

Prozesstechnische Herausforderungen beim Fügen hybrider Schweißverbindungen am Beispiel von Aluminium und Stahl

Dipl.-Ing. (FH) Markus Wege (SFI)*, Dipl.-Ing. Klaus-Peter Schmidt, Dipl.-Ing. (DH) Jan Pitzer (SFI)

Präambel

Konstrukteure von heute kommen mit den unterschiedlichsten Werkstoffen in Verbindung. So wird in Konstruktionen zum einen Stahl eingesetzt, wo es die Festigkeit erfordert und an einer anderen Stelle Aluminium verwendet, um der Forderung nach Leichtbau gerecht zu werden. Diese Anforderungen verlangen neue Verbindungsmöglichkeiten in der Schweißtechnik. Neben den klassischen Mindestanforderungen nach spritzerfreien und flussmittelfreien Schweißnähten entsteht bei dieser Werkstoffkombination die Forderung nach einer geringen Ausprägung des intermetallischen Phasensaums, um alle mechanisch-technologischen Werkstoffkennwerte erfüllen zu können. Dies zu beherrschen und zu reduzieren ist ein ständiges Ziel, das von der Verfahrenstechnik gelöst werden muss. Mit Hilfe von modernen Schweißprozessen wie z.B. dem Cold Weld Prozess ist man in der Lage, den hohen Anforderungen gerecht zu werden und schafft somit die Basis für einen weiteren wichtigen Schritt in der Schweißtechnik. Durch die laufende Weiterentwicklung der Schweißstromquelle und die damit verbundene Erweiterung des Schweißprozessfensters sind die Konkurrenten Aluminium und Stahl noch näher zusammengerückt und werden zukünftig Anwendungen finden, wo sie gemeinsam ein Bauteil bilden und wo jedes der beiden Metalle seine besten Eigenschaften entfalten kann – zum Wohle des Anwenders.

1. Einleitung: Herausforderung

Für eine angestrebte Gewichtsreduzierung bietet der Einsatz von hybriden Strukturen ein enormes technisches und wirtschaftliches Potenzial. Besonders für moderne Leichtbaukonstruktionen sind Aluminium und Stahl als Werkstoffkombination interessant.

Neue Varianten von Lichtbogen- und Lötprozessen, wie zum Beispiel der Cold Weld Prozess (AC-MSG-Prozess), zeichnen sich durch einen vergleichsweise geringen und steuerbaren Wärmeeintrag aus. Der auf der Wechselstromtechnik basierende Prozess erleichtert zum einen das thermische Fügen von hybriden Verbindungen und sorgt auf der anderen Seite für eine deutliche Erhöhung der Lichtbogenstabilität.

Diese prozesstechnischen Charaktereigenschaften sind notwendig, um die wesentlichen Herausforderungen beim Fügen hybrider Verbindungen sicher zu bewältigen. Die essentiellen Forderungen sind zum einen eine geringe Dicke der intermetallischen Phase, eine für dynamische Belastungen optimal ausgeprägte Nahtgeometrie und eine optisch ansprechende Nahtoberfläche. Auf der anderen Seite gilt es, die durch die stark unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften hervorgerufenen Verzüge und Eigenspannungen weiter herabzusetzen.

2. Prozessprinzip Cold Weld

Das MSG - Schweißen wurde zunächst grundsätzlich mit Gleichstrom (DC) bzw. mit gepulstem Gleichstrom betrieben, d.h. mit dem Pluspol an der Drahtelektrode (siehe Abb. 1). Man erkennt die typischen Parameter wie Grundstrom, Impulsstrom, Frequenz und Impulszeit. Zudem sieht man in Abhängigkeit des Stromverlaufs, welcher Zustand sich am freien Drahtende einstellt. Im linken Zustandsbild befindet sich der Prozess in der Grundstromphase. Dort muss der Grundstrom in seiner Höhe so gehalten werden, dass Elektrodenende und Schmelzbad gerade noch flüssig sind. Nach wenigen Millisekunden Grundstrom (je nach Impulsfrequenz) kommt ein sehr schneller Stromanstieg

auf Stromstärken, die deutlich über der kritischen Stromstärke des verwendeten Drahtdurchmessers liegen. Diese hohen Stromstärken schmelzen eine so große Menge an Draht, dass diese durch die Pinchkraft eingeschnürt wird. Bevor der Tropfen ganz abgelöst ist, soll der Impulsstrom schon wieder fallen. Der abgeschnürte Tropfen geht ohne Kurzschluss ins Schweißbad über und das Drahtende mit der Restschmelze wird durch den Grundstrom weiter erhitzt.

