

Aluminium Mikroflachdrähte und ihre Anbindung an Kupferbauteile

Hertweck, B. (1,2); Seeger, C. (1); Hess, K. (2)

Mikroflachdrähte im Dickenbereich von $d = 35 \dots 350 \mu\text{m}$ nehmen in der Miniaturisierung, dem Leichtbau und der Mikroelektronik einen immer größer werdenden Stellenwert ein. Beispiele sind Transportleitungen für empfindliche Signale im Bordnetz oder die Kontaktierung von einzelnen Zellen in Batteriepaketen für Power Tools. In Batterien für den Automotive Sektor sind darüber hinaus auch zahlreiche Sensorelemente über Flachdrähte kontaktiert. Bei vielen Anwendungen kann sich aus Kostengründen eine Ausführung des Drahts aus Aluminium lohnen. Jedoch ist dann meist eine Kontaktierung auf einem Fügepartner aus einem Kupferwerkstoff notwendig, da die Anschlüsse der meisten elektronischen Bauteile oder Batterien aus Kupfermaterialien ausgeführt sind.

Aluminium als Drahtwerkstoff: Eine wirtschaftliche Motivation

Runddraht aus Aluminium ist in guter Qualität am Markt verfügbar. Dieser wird aus Gießwalzdraht hergestellt und durch Ziehen auf den gewünschten Ausgangs-

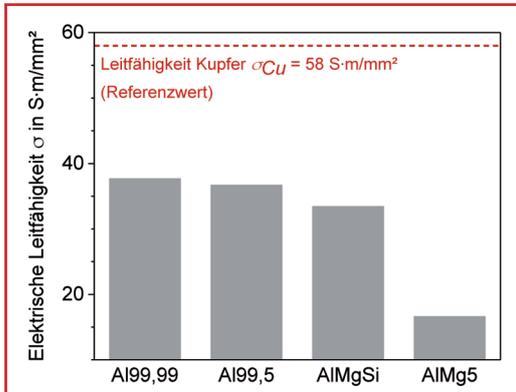


Bild 1: Darstellung der Leitfähigkeit von verschiedenen Aluminiumflachdrähten im Vergleich zu Kupfer

durchmesser für das nachfolgende Walzen gebracht. Werkstoffe mit Relevanz für elektrische Anwendungen sind die Reinaluminiumsorten Al99,5 oder Al99,7. Für höchste Leitfähigkeitsanforderungen, bspw. bei der Kontaktierung von Bauteilen aus der Leistungselektronik, sind Reinstaluminiumsorten wie Al99,99 von Bedeutung. Des Weiteren kommt innerhalb der niedriglegierten Werkstoffe vor allem AlMgSi bei Anwendungen mit starken Vibrationen oder höheren Dauerfestigkeitsanforderungen zum Einsatz. [1] Die Leitfähigkeit des Reinaluminiums beträgt im Vergleich zu den Reinkupfer-

sorten nur ca. 64 % (s. Bild 1). Im Drahtbereich lässt sich dieser Nachteil jedoch durch die Erhöhung des Querschnitts kompensieren. Aufgrund der geringen Dichte des Aluminiums, die nur 30 % des Wertes von Kupfer beträgt, ist hiermit immer noch eine Masseinsparung von ca. 50 % verknüpft, wie in Bild 2 dargestellt. [2] Aufgrund des aktuellen Rohstoffpreises von Kupfer ergibt sich hinsichtlich des Materialpreises bei der Verwendung von Aluminiumdraht gegenüber Kupfer eine Einsparung von 70 % (Stand April 2020). Dabei ist jedoch zu beachten, dass aufgrund des komplizierten Fließverhaltens von Aluminium der Verarbeitungspreis höher liegt, dennoch kann von einer Preisersparnis um einen Faktor drei bis vier ausgegangen werden.

Die untere Grenze der Drahtdicke für Mikroflachdraht aus Aluminium und rele-

vanten Knetlegierungen liegt im Bereich $d = 35 \mu\text{m}$. Unter wirtschaftlichen Aspekten sind Dicken-zu-Breiten-Verhältnisse bis max. 50 sinnvoll. Der Produktionsprozess ist dem in [3] beschriebenen Verfahren für Kupferdrähte ähnlich. Jedoch erfordert der Werkstoff Aluminium eine andere Kühlmittelstrategie. Ebenso ist das besondere Fließverhalten und die schlechtere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Kupfer zu berücksichtigen.

Limitierungen beim Einsatz von Aluminium

Neben den oben genannten Vorteilen, sind die Nachteile beim Einsatz von Aluminium und seiner Verarbeitung in technischen Anwendungen in der Literatur bereits ausführlich beschrieben [1,4]:

- Aluminium zeigt eine hohe Neigung zum Fließen und Kriechen.
- Aluminium ist chemisch hoch reaktiv und bildet unter Atmosphäre in Nanosekunden eine natürliche, dicht gepackte Passivierungsschicht auf Oxidbasis. Bei längerer Auslagerungszeit bildet sich eine dickere amorphe Aluminiumoxidschicht darüber aus.
- In der elektrochemischen Spannungsreihe liegt Aluminium im stark negativen Bereich und zeigt damit besonders schlechte Voraussetzungen für Kontaktkorrosion.
- Erzeugung schmelzflüssiger Phasen erfordert aufgrund hoher Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität stark konzentrierte Wärmequellen.

