

# Elektronenstrahlschweißen und -löten an Atmosphäre mit reduzierter Beschleunigungsspannung von heißbrissanfälligen Aluminiumlegierungen

A. Senger, Aachen, G. Klimov, Hannover, A. Beniyash, Hannover, U. Reisgen, Aachen, T. Hassel, Hannover und S. Olschok, Aachen

Der Elektronenstrahlprozess an Atmosphäre zeichnet sich durch eine hohe Prozessgeschwindigkeit sowie eine material-, oberflächenbeschaffenheits- und auftreffwinkelunabhängige Energieeinbringung bei minimalem Verzug aus. Zudem bietet das Verfahren an Atmosphäre gegenüber dem Verfahren im Vakuum den Vorteil, dass der Prozess nicht an eine Vakuumarbeitskammer gebunden ist und der Strahl aufgrund der höheren Streuung an Atmosphäre eine gute Spaltüberbrückbarkeit bietet sowie ein sicheres Aufschmelzen des Schweißdrahts ermöglicht.

Gegenwertig werden zur Beschleunigung der Elektronen Anlagen mit bis zu 175 kV betrieben. Die daraus resultierende kinetische Energie wird beim Auftreffen der Elektronen auf die Werkstückoberfläche zum größten Teil in Wärme umgewandelt. Durch das Abbremsen der Elektronen wird zudem Röntgenstrahlung emittiert. Hieraus resultieren hohe Anforderungen an den Röntgenschutz. Eine Reduzierung der Beschleunigungsspannung minimiert den notwendigen Strahlenschutz und verbessert die Überschlagesicherheit im Generator auch beim Bearbeiten von leicht verdampfbaren Materialien. Zugleich ist das Potenzial einer schmaleren Bauform des Strahlerzeugers, die eine deutliche Gewichtsreduktion gegenüber der herkömmlichen Elektronenstrahltechnik zur Folge hat und somit einen Robotereinsatz ermöglicht, sehr groß.

Beim Triodensystem mit 60 kV Beschleunigungsspannung reicht die Elektronengeschwindigkeit aus, um die notwendige Energiedichte an der Fügestelle (Löten und Schweißen mit Zusatzwerkstoff) bereitzustellen. Dabei wird für das Fügen von Aluminium im Dünnschichtbereich ein Prozessfenster erarbeitet, prozessbedingte Eigenschaften identifiziert und der Hochspannungstechnik gegenübergestellt. Hierzu werden metallographische und mechanische Untersuchungen durchgeführt und die zuvor bestimmten Parameterfenster auf das Fügen von heißbrissanfälligen Aluminiumlegierungen auf den I-Stoß übertragen.

## 1 Einleitung

Leichtbauwerkstoffe, im Speziellen Aluminiumlegierungen, gewinnen in den letzten Jahrzehnten als Konstruktionswerkstoffe durch ihr geringes spezifisches Gewicht bei hoher Festigkeit und ausreichenden Verschleiß- und Korrosionseigenschaften weiter an Bedeutung. Dabei setzen unterschiedliche Automobilhersteller bereits seit Anfang der 90er auf Leichtbauweise [1], [2]. Auch das Leichtbaupotenzial im Schienenfahrzeugbau nimmt mit neuen Aluminiumwerkstoffen zu. Es lassen sich längere Wagenkästen mit reduzierter Anzahl Waggons realisieren [3]. Dabei gilt es, den Leichtbaugrad durch die Einführung neuerer Fügetechniken ohne Einbuße der Gesamtwirtschaftlichkeit (große Stückzahlen und geringe Durchlaufzeit) zu erhöhen. Um die aus der Verwendung von Aluminiumlegierungen resultierenden Vorteile nutzen zu können, werden leistungsfähige und zuverlässige thermische Fügeverfahren benötigt, die die Wärmeeinbringung in das Bauteil und damit den Verzug reduzieren und das eingestellte Gefüge so wenig wie möglich verändern.

Das Laserstrahlschweißen hat sich als Fügeprozess für Aluminiumbauteile mit hohen Stückzahlen bereits etabliert. Durch die Verwendung von Festkörperlaser (Multimode- sowie Singlemode Faserlaser, Disclaser, Diodenlaser), bei denen die Laserstrahlung an den Bearbeitungsort via Lichtleitkabel geleitet werden kann, ist eine Roboterbearbeitung möglich. Bei diesen Anwendungen hat sich in der Praxis gezeigt, dass die Prozesse ein verhältnismäßig kleines stabiles Prozessfenster aufweisen. Mögliche Abweichungen insbesondere durch zu große Toleranzen in der Fertigung oder infolge einer undefinierten Drahtkrümmung beim Schweißen/Löten mit Zusatzwerkstoff führen zu Prozessinstabilitäten. Die Reduzierung der Toleranzen ist jedoch mit einem großen Aufwand und höheren Kosten verbunden. Des Weiteren sind die relativ hohen Investitionskosten sowie der relativ geringe Wirkungsgrad (30-50%) für die Umwandlung der elektrischen Leistung in einen fokussierten Laserstrahl zu nennen [4].

Mit dem Elektronenstrahlschweißen an Atmosphäre (Non-Vacuum Electron Beam Welding, NV-EBW) steht ein leistungsfähiges und vor allem ein sehr zuverlässiges Schweißverfahren mit großem Prozessfenster, das insbesondere in automatisierte Abläufe gut integriert werden kann, zur Verfügung. Das Verfahren bietet gegenüber dem Elektronenstrahlschweißen im Vakuum den Vorteil, dass der Prozess nicht an eine Vakuumarbeitskammer gebunden ist. Somit entfallen die durch die Evakuierung der Arbeitskammer entstehenden längeren Taktzeiten ebenso wie die Werkstückbegrenzungen durch die Größe der Schweißkammer. Der Einsatz des NV-EB-Verfahrens empfiehlt sich überall dort, wo hohe Schweißgeschwindigkeiten und kurze Zykluszeiten bei nicht zu großen Nahttiefen (bis 10 mm) gefragt sind. Aufgrund der hohen Leistungsdichte lässt sich der Wärmeeintrag gezielt beeinflussen und die thermische Belastung auf ein Minimum reduzieren. Durch die Nutzung eines Partikelstrahls (Elektronen) hat die Oberflächentopologie und das Reflexionsvermögen im Gegensatz zum Laserstrahlschweißen/-löten bei diesem Verfahren wenig Einfluss auf die Energieeinkopplung des Elektronenstrahls. Beim NV-EB-Schweißen wird die kinetische Energie der Elektronen beim Auftreffen auf den Werkstoff zum größten Teil in Wärme umgewandelt, während beim Laser die Energieeinkopplung durch die anteilige Absorption des Strahls erfolgt und zu hohen Verlusten durch Reflexion an der Werkstückoberfläche führt [5]. Ferner hat das NV-EB-Schweißen bedingt durch die

gleichmäßigere Leistungsverteilung im Strahl „gutmütige“ Temperaturgradienten, weswegen die Heißrissentstehung verringert und die Spaltüberbrückbarkeit verbessert wird [6], [7].