Im Dünnschichtbereich - aber auch beim Schweißen von hochfesten Feinkornbaustahl und hybriden Schweißlötlösungen -, wie am Beispiel von Aluminium und Stahl, bietet die Anwendung des Wechselstrom - Impulslichtbogens verbesserte Möglichkeiten bei der Wärmeführung und Steuerung der Prozesskräfte im Vergleich zum konventionellen Impulslichtbogenschweißen.

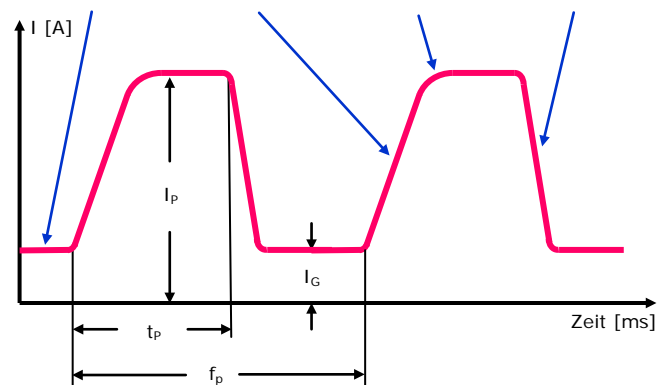
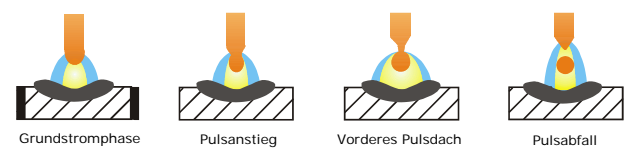


Abb. 1: Gleichstrom – Impulsprozess

Beim Cold Weld Prozess wechselt die Stromrichtung am Ende der Impulsphase, d.h., nach der Tropfenablösung greift der Lichtbogen um das Drahtende herum, wodurch mehr Energie in das Draht und weniger in den Grundwerkstoff eingekoppelt wird. Mit der gleichen elektrischen Leistung kann also mehr Draht abgeschmolzen werden.

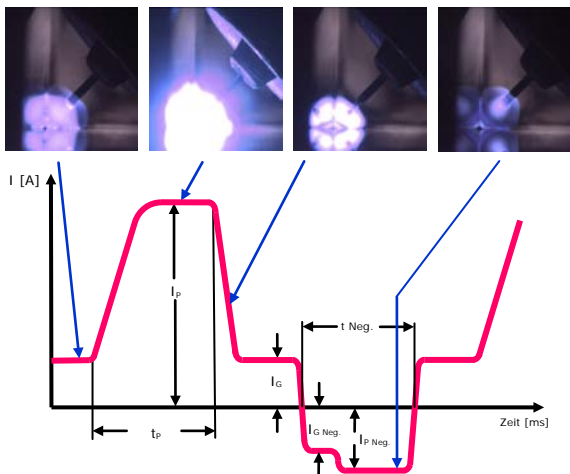


Abb. 2: Wechselstrom - Impulsprozess

Durch die Möglichkeit, den negativen Zeitanteil in sinnvollen Grenzen von 0,2ms bis hin zu 50ms zeitlich zu strecken, entstehen die zusätzlichen Freiheitsgrade, die aus den heutigen Kundenanforderungen erwachsen. Zudem lässt sich hier durch den Einsatz eines negativen Grundstroms bzw. eines negativen Impulsstroms die Wärmeeinbringung gezielt steuern (siehe Abb. 2) [1].

3. Versuchsaufbau und Fügekonzept

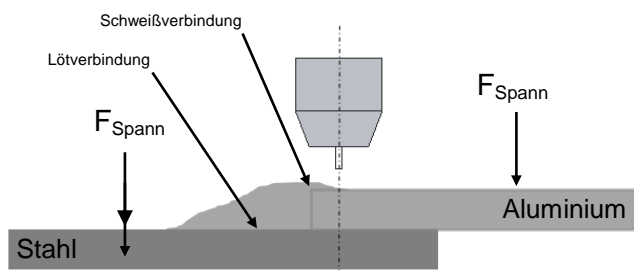


Abb. 3: Geometrischer Aufbau der Verbindung

Speziell beim Fügen von hybriden Verbindungen ist zunächst auf eine sorgfältige Fixierung der zu fügenden Teile zu achten (F_{Spann}). Die Brennerausrichtung sollte auf das Aluminiumblech gehen, um das Stahlblech durch gezielte Wärmestrahlung zu erhitzen und dadurch den Stahlgrundwerkstoff nicht aufzuschmelzen (Lötverbindung). Die Zinkbeschichtung des Stahlblechs dient als „Diffusionssperre“ (siehe Abb. 3).

