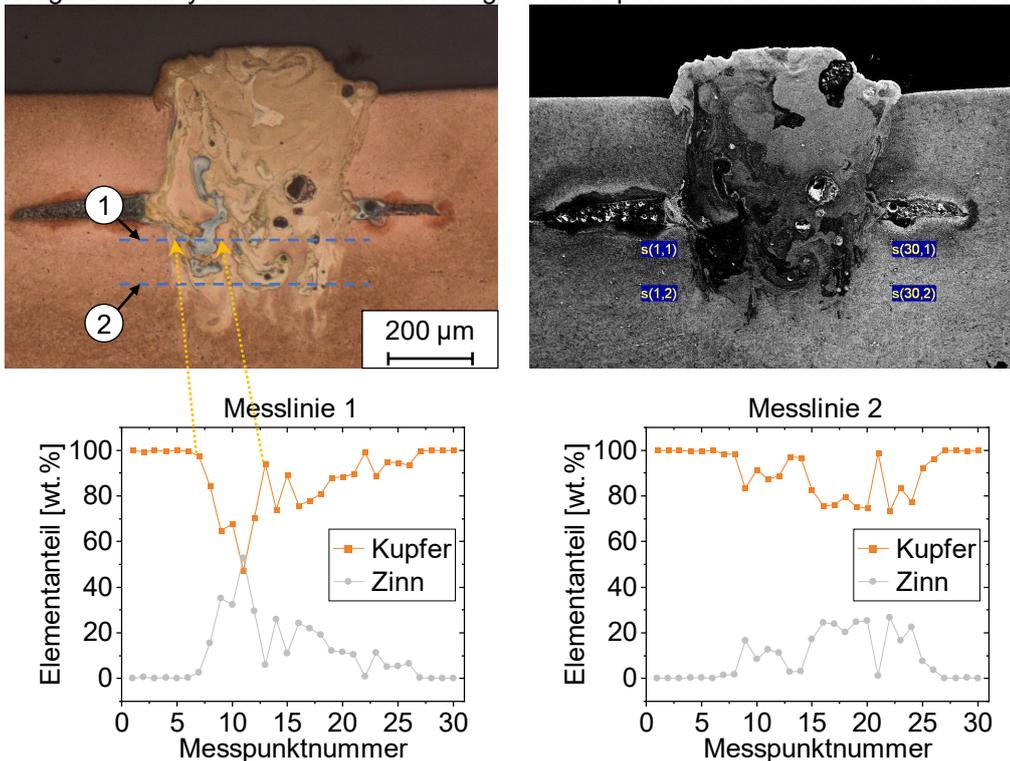


Bild 7. Elementverteilung von Kupfer und Zinn über der Schweißnahtbreite für zwei parallele Schweißnähte im Querschliff.

Die Analyse erfolgt in zwei horizontalen Linien mit jeweils 30 Messpunkten am Grund der Schweißnaht (blaue Linien, Querschliff in **Bild 7**, oben links). Auf der rechten Seite der Abbildung wird das Elektronenbild mit den jeweiligen Start- und Endpunkten der Messungen gezeigt. Die beiden Diagramme zeigen den prozentualen Anteil der Elemente Kupfer und Zinn an den jeweiligen Messpunkten für beide Messlinien. Das linke Diagramm in **Bild 7** zeigt das Ergebnis der Messung direkt unterhalb des aufplattierten Zinndrahtes. Beim Übergang von dem festen Kupfersubstrat in die erste der beiden Schweißnähte sinkt der Kupferanteil und der Anteil an Zinn steigt an (ab Messpunkt Nr. 7). An Messpunkt 11 liegen Kupfer und Zinn nahezu in gleichen Anteilen vor, im weiteren Verlauf der Messreihe steigt der Kupferanteil wieder an. Die Mitte der gesamten Schweißnaht kann ungefähr am Messpunkt 15 angesetzt werden. Das zweite Diagramm zeigt die Messung entlang der Horizontale unterhalb der ersten Messlinie und zeigt für die zweite (rechte) Schweißnaht einen Anteil an Zinn von bis zu 25 wt.%. Die Anteile von Kupfer und Zinn in der Schweißnaht variiert entlang der Messstrecke, die Durchmischung der beiden Elemente ist in einigen Bereichen nicht vollständig.