Besonders bei der Kontaktierung haben diese Faktoren zur Folge, dass über den Produktlebenszyklus die Stabilität der Verbindung des Aluminiumflachdrahtes

Merkmal des Materials	Reinaluminium	Reinkupfer
Bezeichnungen	Al99,5 (EN AW-1050A)	Cu-ETP (CW004A)
Reinheit	c(Al) = 99,0 ... 99,5 %	c(Cu) ≈ 99,9 %
Dichte ρ in $10^3 \cdot \text{kg}/\text{m}^3$	2,70	8,93
Spez. el. Widerstand ρ in $10^{-2} \cdot \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	2,65	1,72
Exemplarische Flachdrahtherstellung		
Widerstand pro Meter in mΩ	90	90
Querschnitt (d · b) in mm²	0,260 · 1,200	0,166 · 1,200
Masse pro Meter in g	0,96	2,12
Rohstoffpreis in €/kg (Stand April 2020)	1,35	4,54
Materialkosten pro laufender Meter in €	0,0013	0,0096
Querschliff des Drahts		
Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Aluminium benötigt mehr Bauraum (+36 %). • Verwendung von Aluminium führt zu Gewichtseinsparung (-50 %). • Die Materialkosten reduzieren sich um -70 %. • Produktpreis lässt sich nicht so stark reduzieren. 	

Bild 2: Überblick über die Vorteile von Aluminium im Vergleich zu Kupfer

zum Kupferbauteil negativ beeinflusst wird. Beispiele für das Belastungsprofil solcher Verbindungen sind Luftfeuchtigkeit, Temperaturwechsel oder Vibrationen. [5]

Das Fließverhalten von Aluminium sorgt bei Schraubverbindungen oder anderen kraftschlüssigen Verfahren zunächst für einen Kraftabbau, aber auch zur Oxidschichtbildung in der Grenzzone. Schlussendlich führt dies zu einem Anstieg des Kontaktwiderstands. Die mechanische Belastung in der Fügestelle sollte deshalb durch eine geeignete Wahl der Stoßgeometrie minimiert werden. [6]

Die Passivierungsschicht des Aluminiums mit ihrem hohen Schmelzpunkt bei $T_s \approx 2.200 \text{ °C}$ sorgt bei Fügeverfahren die auf einer schmelzflüssigen Phase basieren zu Problemen in der Schmelzbaddynamik, da die Schmelztemperatur des Aluminium-Grundwerkstoffs bereits bei $T_s \approx 660 \text{ °C}$ liegt. Darüber hinaus sollten Oxide aus der Fügezone entfernt werden, da ihr Vorhandensein die Langzeitstabilität negativ beeinflusst. [1,4]

Die elektrochemischen Eigenschaften des Aluminiums, die im Normalpotential des Werkstoffs abgebildet werden, sorgen in Gegenwart eines Elektrolyten an der Fügestelle zu anderen Metallen zu starker Kontaktkorrosion. Im Falle der Materialpaarung Kupfer und Aluminium liegt die Differenz im Normalpotential bei $E = 2,01 \text{ V}$. Diese Korrosion kann bspw. durch eine Metall- oder Kunststoff-Kapselung der Fügestelle vermieden werden.

Die Fügeaufgabe wird durch einen weiteren werkstofftechnischen Faktor erschwert. Das Aluminium-Kupfer-Legierungssystem weist eine hohe Anzahl von spröden Phasen auf. Bergmann et al. [7] zeigen kritische und günstige Phasen im Phasendiagramm auf.

Somit ist bei Fügeverfahren, die eine schmelzflüssige Phase erzeugen, eine genaue Einstellung des Schmelzbades notwendig, um möglichst wenige Phasen mit hohem Kupferanteil zu erhalten. Diese Phasen zeichnen sich durch hohe Sprödigkeit aus, die sich negativ auf die Langzeiteigenschaften der Verbindung auswirken. Des Weiteren zeigen diese meist intermetallische Phasen unter Temperaturbelastung ein räumliches Wachstumsverhalten. [1,4,5,6]

Den in Kapitel 1 beschriebenen Vorteilen stehen die oben genannten technologischen Nachteile gegenüber. Diese können jedoch wie in Kapitel 2 bereits angedeutet

durch sinnvolle Prozessentwicklungen in der entsprechenden Fertigungstechnik überwunden werden. Insbesondere bei größeren Draht- und Kabelabmessungen hat sich der Einsatz von Aluminium bereits in verschiedenen Anwendungen gegenüber Kupfer durchgesetzt. Walzplattierte Kupfer-Aluminium Materialien sind als Halbzeug für Stanzteile etabliert. Die Firma Kostal hat im Jahr 2017 ein Crimpverfahren vom Aluminium-Litzenleiter auf einen Kupfersteckverbinder vorgestellt [8]. Des Weiteren sind Bordnetz-Konzepte vorgestellt, die auf einer Hochstromleitung aus Aluminium basieren [9]. Für Kupfer-Flachkabel wurde eine Feder-Klammer-Direktkontaktierung entwickelt, die jedoch noch nicht industriell etabliert ist, jedoch auch für Aluminiumdrähte hohes Potential aufweist. [10].

Im Bereich der Li-Ionen-Zelle ist eine Verbindung von Kupfer auf Aluminium technisch erforderlich, da die Elektroden aus Kupfer und Aluminium bestehen müssen. Im Automotive Sektor sind die Bestrebung auch bei kleineren Drahtquerschnitten Kupfer durch Aluminium zu ersetzen bereits seit Jahren erkennbar. Bei größeren Abmessungen fällt der oben beschriebene Gewichtungsfaktor stärker ins Gewicht, aber für kleinere Abmessungen werden vor allem die Vorgaben aus den CO₂-Regulierungen den Innovationsdruck erhöhen. [11]

Diskussion der Schweißtechnologien

In diesem Artikel werden nun aufgrund der niedrigen Fließgrenze des Aluminiums nur stoffschlüssige Verfahren beschrieben. Kraftschlüssige Systeme sind auf konstruktive Art, z. B. durch die oben erwähnten Federklemmen zu lösen. Dabei steht hier nicht die Entwicklung neuer Fügeverfahren im Fokus, vielmehr wird die Anwendung von Fügeverfahren beschrieben, die in ähnlichen Bereichen bereits etabliert sind.