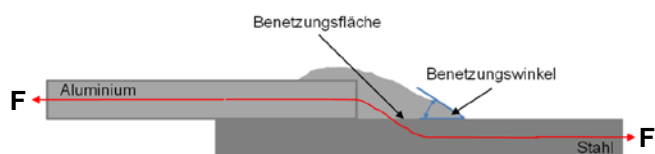


Abb. 4: Geometrische Anforderungen an die Naht

Bei den geometrischen Anforderungen an die Naht ist darauf zu achten, dass die Benetzungsfläche bzw. Benetzungslänge auf dem Stahlblech ca. 3-mal die Blechstärke des Aluminiumblechs betragen soll, um eine entsprechende Kraftübertragung gewährleisten zu können. Im Speziellen für dynamische Belastungen in Querrichtung ist ein kleiner Benetzungswinkel vorteilhaft, um die Kerbwirkung zu minimieren. Grenzwert: $< 70^\circ$ (siehe Abb. 4).

4. Auswirkung einer zu großen Wärmeeinbringung

Beim Fügen von hybriden Verbindungen lässt eine oberflächlich und makroskopisch gut ausgebildete Naht keine Schlüsse über die Ausbildung des intermetallischen Phasensaums zu (siehe Abb. 5). Eine zu große Wärmeeinbringung in die Fügezone verstärkt die Bildung spröder intermetallischer Phasen. Die Bildung erfolgt sowohl während der direkten Einwirkung des Lichtbogens auf das Material als auch während des Abkühlvorgangs nach Ende des Prozesses.

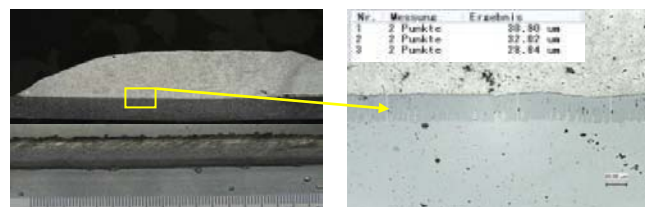


Abb. 5: Stark ausgebildete intermetallische Phase

Eine zu große Wärmeeinbringung führt zum Aufschmelzen des Stahlwerkstoffes, was zu einer unkontrollierten Ausbildung der Phasen führt. Die dadurch erhöhte Schmelzbadbewegung sorgt in weiten Bereichen der Naht für eine spröde Phase. Zu groß ausgebildete Phasensäume können unmittelbar nach dem Abkühlvorgang bzw. unter geringer Last versagen.

5. Reduzierung der Wärmeeinbringung

Durch die Wahl eines Offsets kann Einfluss auf die Wärmeeinbringung und die sich ausbildende Nahtgeometrie genommen werden. Das Schweißlöten von Stahl - Aluminium - Mischverbindungen erfolgt mit positivem Offset.

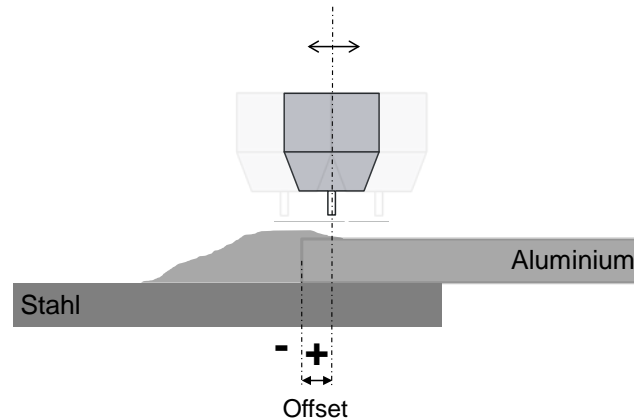


Abb. 6: Reduzierung der Wärmeeinbringung durch Offsetveränderung

Bei einem zu großen Offset besteht die Gefahr, dass zu viel Energie zum Aufschmelzen des Aluminiumgrundwerkstoffs verbraucht wird und keine zuverlässige Anbindung an das Stahlblech stattfindet. Ist der Offset zu gering, besteht die Gefahr, dass eine starke Diffusion zwischen Stahlblech und Aluminiumschmelze stattfindet oder das Stahlblech aufschmilzt und sich beide Elemente in der schmelzflüssigen Phase vermischen (siehe Abb. 6).