Bild 8 zeigt exemplarisch die Analyse von fünf parallelen Schweißnähten. Der aufplattierte Zinndraht ist über der gesamten Bändchenbreite aufgeschmolzen. Die Messlinie 1 (blau gestrichelt, Lichtmikroskopie, **Bild 8** oben links) liegt ungefähr in der Fügezone von Verbindler und Substrat. Oben rechts in **Bild 8** ist die REM-Aufnahme des Querschliffs dargestellt. Messpunkt 15 kennzeichnet ungefähr die Mittellinie der gesamten Schweißgeometrie. Ausgehend von diesem Messpunkt sinkt der Anteil des Zinns zum Rand der Schweißgeometrie ab und erreicht beim Übergang in das Substrat einen Wert von null. Im Bereich der ersten (mittleren) Naht wird der höchste gemessene Zinngehalt von etwa 20 wt.% erreicht. Die Messlinie 2, welche näher an der Nahtwurzel liegt, zeigt zwischen Messpunkt 8 und Messpunkt 17 einen Bereich mit einem erhöhten Zinnanteil. Dies ist auf den in der Aufnahme unter dem Mikroskop sichtbaren Zinncluster zurückzuführen (gelbe Ellipse). Der maximale Zinnanteil im Schmelzbad liegt deutlich unterhalb der Werte, die bei lediglich zwei Schweißnähten ermittelt werden (vgl. **Bild 8**). Die Durchmischung der beiden Metalle ist durch den Einsatz von mehreren parallelen Schweißnähten homogener als bei der Nutzung von einer oder zwei Schweißnähten. Die hier dargestellten Versuche werden mit einer Oszillationsamplitude von 200 µm durchgeführt und zeigen ein vollständiges Aufschmelzen und Durchmischen des aufplattierten Zinndrahtes.

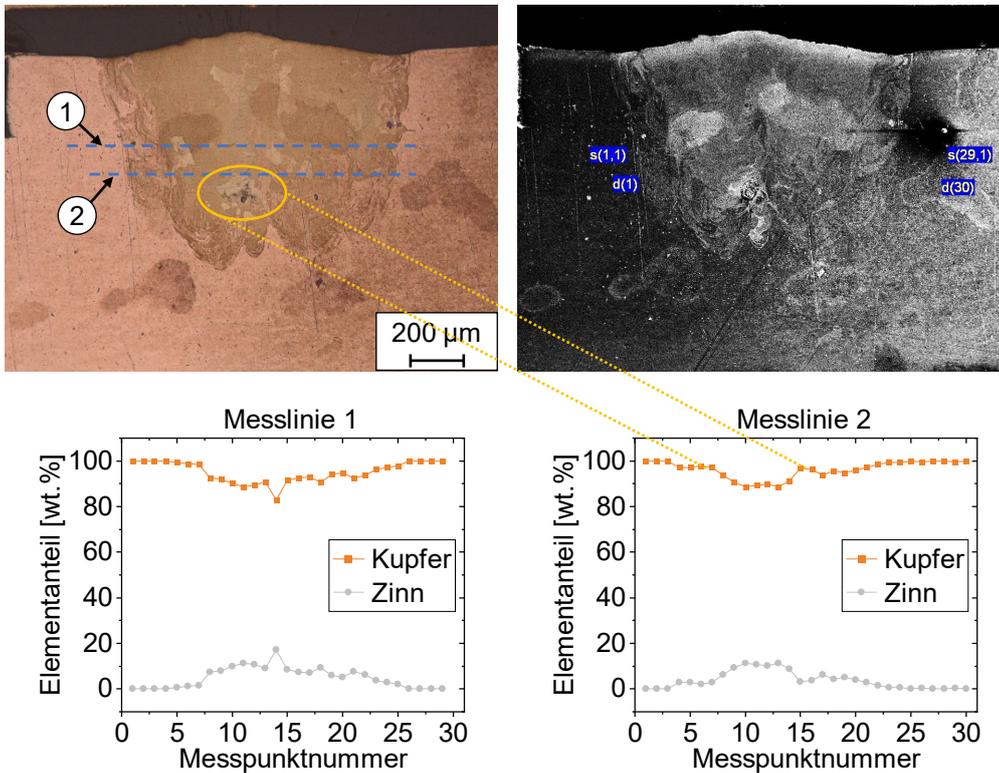


Bild 8. Elementverteilung von Kupfer und Zinn über der Schweißnahtbreite für fünf parallele Schweißnähte im Querschliff.