Laserstrahlschweißen

Laserstrahlschweißen von Buntmetallen wie Kupfer oder Aluminium ist bereits seit Jahren ein etabliertes Verfahren in vielen Anwendungsbereichen. Dies ist vor allem durch die fokussierte Wärmequelle zu begründen, da damit nur geringer Verzug und Eigenspannungen induziert werden. Weitere Vorteile sind u. a. die hohe Automatisierbarkeit, hohe Prozessgeschwin-

digkeiten oder die geringen Fügekräfte. [12]

Dieses Verfahren beruht jedoch auf der Bildung einer schmelzflüssigen Phase im Schweißprozess. Damit ist die Entstehung spröder Werkstoffphasen direkt während des Schweißprozesses oder unter späterer Temperaturbelastung ein kritischer Faktor. Zur Zeit werden verschiedene Ansätze in der Forschung verfolgt, die das Auftreten dieser Phasen verhindern. Bei Strahlquellen im infraroten Bereich mit Laser-Wellenlängen um $\lambda \approx 1.060 \dots 1.070 \text{ nm}$ werden häufig Zusatzwerkstoffe verwendet, die metallurgisch geeignetere Phasenräume begünstigen. Darüber hinaus wird mittels Pulsformung versucht, die Vermischung des Schmelzbades zu optimieren. [5]

Ein weiterer Ansatz findet sich in strahlseitigen Modifikationen. So führen beispielsweise sichtbare Wellenlängen, im Wesentlichen grüne oder blaue Strahlung, zu stabileren Schweißprozessen von Kupferwerkstoffen, da dort eine effiziente Einkopplung der Strahlung in die Werkstoffoberfläche stattfindet. Somit ist eine Einkopplung über den Fügepartner aus Kupfer prozesssicher möglich, womit auch ein Wärmeleitungsschweißen ermöglicht wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung eines Lichtleiterkabels (TRUMPF Brightline) mit Leistungsvariation über den Laserspotquerschnitt. So können beispielsweise Spritzer reduziert, Schweißgeschwindigkeit erhöht oder Lichtleistung reduziert werden. [13]

Für die hier beschriebene Anwendung wurde zunächst aus wirtschaftlichen Gründen als Strahlquelle ein Faserlaser bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1.064 \text{ nm}$ verwendet. Dabei erfolgt die Einkopplung über den Aluminiumdraht, da dieser im Überlappstoß auf der Strahl-zugewandten Seite liegt. Bei dieser Anordnung wird dann der Prozess so gewählt, dass beim Schweißprozess primär der Aluminiumdraht aufgeschmolzen wird. Somit liegt ein Mischprozess aus Schweißen und Löten vor. Eine geringe Anschmelzung des Kupfers ist jedoch nicht zu verhindern, aufgrund der guten Wärmeleitungseigenschaften beider Metalle. Um den Wärmeeintrag in das Bauteil zu minimieren wird eine gepulste Strahlquelle verwendet.

Bei der experimentellen Machbarkeitsprüfung liegen folgende Materialkombinationen vor:

- Aluminium
 - A199,5 / EN AW 1050A
 - Festigkeit: $R_m = 130 \text{ MPa}$

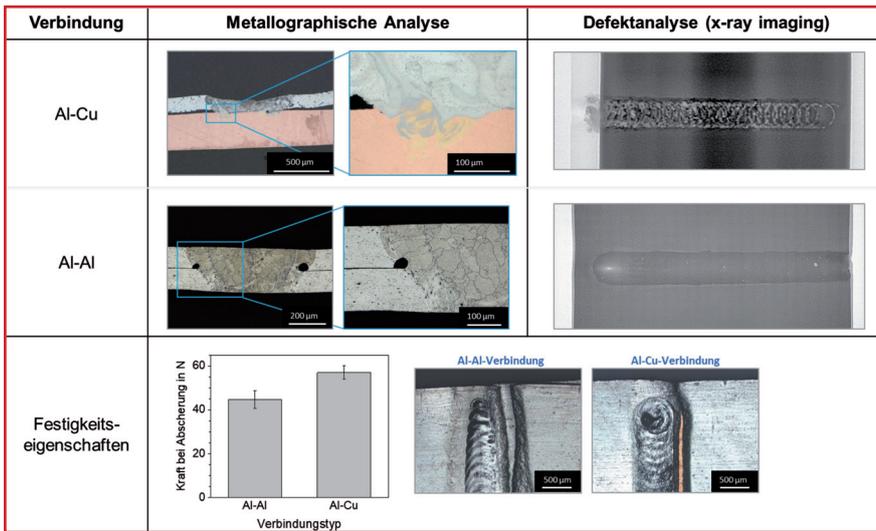


Bild 3: Darstellung der Resultate der Versuche zum Laserschweißen

- Querschnitt: b = 5,5 mm und d = 0,10 mm
- Kupfer
 - Cu-ETP1 / CW003A
 - Festigkeit: $R_m = 250$ MPa
 - Querschnitt: b = 5,0 mm und d = 0,25 mm

Dabei wird neben der Mischverbindung auch eine Al-Al-Verbindung als Referenz hergestellt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Bild 3 gezeigt. Im Schliffbild ist zu erkennen, dass sich nur eine geringe Mischphase einstellt. Das Auftreten von Defekten ist in der Al-Cu-Mischverbindung gering, wie in der Röntgenbildgebung (Absorptionsmessungen / Cheetah / YXLON International GmbH) zu sehen ist. Hier sind ebenfalls die geringen Materialmischungen zu sehen, da die Helligkeitswerte nur schwach schwanken. In den Vergleichsbildern der Al-Al-Verbindung sind die für Aluminiumschweißungen typischen Poren deutlich zu erkennen. Im Scherzugversuch (Z005; AllroundLine mit makroXtens Extensometer / Zwick GmbH & Co KG) zeigen sich sehr gute Festigkeitseigenschaften, da die Probe in der Wärmeinflusszone reißt. Das vierpolige Quotienten-Messverfahren nach Kelvin wurde eingesetzt, um die Einflüsse von Leitungs- und Anschlusswiderständen zu vermeiden (Stetter Elektronik / MICROHM 400).