Hingegen ist die Mobilität des Verfahrens beim üblichen Strahlerzeugeraufbau stark eingeschränkt. Schweißen am Roboter ist aufgrund des hohen Eigengewichtes (im Gegensatz zu einem Laserstrahlschweißkopf) sehr aufwändig. Darüber hinaus ist die Entstehung von Röntgenstrahlung ein weiteres Hindernis. NV-EB-Anlagen, welche heutzutage mit bis zu 175 kV Beschleunigungsspannung geliefert werden, müssen aufwendig röntgensicher ausgeführt sein. Des Weiteren gibt es noch keine geeignete Qualitätssicherung/-überwachung für die Materialbearbeitung für das NV-EBW.

Ein einfacher und robuster Prozess mit entsprechender Qualitätssicherung beim Fügen von Aluminiumlegierungen im Dünnschichtbereich besitzt ein hohes Potenzial sich in der Produktion zu etablieren. Hierzu wird ein neuer Ansatz des NV-EB Schweißen / Lötens bei geringer Beschleunigungsspannung untersucht. Durch die verringerte Beschleunigungsspannung wird einerseits die Baugröße des Strahlerzeugers reduziert, wodurch auch eine deutliche Gewichtsreduktion gegenüber der herkömmlichen EB-Technik erfolgen kann, was wiederum einen Robotereinsatz ermöglicht. Andererseits kann die Anforderungen an den Röntgenstrahlenschutz angepasst werden. Mit abnehmender „Härte“ der Röntgenstrahlung (Durchdringungsfähigkeit) kann eine Vollziegelabschirmung um 50 %, eine Bleiabschirmung um 75 % und eine Stahlabschirmung um 85% reduziert werden. Das NV-EBW bei geringer Beschleunigungsspannung ist somit insbesondere für Produktionen von Klein-, Mittel- und Großserien in der Zulieferkette der Automobilindustrie sowie dem Schienenfahrzeug-, Flugzeug- und Maschinen- und Anlagenbau interessant.

In dieser Arbeit wird das Potential der NV-EB Technik bei 60 kV Beschleunigungsspannung untersucht. Hierzu werden mit Hilfe einer statistischen Versuchsplanung die Parameterfenster beim Schweißen mit und ohne Zusatzwerkstoff identifiziert auf Verbindungsschweißungen übertragen. Des Weiteren werden die Prozesstoleranzen hinsichtlich der Spaltüberbrückbarkeit untersucht. Alle Schweißnahtcharakterisierungen erfolgen an metallographische Querschliffen.

## 2 Prozess

Beim Fügen mit dem Elektronenstrahl wird beim Auftreten der hochbeschleunigten Elektronen auf das Werkstück kinetischer Energie in Wärme umgewandelt. Die Erzeugung des Elektronenstrahls erfolgt im Hochvakuum nach dem Prinzip der Braunsche Röhre. Dabei werden aus einer Wolframkathode, durch thermische Emission, Elektronen emittiert und durch ein zwischen Kathode und Lochanode anliegendes Spannungspotenzial auf die notwendige Geschwindigkeit beschleunigt. Eine zwischen den beiden Systemen angeordnete Steuerelektrode steuert den Strahlstrom und ist gleichzeitig für die erste Strahlfokussierung verantwortlich [8].

Anders als beim Elektronenstrahlschweißen im Vakuum wird beim Fügen an Atmosphäre der im Vakuum erzeugte Elektronenstrahl mit Hilfe eines mehrstufigen Druckstufensystems (DSS) an die Atmosphäre geführt. Die auf etwa 2/3 der Lichtgeschwindigkeit (bei 150 kV Beschleunigungsspannung) beschleunigten Elektronen werden durch angebrachten Magnetlinsen im Strahlerzeuger geformt und auf die Austrittsöffnung fokussiert und abgelenkt. Aufgrund des Druckanstiegs im DSS kommt es bereits dort zur leichten Streuung des Strahls. Dabei treffen die beschleunigten Elektronen auf die größeren Moleküle der Atmosphäre und werden abgelenkt. Durch die koaxiale Zufuhr eines weniger dichten Gases (Helium 0.1787 g/dm<sup>3</sup>) in das DSS wird die dichtere Luft verdrängt und die Wechselwirkung zwischen den Molekülen und den Elektronen minimiert. Ein Verlust von ca. 20-30 % der emittierten Elektronen werden von der Druckstufe absorbiert und durch kontinuierliche Kühlung gegen eine thermische Belastung geschützt. Um das Eindringen von Spritzen und Metaldämpfen, Ionen und rückstreuenden Elektronen in den Strahlerzeugerraum zu unterdrücken wird zusätzlich an der Strahlaustrittsdüse, mit Hilfe eines Cross Jets, Helium quer zum Elektronenstrahl zugeführt [9].