Die EDX-Analysen der Proben mit zwei und fünf Schweißnähten bestätigen die Beobachtungen der Aufnahmen mit einem Mikroskop. Beim Einsatz von einer Schweißnaht oder zwei parallelen Schweißnähten ist die Durchmischung des Kupfersubstrats und Kupferbändchens mit dem aufplattierten Zinndraht nicht homogen. An mehreren Stellen im wiedererstarteten Schmelzbad können Bereiche mit einem hohen Zinngehalt nachgewiesen werden. Diese Bereiche von ungelöstem Zinn können zu Sollbruchstellen im Material führen und so die mechanische Festigkeit herabsetzen. Für elektrische Anwendungen stellen die Bereiche mit erhöhtem Zinngehalt Widerstände dar, da Kupfer eine 6,5 mal höhere Leitfähigkeit aufweist. Je nach Anordnung der Zinnbereiche in der Anbindungsfläche kann dies zu Temperaturspitzen bei elektrischer Belastung führen. Aus diesen Gründen ist eine homogene Durchmischung der beiden Materialien anzustreben.

4.4 Übertragung der kombinierten Füge­technik in die Anwendung

Für die Übertragung des entwickelten Kombiprozesses stellt BorgWarner Stuttgart GmbH Teile seines eBoosters zur Verfügung. Das Bauteil, welches gleichzeitig als Demonstrator dient, hat ein Aluminiumgehäuse, in welches eine Platine verbaut ist. Ziel ist die Kontaktierung dieser Platine mit dem Aluminiumgehäuse. Um diese Aufgabe zu bewältigen, wird das Kupferbändchen mit dem aufplattierten Zinndraht gewählt. Auf dem Aluminiumgehäuse wird ein Laserstrahlschweißprozess eingesetzt. Auf der Platine befinden sich vorverzinnte Metallisierungen, auf denen das Laserstrahl­lötverfahren zum Einsatz kommt. Für die Ermittlung geeigneter Parameter werden die Laserleistung und die Trajektorie für das Löten und Schweißen variiert.

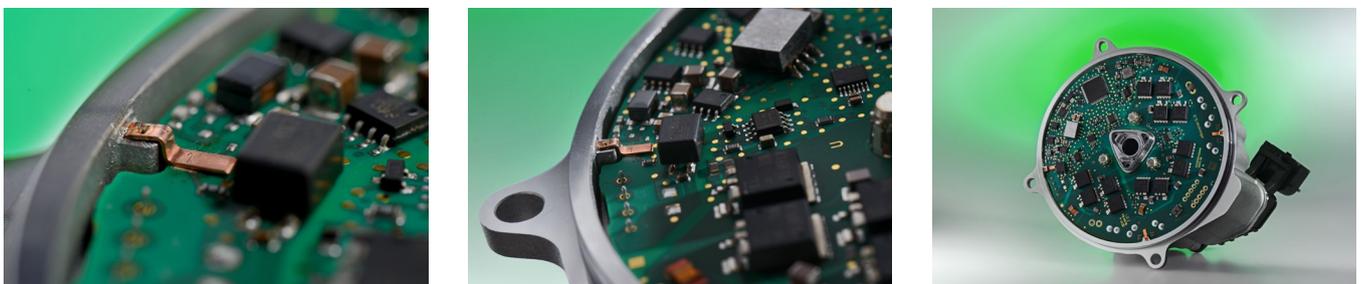


Bild 6. Demonstratorbauteil „eBooster“ – Die Kontaktierung zwischen dem Aluminiumgehäuse und der Platine erfolgt durch den kombinierten Fügeprozess. Auf Seiten der Platine wird ein Laserstrahl­lötprozess eingesetzt, auf dem Aluminiumgehäuse wird das Kupferbändchen geschweißt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes „KomBond – Substratangepasstes kombiniertes Laserstrahllöten- und schweißen von elektrischen Leistungsverbindern für die Leistungselektronik“ werden zunächst die Anforderungen der beiden Einzelprozesse Laserstrahllöten und Laserstrahlschweißen an die Anlagentechnik definiert. Basierend auf diesen Angaben wird eine Anlage konzipiert, aufgebaut und charakterisiert, die einen schnellen Wechsel zwischen den Fügevarianten ermöglicht, ohne die Anlage umzurüsten und ohne das Werkstück mechanisch zu verfahren. Die Prozessentwicklung für beide Fügeprozesse erfolgt mit einem rundum verzinnten Kupferbändchen als Benchmark und einem Kupferbändchen, auf den ein Zinndraht aufplattiert wird. Als Substratmaterial wird für das Löten eine Leiterplatte eingesetzt, für den Schweißprozess ein Kupferplättchen aus Cu-ETP. Das Laserstrahllöten mit örtlicher Leistungsmodulation für beide Bändchenvarianten kann demonstriert werden. Die erzielten Anbindungsquerschnitte sind zufriedenstellend und können durch eine gezielte Anpassung der Lötgeometrie beeinflusst werden. Nachteilig sind die auftretenden Delaminationen in der Leiterplatte, die voraussichtlich durch eine Anpassung der Leiterplatteeigenschaften hinsichtlich der Temperaturstabilität unterbunden werden kann. Das Laserstrahlschweißen der rundum verzinnten Kupferbänder ist reproduzierbar durchführbar. Der im Vergleich zu reinem Kupfer erhöhte Absorptionsgrad des Zinns begünstigt die Energieeinkopplung und damit den Schweißprozess. Die Kupferbändchen mit dem aufplattierten Zinndraht zeigen gegenüber den rundum verzinnten Bändchen eine geringere Absorption der einfallenden Laserstrahlung. Eine homogene Durchmischung von Kupfer und Zinn sollte angestrebt werden, um eine mechanische und elektrische Schwächung der Fügeverbindung durch Zinncluster im erstarrten Schmelzbad zu unterbinden. Dies wird durch die Positionierung von mindestens fünf parallelen Schweißnähten möglich. Die Übertragung des kombinierten Fügeverfahrens auf ein Bauteil eines Automobilzulieferers kann gezeigt werden.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr.: 20.927/ N / DVS-Nr.: 10.3197 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Unser Dank gilt insbesondere auch den Firmen, welche sich im Rahmen des projektbegleitenden Ausschusses engagiert und somit essenziell zum Gelingen des Projektes beigetragen haben.