In diesen Grundlagenversuchen konnten gute Ergebnisse umgesetzt werden. Jedoch kann die Verbindungszone mit den Mischphasen weiter optimiert und verkleinert werden. Dies erfolgt im Regelfall durch Einbeziehung der Drahtspezifika, neben den Drahtabmessungen sind hier auch Wärmebehandlungszustand und Alterung relevant. Da Prozessparameter wie

Laserleistung, Prozessgeschwindigkeit oder die räumliche Anordnung der Fügepartner eine zentrale Rolle spielen, ist für einen spezifischen Prozess bspw. für den Automotive Sektor eine maßgeschneiderte Prozessentwicklung ausgehend von diesen Grundlagenuntersuchungen notwendig. Auch das Alterungs- und Korrosionsverhalten sind hier als zentrale Anforderungen zu nennen.

Wie oben angedeutet eröffnen Laserstrahlquellen im sichtbaren Bereich einen weiteren Freiheitsgrad in der Fügeanordnung, da hier eine sehr definierte Einkopplung in das Kupfer möglich wird und auf diese Weise ein sehr stabiler Prozess entstehen kann [13]. Dies ist in Bild 4 illustriert. Auch für die weitere Optimierung und Anpassung dieses Prozesses ist eine spezifische Entwicklung notwendig.

Elektronenstrahlschweißen

Ein weiteres Strahlverfahren mit hoher Eignung für Mischverbindungen mit zusätzlichen Anforderungen an Verzug und Eigenspannungen, stellt das Elektronenstrahlschweißen dar, da im Vergleich zum Laserstrahlschweißen hier der Wärmeeintrag stärker fokussiert ist. Somit sind die Randbedingungen für die hier

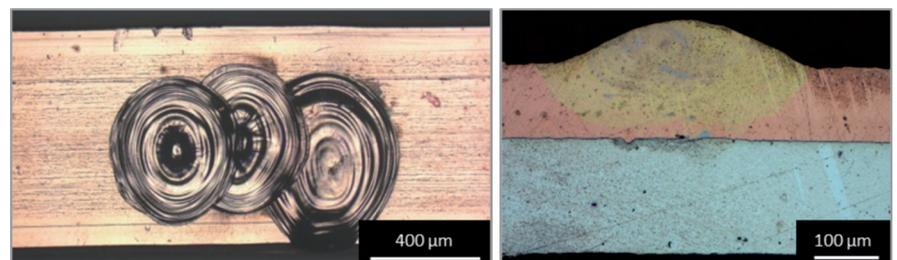


Bild 4: Schweißversuche mit einem gepulsten Schweißlaser mit grünem Laserlicht

beschriebene Fügeaufgabe erfüllt. Ein limitierender Faktor bei diesem Verfahren stellt die Notwendigkeit einer Vakuumkammer dar. Eine detaillierte Beschreibung des Prozesses findet sich in [14].

Um die Anwendbarkeit des Verfahrens zu zeigen, wurden folgende Automotive-typischen Parameter gewählt:

- Aluminium
 - Al99,5 / EN AW 1050A
 - Festigkeit: $R_m = 130$ MPa
 - Querschnitt: b = 1,2 mm und d = 0,26 mm
- Kupfer
 - Cu-ETP1 / CW003A
 - Festigkeit: $R_m = 250$ MPa
 - Querschnitt: b = 5,0 mm und d = 0,25 mm

In der Analyse der Proben zeigt sich eine sehr hohe Homogenität der Verbindung wie in Bild 5 zu sehen ist. Des Weiteren kann durch den konzentrierten Elektronenstrahl eine sehr gering ausgeprägte Verbindungszone erzeugt werden. Die Qualität der Verbindung konnte durch eine hohe Festigkeit im Scherzugversuch gezeigt werden. Die Probe reißt außerhalb der Schweißnaht in der Wärmeinflusszone.

Pressschweißverfahren

Aufgrund des geringen Wärmeeintrages wachsen die Applikationen für Pressschweißverfahren in verschiedenen Bereichen der Elektronik, auch im Automobilbereich. Beispiele hierfür sind Schweißungen von Batterieverbindern, Litze-Draht-Verbindungen im Bordnetz oder die Kontaktierung von leistungselektronischen Bauteilen. Neben artgleichen Verbindungen, sind diese Verfahren auch für Mischverbindungen wie Stahl-Aluminium, Stahl-Kupfer oder Aluminium-Kupfer geeignet, als Hauptgrund dafür ist die Vermeidung einer schmelzflüssigen Phase zu nennen. In diese Verfahrensklasse lassen sich z. B. das Reibschweißen, das Rührreibschweißen oder das Magnetimpulsschweißen einordnen. [6,15]