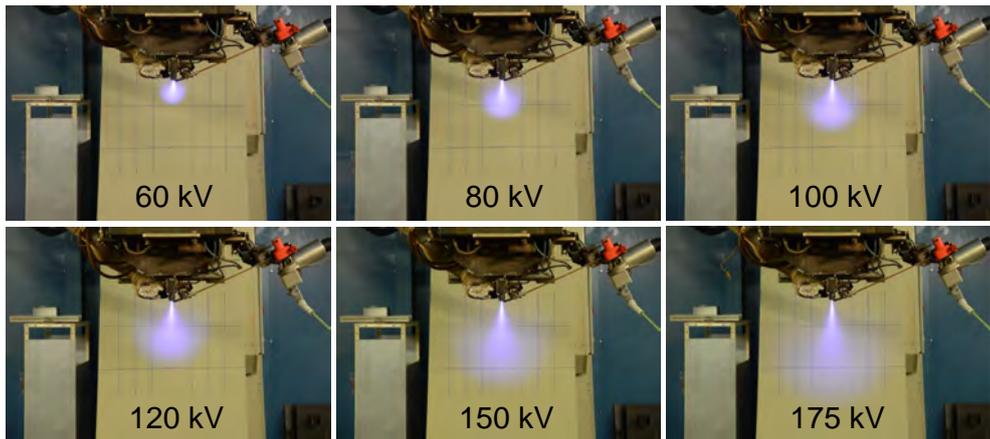
Der NV-EB Fügeprozess kann auf unterschiedliche Weise beeinflusst werden. Der Wärmeeintrag wird über den Strahlstrom und die Schweißgeschwindigkeit gesteuert. Die Leistungsdichteverteilung hingegen wird über den Arbeitsabstand beeinflusst. Dabei nimmt mit zunehmender Arbeitsabstand die Leistungsdichte des Strahls, aufgrund der zunehmender Streuung der Elektronen, ab.

Die 60 kV-Technologie beim Elektronenstrahlschweißen im Vakuum wird bereits in der Industrie vielseitig eingesetzt. Dagegen ist bei geringen Beschleunigungsspannungen keine Anwendung an Atmosphäre bekannt. Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurden die NonVac Elektronenstrahlschweißanlagen der Firmen Steigerwald und PTR auf 60 kV umgestellt und hinsichtlich der Strahleffizienz  $\eta_b$  optimiert. Dabei erfolgt die Bestimmung der Strahleffizienz nach dem Strommessprinzip. Der am Bauteil gemessene Strom  $I_{SF}$  wird dem Emissionsstrom der Strahlquelle  $I_b$  nach Formel 1 ins Verhältnis gesetzt.

$$\eta_b = \frac{100 \cdot I_{SF}}{I_b} \quad (1)$$

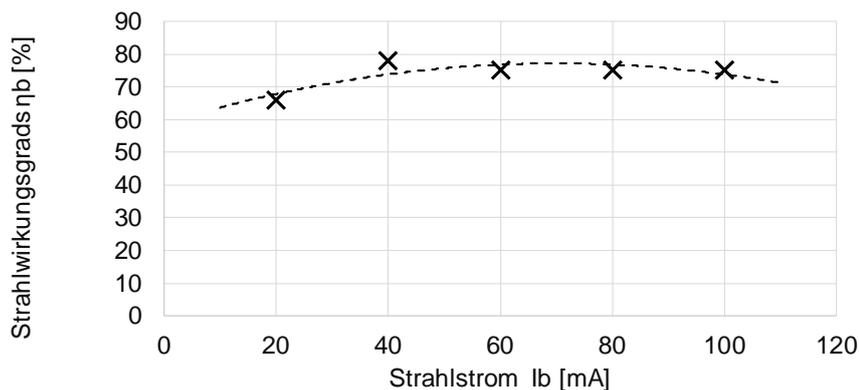
Aufgrund der reduzierten Beschleunigungsspannung werden die Elektronen leichter durch Moleküle der Atmosphäre gestreut. Das führt dazu, dass die Intensität des Strahls unter erhöhtem Umgebungsdruck abnimmt. Der Einfluss des Umgebungsdrucks auf die Elektronenstreuung abhängig von der Beschleunigungsspannung ist im Bild 1 dar-

gestellt. Dabei werden die Moleküle der Luft von den Elektronen ionisiert und sind als violettes Leuchten sichtbar. Aufgrund der geringeren Reichweite bei 60 kV Beschleunigungsspannung wurde im Gegensatz zu 150 kV der Arbeitsabstand um den Faktor 3 auf 3 bis 4 mm entfernt vom Strahlaustritt reduziert.



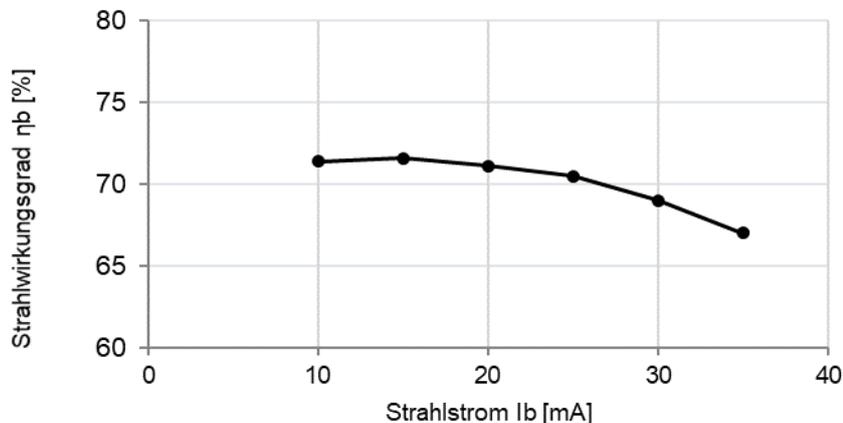
**Bild 1.** Reichweite der beschleunigten Elektronen beim Austritt an die Atmosphäre bei unterschiedlichen Beschleunigungsspannungen bei 30mA Strahlstrom

Für die Schweißuntersuchungen wurde an der NonVac EB Anlage EBONOVA 2.1 der Firma Seigerwald durch konstruktive Maßnahmen im Strahlengang sowie durch strömungstechnische Optimierungen im Druckstufensystem (DSS) und anschließender Anpassung der Anlagenparameter die Strahleffizienz auf über 70 % gesteigert. Der strahlstromabhängige Wirkungsgrad ist in Bild 2 graphisch dargestellt.



**Bild 2.** Optimierter Strahlwirkungsgrad der EBONOVA 2.1 – G 300 DS Anlage für unterschiedliche Strahlströme.

Die Lötversuche wurden an der PTR NV-EBW 25-175 TU Anlage, die ursprünglich für Beschleunigungsspannung von 175kV konzipiert war, durchgeführt. Hierzu wurde das System auf 60kV umgestellt und der Fokusstrom angepasst. Der Strahlwirkungsgrad wurde ebenfalls nach dem Prinzip des Faradaykäfigs für verschiedene Strahlströme bestimmt, Bild 3.