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schrifttum

- [1] Schneider-Ramelow, M.; Ehrhardt, C.; Höfer, J.; Schmitz, S.: Visuelle und mechanische Prüfung von Drahtbondverbindungen. In: PLUS, 3/2016, S. 532–546.
- [2] Gerlach, G.; Dötzel, W.: Grundlagen der Mikrosystemtechnik; München, 1997
- [3] Kulicke & Soffa: Bonden mit Kupferdraht, Productronic Vol. 10, 2004
- [4] Amorosi, S.; Sidler, T. C.; Salathe, R. P.; Schwob, H. P.; Hertzberg, J. Miya-moto, I.; Ostendorf, A. et al.: Reliable laser micro-spot welding of copper. In: Proceedings of SPIE Vol. 5063 Fourth International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 2003 (5063(1)), S. 1–7
- [5] Ostendorf, A.; Temme, T.; Zeadan, J. (2004): Laser spot welding of electronic micro parts. In: Fifth International Symposium On Laser Precision Microfabrication 5662, S. 306–312.
- [6] Hugger, F.; Weigl, M.; Löffler, N.; Schmidt, M. (2012): Robust Laser Micro Welding of Aluminum and Copper for Vehicle Electrical Systems. In: 2012 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC).
- [7] Moalem, A.; Witzendorff, P. von; Stute, U.; Overmeyer, L. (2012): Reliable Copper Spot Welding with IR Laser Radiation through Short Prepulsing. In: Procedia CIRP 3, S. 459–464. DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.079.
- [8] Schmitt, F. (2012): Laserstrahl-Mikroschweißen mit Strahlquellen hoher Brillanz und örtlicher Leistungsmodulation. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Lehrstuhl für Lasertechnik.
- [9] Häusler, A. (2020): Präzisionserhöhung beim Laserstrahl-Mikroschweißen durch angepasstes Energiemanagement. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Lehrstuhl für Lasertechnik, DOI: 10.18154/RWTH-2021-01569
- [10] Mehlmann, B.; Olowinsky, A.; Thuilot M.; Gillner, A. (2014): Spatially Modulated Laser Beam Micro Welding of CuSn6 and Nickel-plated DC04 Steel for Battery Applications. In: JLMN 9 (3), S. 276–281. DOI: 10.2961/jlmn.2014.03.0019.
- [11] Hailat, M. M.; Mian A.; Chaudhury Z.; Newaz G.; Patwa R.; Herfurth H. (2012): Laser micro-welding of aluminum and copper with and without tin foil alloy. In: Microsystem Technology Vol. 18 S. 103–112
- [12] Petring, D.; Goneghany, V. N. (2011): Parameter Dependencies of Copper Welding with Multi-kW Lasers at 1 Micron Wavelength. In: Physics Procedia 12 S. 95–104
- [13] Haeusler, A.; Mehlmann, B.; Olowinsky, A.; Gillner, A.; Poprawe, R.: Efficient Copper Microwelding with Fibre Lasers using Spatial Power Modulation, In Lasers in Eng., 2017, S. 133 – 146
- [14] J. Helm, A. Meise, A. Olowinsky, "Combined laser beam soldering and welding process for electrical contacting," Proc. SPIE 11674, Laser-based Micro- and Nanoprocessing XV, 116741C (5 March 2021); doi: 10.1117/12.2577578