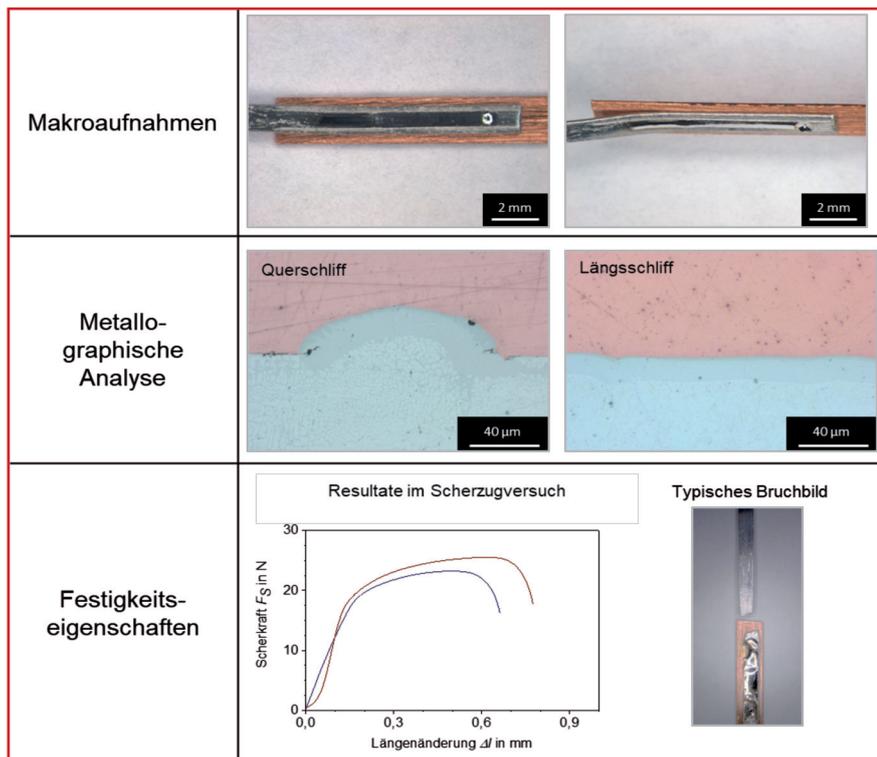


Bild 5: Ergebnisse der Machbarkeitsversuche zum Elektronenstrahlschweißen von Aluminium-Mikroflachdrähten

Ein wichtiges Verfahren im Bereich Draht findet sich im Ultraschallschweißen. Im Bereich der massiven Stromleiter ist dieses Verfahren bereits im Automobilbereich etabliert. Aufgrund der auftretenden Fügekräfte ist jedoch beim Schweißen von Mikroflachdrähten auf eine geeignete Spannvorrichtung Wert zu legen. Vorteile dieser Technologie lassen sich in der Flexibilität hinsichtlich verschiedener Stoßanordnungen finden. Durch die Ultraschallvibration, welche die Energiequelle darstellt, wird auch die Oxidhaut des Aluminiums zerstört. Somit liegen sehr gute Voraussetzungen für elektronische Anwendungen vor. Um das breite Anwendungsspektrum des Verfahrens zu zeigen, wurde neben Kupfer auch Messing als Fügepartner getestet:

- Aluminium
 - Al99,5 / EN AW 1050A
 - Festigkeit: $R_m = 130$ MPa
 - Querschnitt: $b = 1,2$ mm und $d = 0,26$ mm
- Kupfer
 - Cu-ETP1 / CW003A
 - Festigkeit: $R_m = 255$ MPa
 - Querschnitt: $b = 1,2$ mm und $d = 0,17$ mm
- Messing
 - CuZn37 / CW508L
 - Festigkeit: $R_m = 345$ MPa
 - Querschnitt: $b = 2,0$ mm und $d = 0,2$ mm

Dabei konnte eine sehr gute Kontaktierung realisiert werden, was sich in den Schliffbildern, Scherzugversuchen und Messungen der elektrischen Leitfähigkeit zeigte.

Mittels Materialkontrast lässt sich im REM die klare Trennlinie zwischen den beiden Fügepartnern erkennen, wie in Bild 7 zu sehen ist. Dabei ist die Anbindung als gut einzustufen, da die Schweißnähte im Scherzugversuch kein Versagen zeigen.

Abschließend lässt sich sagen, dass bei einer guten räumlichen Zugänglichkeit das Ultraschallschweißen für Drahtkontaktierungen eine sehr hohe Eignung mit sich bringt. Aufgrund der eingebrachten Vibrationsbelastung sollte allerdings die Fügeumgebung keine sensiblen Bauteile enthalten. Weitere Vorteile sind natürlich die geringe thermische Belastung und die gute Automatisierbarkeit bei vergleichsweise geringen Anlagenkosten.

Aktuell finden zahlreiche Forschungsarbeiten zu diesem und verwandten Verfahren sowie diesen Materialkombinationen statt. Beispielsweise lassen sich die duktilen Eigenschaften der Verbindungszone sowie die elektrische Leitfähigkeit der Schweißnaht durch eine ergänzende Temperatursteuerung während des Prozesses verbessern, wie in [6] bei einem Diffusionsschweißen gezeigt wurde.

Durch gezielte Oberflächenmodifikationen der Fügepartner kann die Verbindungsfestigkeit weiterhin eingestellt werden [16].