**Bild 3.** Strahlwirkungsgrad der PTR-NVEB Anlage für unterschiedliche Strahlströme

Eine signifikante Verbesserung des Strahlwirkungsgrads konnte durch eine Reduzierung des Anodenabstandes zur Kathode erreicht werden. Hierzu wurden vier unterschiedlich große Anoden adaptiert und mit angepassten Parametern der Strahlwirkungsgrad bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Strahlstrom [mA]	Strahlwirkungsgrad [%]				Leistung [W]			
	30 mm	23 mm	18 mm	13 mm	30 mm	23 mm	18 mm	13 mm
20	71,1	<b>75,8</b>	64,3	33,8	853	<b>910</b>	772	406
25	70,5	<b>76,9</b>	64,8	34,2	1058	<b>1154</b>	972	513
30	69	<b>80</b>	63,7	34,7	1242	<b>1440</b>	1147	625
35	67	<b>78,1</b>	66,8	37,4	1407	<b>1640</b>	1403	785

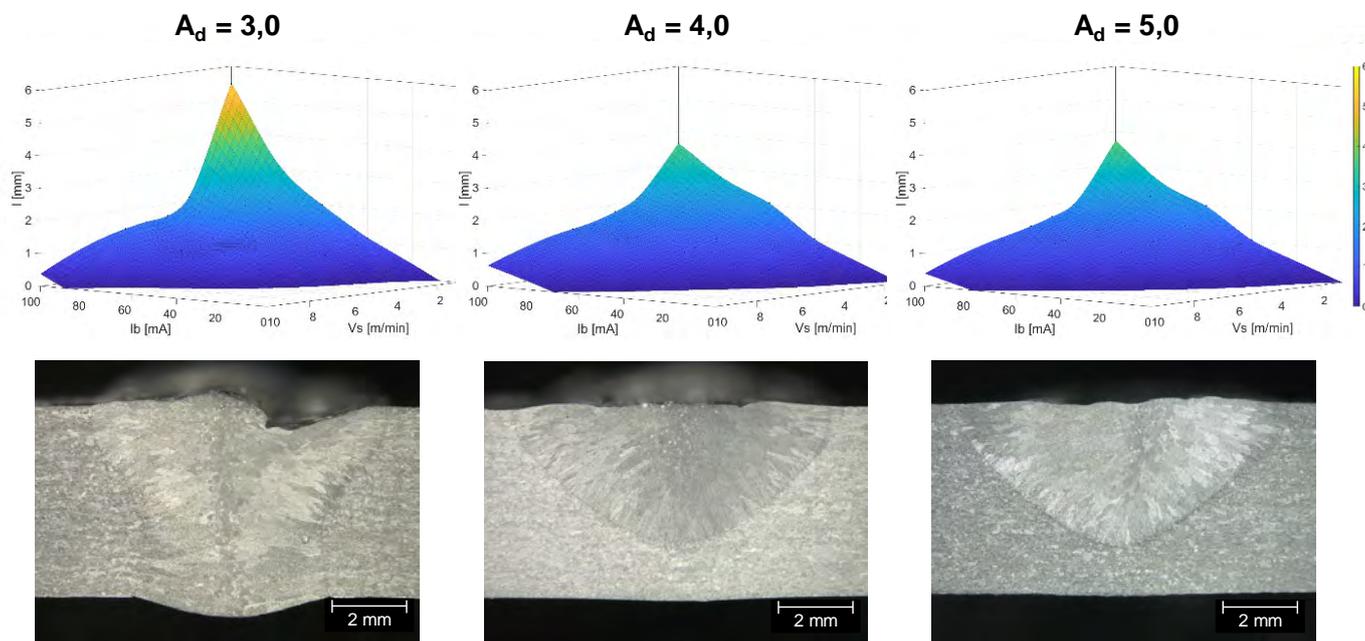
**Tabelle 1:** Strahlwirkungsgrad und Leistung gemessen am Strahlaustritt der PTR-NVEB Anlage bei 60kV Beschleunigungsspannung für verschiedene Abständen zwischen Anode und Kathode

Alle weiteren Lötversuche wurden mit einem Anodenabstand von 23 mm zur Kathode und somit mit einem Strahlwirkungsgrad von 80 % durchgeführt.

### 3 Schweißen mit reduzierter Beschleunigungsspannung

Zur Identifizierung der Parameterfenster beim Schweißen mit und ohne Zusatzwerkstoff mit reduzierter Beschleunigungsspannung wurde eine DoE (Design of Experiments), mit einem Umfang von 60 Einzelversuchen, aufgesetzt. Dabei wurde der Einfluss der Schweißgeschwindigkeit, des Strahlstroms und des Arbeitsabstandes als Eingangsparameter auf die nahtgeometrischen Merkmale hin untersucht. Die Erstellung des Versuchsplans erfolgte mittels der Methode der "Latinized Centroidal Voronoi Tessellation".

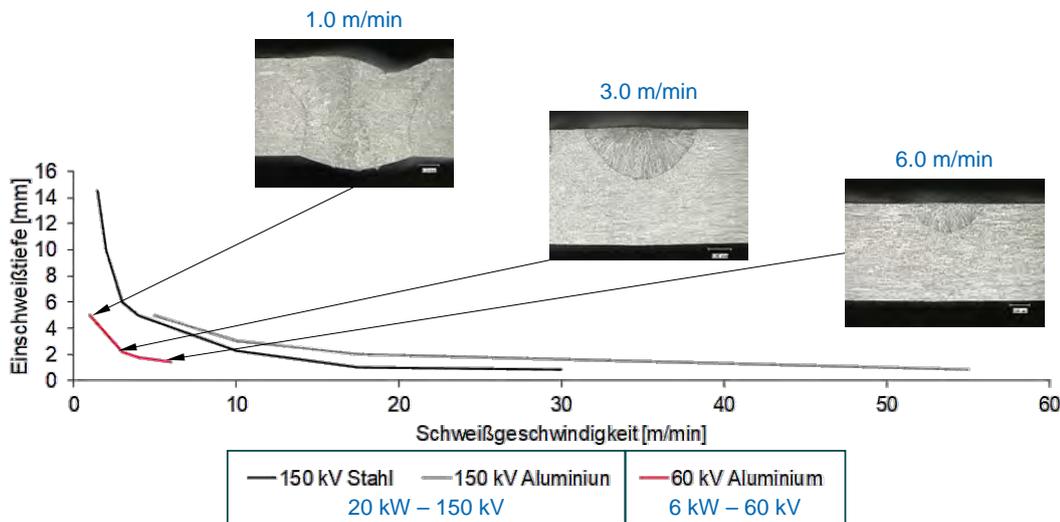
Im Bild 3 ist die Einschweißtiefe abhängig von Strahlstrom und Schweißgeschwindigkeit für drei verschiedene Arbeitsabstände graphisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Arbeitsabstand einen großen Einfluss auf die Einschweißtiefe besitzt. Dabei ist der Einfluss zu höheren Strahlströmen signifikant höher. Unabhängig von den hier untersuchten Arbeitsabständen liegt die Einschweißtiefe bei niedrigen Streckenenergien zwischen 1 mm und 2 mm. Eine deutliche Zunahme der Einschweißtiefe wird durch das gleichzeitige Reduzieren der Schweißgeschwindigkeit und Zunahme des Strahlstroms erreicht.