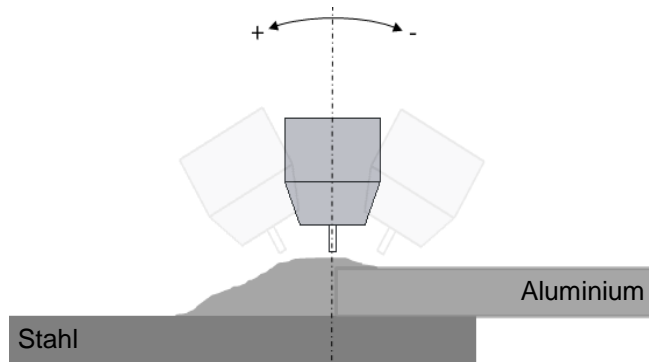


Abb. 7: Reduzierung der Wärmeeinbringung durch Änderung der Brennerstellung

Ein weiteres wichtiges Kriterium bzgl. des Einflusses auf die Wärmeeinbringung und die sich ausbildende Nahtgeometrie, ist die richtige Wahl der Brenneranstellung. Bei einer zu stark positiven Brenneranstellung besteht die Gefahr, dass der Lichtbogen das Stahlblech erfasst und anschmilzt. Eine zu stark negative Brenneranstellung kann zu Prozessinstabilitäten und Unregelmäßigkeiten in der Nahtausbildung führen (Abb. 7) [2].

4. Prozess- und Randparameter

Bei der Wahl der prozessbezogenen Parameter ist eine Gratwanderung zu vollziehen: zum einen ist darauf zu achten, dass eine niedrigviskose Schmelze zur Verfügung steht, um ein gutes Fließverhalten zu ermöglichen, was eine hohe Wärmeeinbringung erfordert. Zum anderen sind die Schweißlötparameter so zu wählen, dass mit einer geringen Wärmeeinbringung eine kontrollierte Ausbildung des intermetallischen Phasensaums erreicht wird. Frühere Untersuchungen haben ergeben, dass der intermetallische Phasensaum $\leq 10\mu\text{m}$ sein muss um eine sichere Kraftübertragung zu realisieren [4].

Die materialbezogenen Parameter verlangen einen Aluminium-Zusatzwerkstoff, welcher im schmelzflüssigen Zustand ein günstiges Fließverhalten besitzt. Weiterhin ist eine geeignete Oberflächenbeschichtung des Stahlblechs zu wählen, die die Ausbildung der intermetallischen Phase begrenzt und ein gutes Benetzungsverhalten aufweist. Der Aluminiumgrundwerkstoff sollte ebenfalls ein günstiges Fließverhalten besitzen, um die Forderungen nach einer geeigneten Nahtgeometrie (Benetzungswinkel, Benetzungslänge) zu erfüllen [3]. Bei den anschließenden Schweißlötversuchen wurden folgende Prozess- und

Randparameter iterativ ermittelt und automobiltypische Werkstoffe berücksichtigt:

Stahl		Aluminium	
DC04+ZE	1,0mm	Al 6016	1,0mm
DC04+ZE	1,5mm	Al 6016	1,5mm

Schutzgas: 100%Ar
Zusatzwerkstoff: AISi5

5. Ergebnisse der Schweißlötversuche

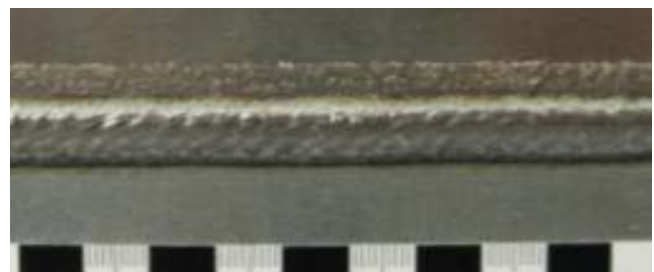
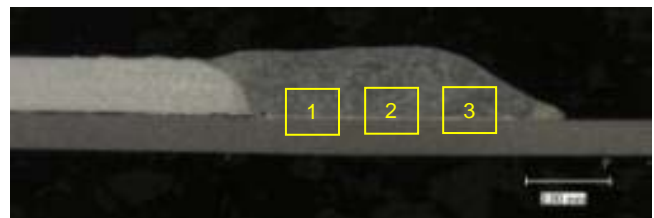