Diskussion der Sonderverfahren

Neben den beschriebenen Schweißverfahren kommt dem Kleben sowie dem Löten von elektrischen Verbindungen

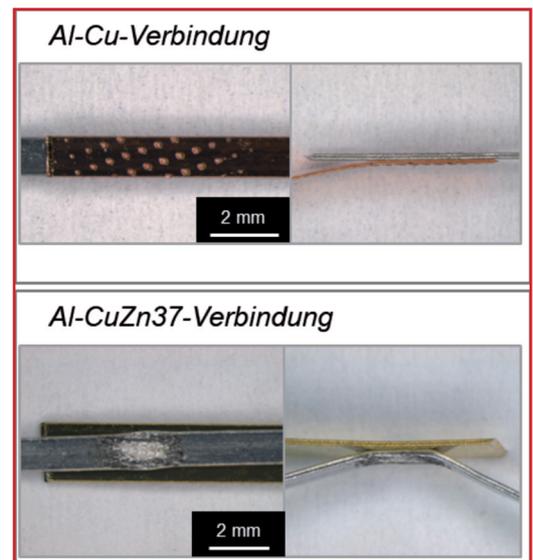


Bild 6: Makroaufnahme von Ultraschallschweißungen eines Aluminiumdrahtes auf einen Kupfer- und Messingdraht

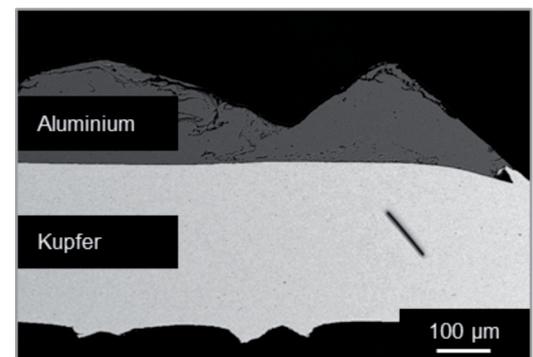


Bild 7: REM-Aufnahme einer Aluminium-Kupfer-Ultraschallschweißung mittels Materialkontrast

höhere Bedeutung zu. Prinzipiell ist hierbei jedoch die Verwendung eines Zusatzwerkstoffs erforderlich, welcher auch die Temperaturbeständigkeit bestimmt. Dem gegenüber stehen prinzipielle Verfahrensvorteile, so werden beispielsweise nur geringe Fügekräfte benötigt. Eine Oberflächenvorbehandlung muss bei beiden Verfahren jedoch durchgeführt werden, damit die Reproduzierbarkeit gewährleistet wird.

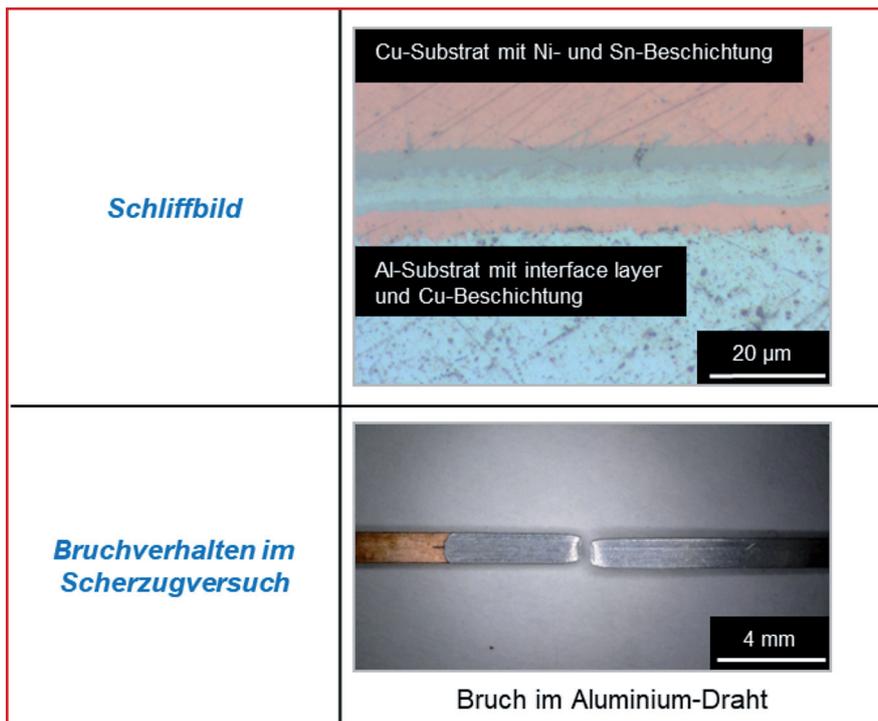


Bild 8: Ergebnisse der Lötversuche mit galvanisch beschichteten Drähten

Löten

Die Vorteile eines Lötverfahrens können bei verschiedenen Randbedingungen zum Tragen kommen. Es lassen sich z. B. viele Kontaktierungsstellen parallel verarbeiten, wenn zusätzlich die Möglichkeit besteht, ein Lotdepot anzubringen. Zusätzlich lassen sich eine Vielzahl von Materialpaarungen mit diesem Verfahren fügen. Dabei ist von guten elektrischen Eigenschaften und entsprechender Alterungsbeständigkeit auszugehen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Lotdepots mittels galvanischer Beschichtung