**Bild 3.** Zusammenhang zwischen Schweißgeschwindigkeit, Strahlstrom und Einschweißtiefe für drei unterschiedliche Arbeitsabstände (oben). Querschliffe von markierten maximalen Werten (unten). Einschweißversuchen auf einem 5 mm dicken Al99,95 Blech ohne Zusatzwerkstoff

Die Prozessgrenzen werden von verschiedenen Faktoren definiert und können nicht ohne weiteres auf einzelne Parameter abstrahiert werden. Die minimale Schweißgeschwindigkeit hängt stark vom Arbeitsabstand und von dem geschweißten Material ab. Abhängig von der Legierungszusammensetzung werden niedrigverdampfende Legierungselemente bei geringer Schweißgeschwindigkeit, trotz des Cross Jets, über das DSS in den Strahlerzeuger eingesogen. Entgegen der höheren Überschlagsfestigkeit bei 60 kV kommt es vereinzelt zu Spannungsüberschlägen im Strahlerzeugerraum. Die Folge sind Imperfektionen auf der Oberraupe und im Inneren der Naht. Ein höherer Arbeitsabstand wirkt sich zwar positiv auf Spannungsüberschläge und somit auf die Qualität der Naht aus,

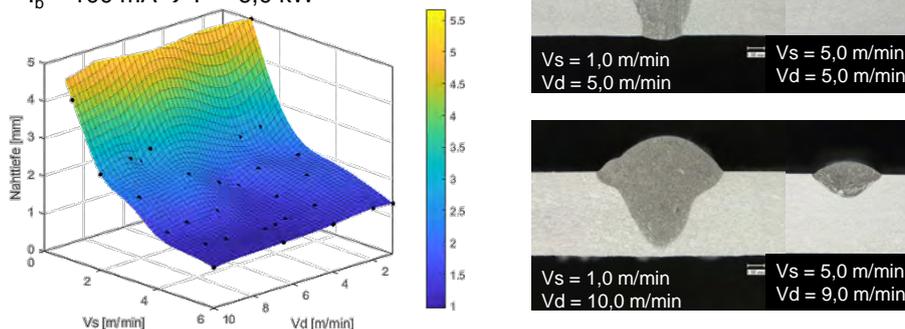
die Nahttiefe nimmt jedoch signifikant ab. Um eine geforderte Einschweißtiefe auch bei höheren Schweißgeschwindigkeiten erreichen zu können, muss die Leistung angepasst werden. Bei der NonVac-Technologie wird die maximale Leistung jedoch durch das DSS begrenzt. Aufgrund der Verluste im DSS muss dieses nach Bild 2 gegen die thermische Belastung von ca. 1,8 kW geschützt werden. Bei der aktuellen Auslegung des DSS ist der maximale Strahlstrom von 100 mA nicht zu überschreiten. Ein direkter Vergleich zu der 150 kV Technologie ist im Bild 4 dargestellt.



**Bild 4.** Verfahrensvergleich zwischen einem 150 kV - und einem 60 kV – System

Beim Schweißen mit Zusatzwerkstoff werden zudem die Parametergrenzen durch den Aufbau der Drahtfördereinheit und des zusätzlichen Materials bestimmt. Dabei beträgt der geringste Arbeitsabstand 4,0 mm. Die Drahtanstellung ist aufgrund des geringen Arbeitsabstandes konstant. Infolge des höheren Materialvolumens wird im Gegensatz zum Schweißen ohne Zusatzwerkstoff mit maximalem Strahlstrom geschweißt. Somit werden beim Schweißen mit Zusatzwerkstoff lediglich die Schweißgeschwindigkeit und die Drahtfördergeschwindigkeit variiert. Bild 5 zeigt die Prozessgrenzen beim Schweißen mit 1,2 mm AlSi12 Zusatzwerkstoff und einem konstanten Strahlstrom von 100 mA auf einem 5 mm dicken Al 99,5 Blech. Unabhängig von der Schweißgeschwindigkeit ändert sich die Einschweißtiefe unwesentlich mit der Fördergeschwindigkeit des Zusatzwerkstoffs. Lediglich die Höhe der Ober-raupe nimmt mit der Fördergeschwindigkeit zu.

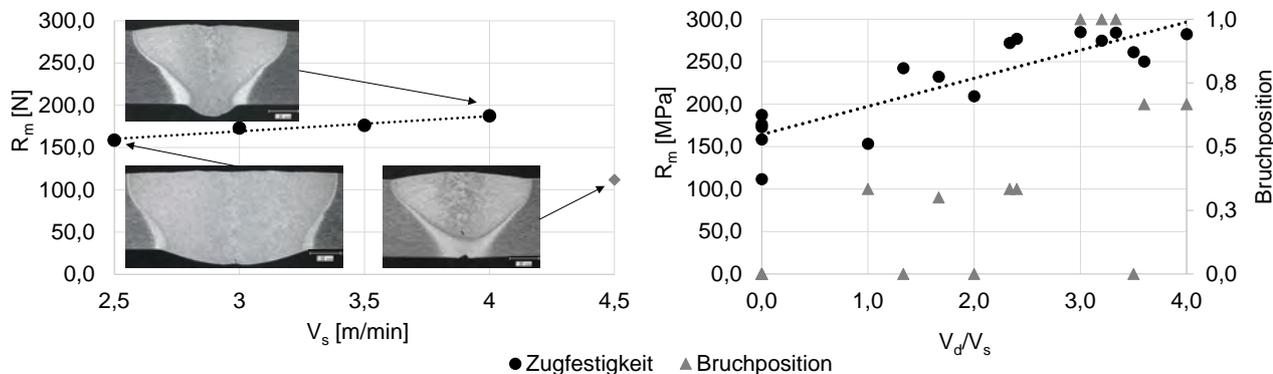
- Al 99,5 t = 5 mm
- AlSi12 Ø = 1,2 mm
- Arbeitsabstand  $A_d = 4,0$  mm
- $I_b = 100$  mA  $\rightarrow$  P = 6,0 kW