Abb. 8: Makroschliff und Nahtoberfläche

Bei Verwendung des Cold Weld Prozesses mit der Zusatzfunktion DuoPuls kann durch den alternierenden Wechsel zwischen zwei Energieniveaus die Nahtgeometrie stark beeinflusst werden und eine gleichmäßige Nahtschuppung erzielt werden (siehe Abb. 8). Zudem kann durch den Einsatz des DuoPulses die Streckenenergie und somit die Ausbildung des intermetallischen Phasensaums reduziert werden. Bei den Schweißproben wurde an drei Stellen (siehe Abb. 8) je drei Messungen (siehe Abb. 9, Bild 1, 2, 3) der Phasendicke durchgeführt. Die Ergebnisse lagen bei allen Messungen bei $\leq 3\mu\text{m}$ und somit in einem guten Bereich.

Nr.	Messung	Ergebnis
1	2 Punkte	2,06 μm
2	2 Punkte	2,25 μm
3	2 Punkte	2,25 μm

Nr.	Messung	Ergebnis
1	2 Punkte	2,81 μm
2	2 Punkte	2,81 μm
3	2 Punkte	3 μm

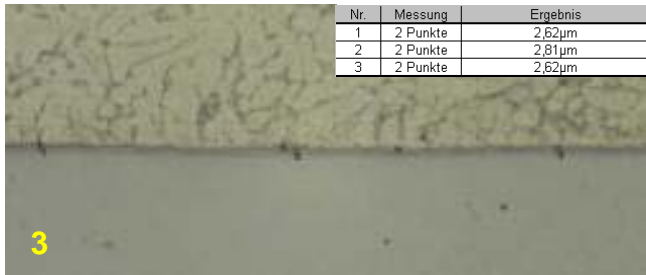


Abb. 9: Mikroschliffe und Messwerte

Abschließend galt es, nach erfolgreicher mikroskopischer Untersuchung, die Proben auf alle relevanten Werkstoffkennwerte zu überprüfen. Hier wurde zunächst die Zugfestigkeit genauer betrachtet. Dabei wurden 5 Zugversuche pro Materialkombination durchgeführt (siehe Abb. 10).

Typische Versagen für Aluminium – Stahl - Mischverbindungen im Überlappstoß waren:

- Abscheren der Aluminiumnaht vom Stahlblech
- Riss in der Wärmeeinflusszone des Aluminiums
- Überlagerung beider Versagensarten

Bei beiden Materialkombinationen konnte die Streckgrenze des Stahlwerkstoffes deutlich überschritten werden.



Abb. 10: Abscheren der Naht / Versagen in der WEZ

6. Zusammenfassung

Der zunehmende Bedarf an hybriden Schweißverbindungen (Mischverbindungen) aus Aluminium und Stahl fordert die Schweißgerätehersteller im besonderen Maße. Durch die Entwicklung von wärmearmen bzw. wärmereduzierten Schweiß- und Lötprozessen wird die Realisierung jedoch sehr begünstigt. Mit dem auf der Wechselstromtechnik (AC) basierenden Cold Weld Prozesses (AC-MSG-Prozess) kann man den hohen Anforderungen, die diese spezielle Verbindung fordert, gerecht werden.

7. Danksagung

Die Verfasser danken der Fa. Carl Cloos Schweißtechnik GmbH und der RWTH – Aachen für das überlassene Bilder- und Dokumentationsmaterial.

Literatur:

- [1] Platz, J; Schmidt, Klaus-Peter; Wege, Markus
Moderne MIG-/MAG Wechselstromtechnik und ihre Anwendungen. DVS Berichte, Hamburg, Sept.2011, 275 pp.238-243
- [2] H.Cramer, L.Cramer und S.Pommer; München
Überblick zu modernen Lichtbogenprozessen und deren Werkstoffübergängen beim MSG-Schweißen. DVS Bericht, Hamburg, Sept.2011, 275 pp.232-237
- [3] Schmidt, Klaus-Peter; Neuhofer
Überblick zu modernen Lichtbogenprozessen und deren Werkstoffübergängen beim MSG-Schweißen. Vortragsband: Neue Technologien für das Lichtbogenschweißen, Ort: HWK BTZ Landshut am 13.01.2011, Veranstalter: DVS BV Niederbayern
- [4] Schmidt, Klaus-Peter; Kaiserslautern
Lichtbogen-Schweißen und –Löten: Modulationsarten bestimmen den Werkstoffübergang, den Lichtbogen, die Wärmeeinbringung und das Nahtaussehen
DVS-Jahrbuch 2006,Seite 78-89