aufgebracht. Dies stellt für Drähte einen industriell etablierten Prozess dar und ist vor allem im Kontext der Steckverbinder relevant. Es wurden verschiedene Lotwerkstoffe betrachtet. Das Aluminium wurde zunächst von der Oxidschicht befreit und mit einer dünnen metallischen Schicht überzogen. Nachfolgend ist eine Nickelsperrschicht als Diffusionsbarriere, die den Transport von Grundmaterial in die Fügezone verhindert, notwendig [17]. Ebenso wirkt sie als Sperrschicht für Sauerstoff aus der Umgebung im Belastungsfall. Als Lotmaterial wurde dann Zinn ebenfalls galvanisch abgeschieden. Die Alternative Heißtauchverzinnen ist an dieser Stelle ebenfalls denkbar. Eine weitere Möglichkeit lässt sich im Zwei-Strahl-Laserstrahlloten finden, welches jedoch eine aufwendige Anlagentechnik erfordert. Dabei wird mit einem gepulsten Laser die Oxidschicht entfernt, mit einem zweiten Dauerstrichlaser dann das Lot aufgebracht [18]. In dieser Studie konnte eine sehr gute Verbindung durch eine Kolbenlötung im Labormaßstab realisiert werden. Bild 8 zeigt exemplarisch die Ergebnisse einer Material- und Lotkombination. Die Verbindungsfestigkeit lag in der Größenordnung einer Schweißverbindung, da auch hier kein Bruch in der Lötstelle erfolgte, sondern im Al-Draht. Die elektrische Leitfähigkeit lag ebenfalls im Bereich der Schweißverbindung. Jedoch ist bei der

Beschichtung von Kupfer auch ein Aktivierungsschritt anzuwenden.

Kleben

Klebverbindungen sind beispielsweise bei der Kontaktierung in der Photovoltaik von wachsender Bedeutung. Aber auch in der Leistungselektronik sind entsprechende Kontaktierungstechnologien Gegenstand der Forschung, die sich beispielsweise mit der Erhöhung der Alterungsbeständigkeit beschäftigen. Da viele Klebstoffe unter Raumtemperatur aushärten, wird in den meisten Fällen keine Wärmeeinflusszone erzeugt. Als Vorteile dieser Technologie kann die gute Automatisierbarkeit genannt werden. Berücksichtigt werden muss eine geeignete Probenvorbehandlung, die eine gute Benetzung der Oberfläche ermöglicht. Auch bei diesem Verfahren können zahlreiche Materialkombinationen miteinander verbunden werden, da keine Mischphase erzeugt wird. Die elektrische Leitfähigkeit der Verbindung wird dabei durch Beimischung von elektrisch leitfähigen Partikeln in den Klebstoff erzeugt. Der leitfähige Anteil ist dadurch jedoch begrenzt, da das Polymer die mechanische Verbindungsfestigkeit trägt. Insgesamt gibt es eine hohe Anzahl von verschiedenen Klebern, die sich hinsichtlich des Anforderungsprofils unterscheiden lassen.

Im experimentellen Teil (s. Bild 9) konnte gezeigt werden, dass eine sehr hohe Verbindungsfestigkeit erzielt werden kann. Im Scherzugversuch erfolgte der Bruch im Draht, nicht in der Fügestelle. Jedoch ist ein nicht zu vernachlässigender Übergangswiderstand sowie ein drastischer Anstieg dieses Widerstands in Auslagerungstests für die Aluminium-Aluminium-Verbindung festzustellen.

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Strahlverfahren eine sehr hohe Eignung für die beschriebene Fügeaufgabe zeigen. Jedoch sind hier aufwendige Prozessentwicklungen notwendig um eine minimale Vermischung der Fügepartner zu gewährleisten. Vor allem für Bauteile mit schlechter Zugänglichkeit und für vibrationsempfindliche Teile sind diese Verfahren empfehlenswert.

Die Erzeugung von Kontaktierungen mittels Kleben oder Löten kann unter geeigneten Rahmenbedingungen wie geringer Toleranz gegenüber Wärmeeintrag sinnvoll sein.

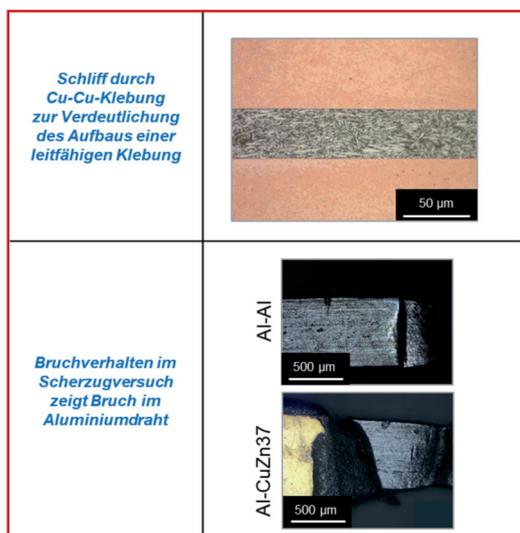


Bild 8: Schema einer Klebverbindung und Bruchverhalten im nicht ausgelagerten Zustand

Unter den Reibschweißverfahren hat sich vor allem das Ultraschallschweißen als sehr geeignet gezeigt. Bei großen Querschnitten ist dieses Verfahren bereits etabliert. Von Nachteil sind Zugänglichkeit, mechanische Belastung während des Fügens und eine relativ hohe Prozessdauer. Besondere Bedeutung im F&E-Bereich kommt dem Rührreibpunkt- und dem diffusionsbasierten Schweißen als Alternative zu [6,15]. Wird hier eine Möglichkeit gefunden, die Fügekräfte im Draht aufzunehmen hat auch dieses Verfahren zukünftig Potential. Fügen durch Umformen, wie beispielsweise beim Clinchen wird sich in Zukunft auch im Bereich der Miniaturisierung durchsetzen.

Acknowledgement

Wir bedanken uns bei folgenden Firmen und Instituten für die Durchführung von Versuchen, kompetente Beratung und interessante Diskussionen: Fachgebiet Trennende und Fugende Fertigungsverfahren der Universität Kassel, Telsonic AG, John P. Kummer GmbH, TRUMPF Laser GmbH.