**Bild 5.** Zusammenhang zwischen Schweißgeschwindigkeit Drahtfördergeschwindigkeit bei konstantem Strahlstrom (links) und die dazugehörigen Querschliffe (rechts)

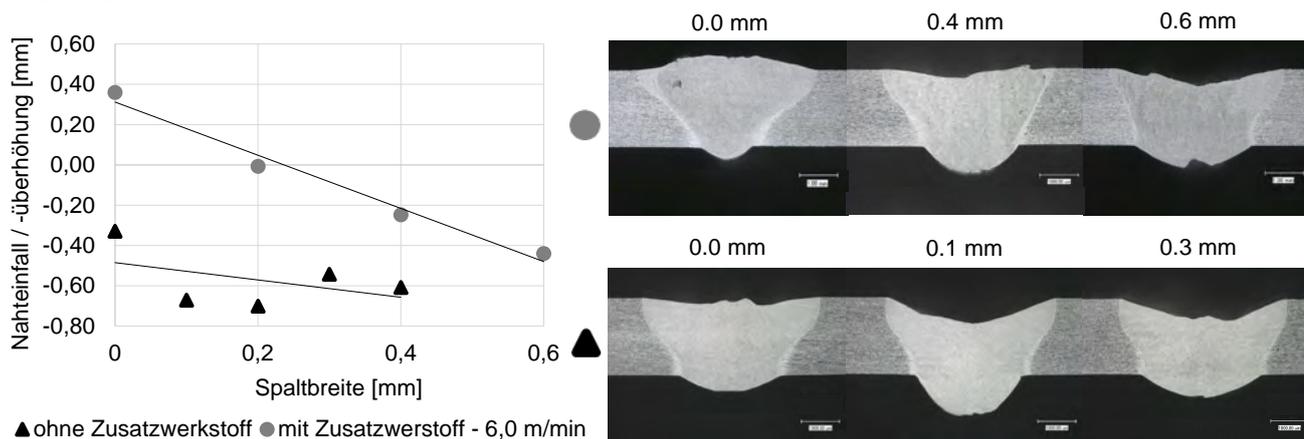
Somit ist eine metallurgische Beeinflussung der Naht mit Hilfe von Zusatzwerkstoffen ohne signifikanten Minderung der Prozesszeit möglich. Eine Übertragung der Parameter für das Schweißen einer 2,5 mm dicken AA6111 T4 Aluminiumlegierung am I-Stoß zeigt das Potential der 60kV NonVac Technologie mit Zusatzwerkstoff. Die heißbrisanfällige Legierung neigt beim Schweißen ohne Zusatzwerkstoff zu Heißrissen. In Bild 6 ist die von den Schweißparametern abhängige Zugfestigkeit aufgetragen. Nach Bild 6 links nimmt beim Schweißen ohne Zusatzwerkstoff die Zugfestigkeit mit steigender Schweißgeschwindigkeit zu. Dabei liegt die max. Zugfestigkeit bei 70 % der Grundwerkstofffestigkeit. Erst ab 4 m/min wird durch die Leistungsbegrenzung der Anlage die volle Anbindung nicht erreicht. Die dadurch resultierende Kerbwirkung sowie der geringere Querschnitt der Naht reduzieren die

Zugfestigkeit um 40 %. Die Verwendung eines AlSi12 Zusatzdrahts verbessert die Zugfestigkeit signifikant, Bild 6 rechts. Dabei hängt die maximale Zugfestigkeit im Wesentlichen von der Menge des Zusatzwerkstoffs ab. Hierzu wurde im Diagramm auf der X-Achse das Verhältnis zwischen der Drahtfördergeschwindigkeit  $v_d$  und der Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  aufgetragen. Je größer der Wert, desto mehr Zusatzwerkstoff wird der Naht zugeführt. Unabhängig von der Schweißgeschwindigkeit nimmt die Zugfestigkeit mit der Menge des Zusatzwerkstoffs zu. Zudem verschiebt sich die Bruchstelle von der Naht in den Grundwerkstoff. Auf der sekundären Y-Achse des rechten Diagramms in Bild 6 ist der Anteil der im Grundwerkstoff gebrochenen Proben aller Zugproben eines Parameters aufgetragen. Bei einem Wert von 1,0 sind alle Zugproben im Grundwerkstoff gebrochen. Hingegen sind bei einem Wert von 0 alle Zugproben in der Naht gebrochen.



**Bild 6:** Ergebnisse der Zugversuche von Schweißungen mit und ohne Zusatzwerkstoff. Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Zugfestigkeit beim Schweißen ohne Zusatzwerkstoff (links) und Einfluss der Drahtfördermenge (Verhältnis zwischen Drahtvorschubrate und Schweißgeschwindigkeit) auf die Zugfestigkeit (rechts)

Ein robuster Fügeprozess besitzt einen großen Toleranzbereich auf Abweichung vom Normalzustand der Bauteile. Dabei verbessert der Einsatz eines Zusatzwerkstoffs nicht nur die metallurgische Eigenschaft der Naht, sondern auch die Spaltüberbrückbarkeit bei großen, aus der Fertigung resultierenden, Toleranzen. Im Bild 7 ist ein Zusammenhang zwischen einem eingestellten Spalt und der Ausbildung der Oberraupe beim Schweißen mit und ohne Zusatzwerkstoff dargestellt. Hierzu wurden 2,0 mm dicke AA6111 T4 Bleche mit definiertem Spalt am I-Stoß mit einer Schweißgeschwindigkeit von 5,5 m/min geschweißt. Bereits ein Verhältnis zwischen dem Drahtvorschub und der Schweißgeschwindigkeit von 1,2 verbessert die Spaltüberbrückbarkeit signifikant. Die Schweißnähte ohne Zusatzwerkstoff weisen bereits bei einem technischen Null-Spalt einen leichten Nahteinfall auf. Ab einer Spaltbreite von 0,1 mm bleibt der Nahteinfall auf der Oberseite bis zu einer Spaltbreite von 0,4 mm konstant bei ca. 0,6 mm. Eine Spaltüberbrückbarkeit ist beim Schweißen ohne Zusatzwerkstoff bis zu einem Spalt von 0,4 mm möglich. Mit Zusatzwerkstoff verbessert sich die Spaltüberbrückbarkeit bei den hier untersuchten Parametern um 0,2 mm. Zudem wirkt sich ein Spalt, aufgrund der Querschnittabnahme, erst ab einer Spaltbreite von 0,2 mm negativ auf die Zugfestigkeit aus.



**Bild 7:** Spaltüberbrückbarkeit mit und ohne Zusatzwerkstoff (AlSi12 – 1,2 mm) beim Elektronenstrahlschweißen an Atmosphäre mit 60 kV Beschleunigungsspannung, 100 mA Strahlstrom und 4 mm Arbeitsabstand

#### 4 Löten mit reduzierter Beschleunigungsspannung

Für das prozesssichere Löten von Aluminiumlegierungen müssen insbesondere zwei Aspekte beherrscht werden. Zum einen muss die Oxidschicht auf der Oberfläche des Aluminiumwerkstücks beseitigt werden und zum anderen

muss genügend Wärme in Lot- und Grundwerkstoff eingebracht werden, um sowohl das Lot aufzuschmelzen, als auch den Grundwerkstoff ausreichend, aber unterhalb der Solidustemperatur, zu erwärmen. Am Institut für Werkstoffkunde (Leibniz Universität Hannover) wurde in den letzten Jahren intensiv an flussmittelfreien lokalen Lötprozessen mittels Plasma- und WIG-Lichtbogen für Aluminiumlegierungen geforscht. Als Lotwerkstoff kam insbesondere das ternäre AlCuSi-System zum Einsatz. Zur Erweiterung der Prozessgrenzen wurde der Einsatz ternärer Multiphasensysteme von Aluminiumlegierungen als Lotwerkstoffe untersucht. Hierbei liegt der Fokus meist auf der Senkung der Schmelztemperatur, um eine größere Prozesssicherheit der Lötprozesse zu erreichen. Mit dem Legierungssystem AlCuSi wurde eine eutektische Schmelztemperatur unterhalb von 530°C erreicht [10, 11, 12].

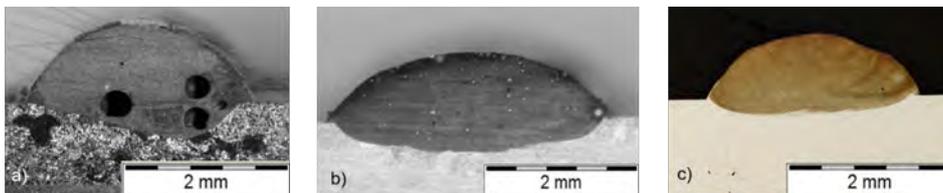
Für die Lötuntersuchungen wurden folgende Zusatzwerkstoffe in Drahtform genutzt:

- Fülldrahtelektrode FILALU 1192 Ø1.2mm, entspricht AlSi12 mit Flussmittelfüllung
- Komposit-Draht AlCuSi (80,6 at.-% Al, 13,4 at.-% Cu und 6,0 at.-% Si) Ø1.2mm wurde im IW hergestellt
- Standard-Draht: AlSi12 Ø1.2mm

Als Grundwerkstoff wurde die Aluminiumlegierung AW6063 verwendet. Um die im Prozess störende Aluminium Oxidschicht zu entfernen, wurde die Oberfläche unmittelbar vor dem Fügeprozess chemisch nach Merkblatt O6 der Aluminium-Zentrale e.V. gereinigt, [13]. Zur Prozesseinstellung wurden Strahlstrom, Arbeitsabstand, Werkstoffvorschub, und Drahtvorschub sowie die Drahtpositionierung (v.a. Abstand, Winkel) variiert. In einer Parameterstudie wurden folgende wesentliche Steuergrößen identifiziert:

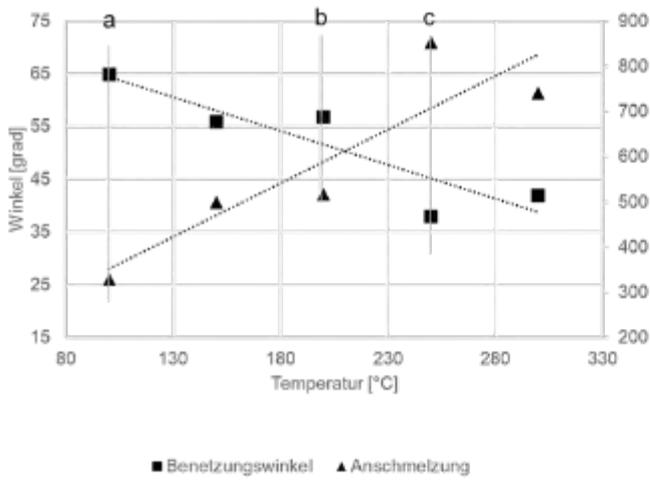
- Der Arbeitsabstand (Abstand zwischen Strahlaustritt und Bauteiloberfläche) liegt bei max. 8mm und ist somit 3 mm größer als beim Schweißprozess (max. 5 mm).
- Die Löttrichtung „nachlaufend-schleppende“ mit einem Drahtabstand zum Werkstück von 1 mm weist ein gutes Nahtbild auf. Dabei sollte der Winkel zwischen der Drahtzufuhr und dem Werkstück 10 Grad nicht überschreiten.
- Im Gegensatz zum Schweißen wird beim Löten ein geringerer Strahlstrom benötigt (26mA - 40mA). Daraus resultiert eine Lötgeschwindigkeit zwischen 1,0 m/min und 2,0 m/min und einer Drahtfördergeschwindigkeit zwischen 1,5 m/min und 3 m/min. Somit liegt die Streckenenergie zwischen 46,8 J/mm -144 J/mm.