Literatur

[1] C. Kammer, Aluminium Taschenbuch 1, Beuth Verlag, Berlin 2011.
 [2] H.-J. Bargel, G. Schulze, Werkstoffkunde, Springer Verlag GmbH, Berlin 2012.
 [3] B. Hertweck et al., Optimierung der Flachdrahtherstellung mittels Finite-Element-Analyse – Teil 1: Erstellung eines validen Modells, METALL 72 (11) 2018.
 [4] F. Ostermann, Anwendungstechnik Aluminium, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2017.
 [5] M. Weigl et al., Enhancing the Ductility of Laser-Welded Copper-Aluminum Connections by using Adapted Filler Materials, Physics Procedia (12) 2011.
 [6] A. Regensburg et al., Rührreibpunktschweißen von Aluminium-Kupfer-Verbindungen unter Nutzung der eutektischen Reaktion, Metall 72 (11) 2019.
 [7] J. P. Bergmann et al., Prozess- und werkstofftechnische Aspekte beim Fügen von Aluminium-Kupfer-Verbindungen für Bordnetzanwendungen, Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil, Ludwigsburg 2017.
 [8] U. Pitzul, Automobiltaugliche Crimpverbindungen für Aluminium, Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil, Ludwigsburg 2016.
 [9] O. Drühm, Ein erster Schritt in die Zukunft des Bordnetzes, Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil, Ludwigsburg 2016.
 [10] M. Spahr, Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetze, Meisenbach Verlag, Bamberg 2017.

[11] W. Kull, The wiring harness for the world's biggest car platform, ELIV Baden-Baden 2015.
 [12] U. Dilthey, Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006.
 [13] M. Beranek, The laser as the right tool for E-Drive production International Electric Drives Production Conference, Schweinfurt 2018.
 [14] C. Otten et al., Electron beam welding of aluminum to copper: mechanical properties and their relation to microstructure, Weld World 60 (21-31) 2016.
 [15] J. P. Bergmann et al., Diffusionsbasiertes Fügen von Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen durch kontrollierte Bildung eines Eutektikums, Metall 70 (11) 2016.
 [16] F. W. Müller et al., Untersuchungen zum Störeinfluss von Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften auf Cu-Cu Metall-Ultraschallschweißverbindungen, METALL 73 (11) 2019.
 [17] S. Schlegel et al., Wirkung von Oxiden auf das Verhalten von stromführenden Verbindungen mit galvanisch versilberten Leitern aus Kupfer und Aluminium – Ein Vergleich, METALL 71 (3) 2017.
 [18] D. Donst et al., Flussmittelfreies Laserstrahl-löten von Aluminium, wt Werkstattstechnik online 99 (6) 2009.

(1) Bruker-Spaleck GmbH, Weilerstrasse 30, 78739 Hardt
 (2) Hugo Kern und Liebers GmbH & Co. KG, Dr.-Kurt-Steim-Straße 35, 78713 Schramberg



GIESSEREI Jahrbuch 2020

Die aktuelle Ausgabe des bewährten Jahrbuchs liefert umfassende Informationen zur Gießerei-Branche, mit Ansprechpartnern, Fachbeiträgen, statistischen Kennzahlen und Weiterbildungsmöglichkeiten. Einen Schwerpunkt im Band 1 bilden ingenieurtechnische Fachberichte zu unterschiedlichen Schwerpunktthemen der Gießerei-Industrie. Band 2 des Jahr-

buches erfüllt die Rolle eines umfassenden Branchenverzeichnisses. Mit seinen alphabetischen Firmen- und Stichwortverzeichnissen sowie dem ausführlichen Bezugsquellenverzeichnis hilft dieser Band bei der Suche nach passenden Geschäftspartnern, Produkten und Dienstleistungen aus allen Bereichen der Gießerei-Produktion.

DVS Media 2019, 31,00 Euro, 274 + 52 S., br. ISBN: 978-3-96144-083-2

JAHRBUCH STAHL+TECHNIK 2020

Dieses Jahrbuch bietet aktuelle Themen der Stahlbranche, redaktionelle Fachkompetenz und ein umfassendes Firmen- und Lieferverzeichnis. Es ist damit ein wertvolles Nachschlagewerk mit Kenndaten zu Stahlwerken und Stahlerzeugern sowie statistischen Wirtschaftsangaben für das In- und Ausland. Die Redaktion der Fachzeitschrift STAHL+TECHNIK hat für den redaktionellen Teil des Jahrbuchs die wichtigsten redaktionellen Berichte der Zeitschriftenausgaben des Jahres 2020 zusammengestellt. Fachleute im Stahleinkauf, der Stahltechnik und aus dem Bereich der Administration schätzen am integrierten

Firmen- und Lieferverzeichnis vor allem dessen anwenderfreundliche Gliederung. Sie garantiert ein rasches Finden aller benötigten Informationen – von Erzeugnissen der Eisen- und Stahlindustrie, der weiterverarbeitenden Industrie sowie der Zulieferindustrie.

DVS Media 2019, 31,00 Euro, 240 S., br. ISBN: 978-3-96144-079-5

JAHRBUCH SCHWEISSTECHNIK 2020

Informationen, Berichte, Anlaufstelle und ein umfassendes Produkt- und Firmenverzeichnis – das sind die Stärken dieses Jahrbuchs. Leser finden wissenschaftliche Fachbeiträge zu aktuellen Fragestellungen der schweißtechnischen Praxis, Trendthemen der Schweißtechnik, Neuigkeiten aus dem DVS-Expertenetzwerk sowie einen Überblick über den internationalen Markt. Hinzu kommen Informationen zu Terminen der Branche und Ansprechpartnern. Mit nur einem Griff haben Leser damit die gesamte schweißtechnische Branche buchstäblich zur Hand.

DVS Media 2019, 46,00 Euro, 478 S., geb. ISBN: 978-3-96144-074-0