Die Nahtbewertung erfolgte an metallographisch präparierten Makroschliffen. Die Lötresultate mit FILALU 1192 Fülldrahtelektrode zeigen eine hohe Nahtporosität und eine ungleichmäßige Anschmelzung des Grundwerkstoffs auf, Bild 8 (a). Auch die Lötversuche mit AlCuSi als Zusatzwerkstoff zeigen ebenfalls eine verstärkte Porosität in der Naht, Bild 8 (b). Aus diesem Grund wurden alle weiteren Untersuchungen mit dem Standard-Draht AlSi12 durchgeführt. Die Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen zeigen für den AlSi12 Draht minimale Schmelzbereiche (209 µm) im Grundwerkstoff, Bild 8 (c). Die Bildung von Poren beim Schweißen oder Hartlöten von Aluminiumlegierungen ist meist auf die Anwesenheit von Wasserstoff zurückzuführen. Das Auftreten von Wasserstoff ist mit mehreren Ursachen verbunden, wie z.B. einer verschmutzten Oberfläche des Materials oder des Lotes (Fett und Öl) und einer feuchten Atmosphäre. Das Vorwärmen des Grundwerkstoffs reduziert den externen Einfluss der Wasserstoffporosität auf ein Minimum [14].



**Bild 8:** Makroschliffe von gelöteten Nähten mit a) Fülldrahtelektrode FILALU 1192, b) Komposit-Draht AlCuSi und c) Standard-Draht AlSi12

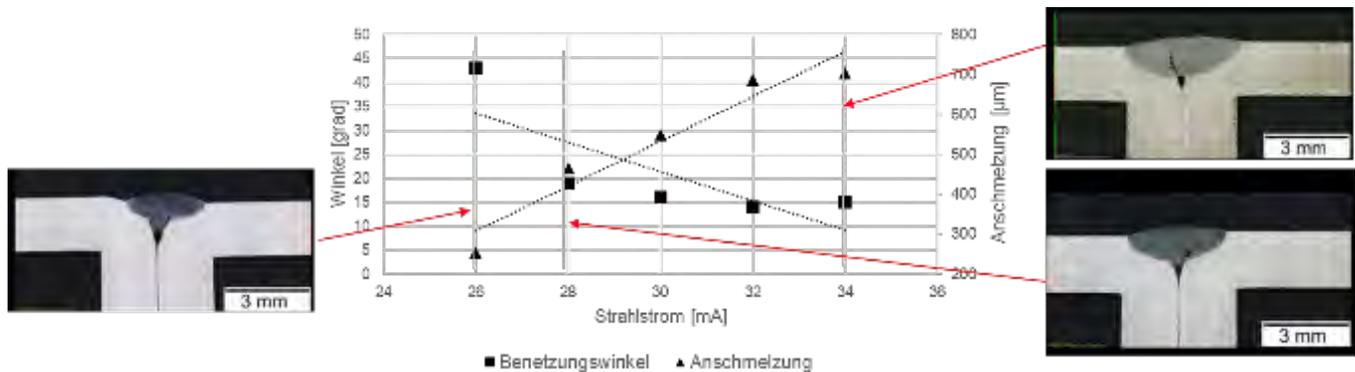
Trotz einer aufwendigen Präparation der Oberflächen wurde eine Tropfenbildung auf der Oberraupe beobachtet. Die Tropfenbildung ist dabei auf eine nicht ausreichende Benetzungseigenschaft des Werkstücks zurück zu führen. Eine Vorwärmung des Grundwerkstoffs verbessern nach Bild 9 die Benetzungseigenschaft signifikant. Hierzu wurde die mechanisch präparierte Oberfläche mittels Elektronenstrahl vorgewärmt und anschließend gelötet. Während der Analyse wurden die Zusammenhänge zwischen der Vorwärmtemperatur, dem Benetzungswinkel und der Anschmelzung untersucht, Bild 9.



**Bild 9:** Einfluss der Vorwärmtemperatur auf den Benetzungswinkel und die Breite der Anschmelzung für Vorwärmtemperatur a) 100°C, b) 150°C und c) 250°C

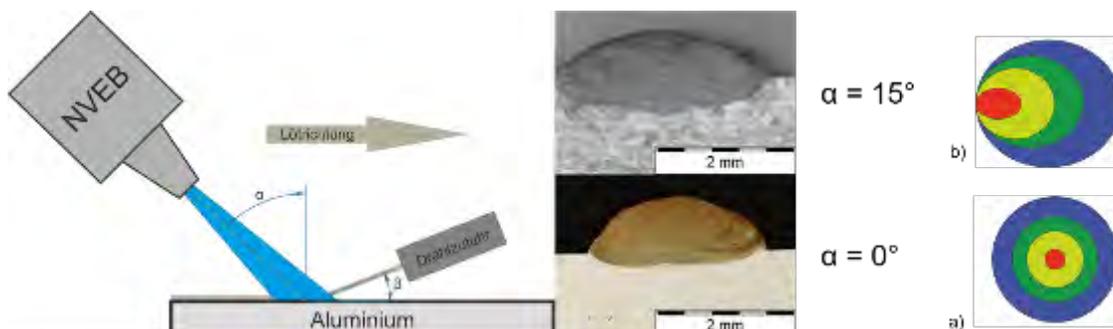
Die optimale Vorwärmtemperatur liegt dabei zwischen 150°C und 200°C. Jedoch wurde ab einer Temperatur von 200°C ein höherer thermischer Verzug der Proben beobachtet. Eine Vorwärmtemperatur von 150°C verringert sowohl den Bauteilverzug als auch die notwendige Vorwärmzeit um 5 Minuten, von 7 Minuten (200°C) auf 2 Minuten (150°C). Zugleich liegt der Benetzungswinkel und die Anschmelzung im Bereich der 200°C vorgewärmten Proben. Aus diesem Grund wurden alle weiteren Lötversuche mit einer Vorwärmtemperatur von 150°C durchgeführt.

Mit dem zuvor ermittelten Prozessfenster und Vorwärmtemperaturen wurde Proben mit Bördelstoßgeometrie gelötet und evaluiert. Dabei wurde der Einfluss vom Strahlstrom auf den Benetzungswinkel und die Anschmelzung untersucht, Bild 10. Mit zunehmendem Strahlstrom nimmt die Anschmelzung des Grundwerkstoffs zu und der Benetzungswinkel ab. Dabei liegt das Optimum zwischen Anschmelzbreite und Benetzungswinkel bei einem Strahlstrom von 28 mA – 30 mA.



**Bild 10:** Einfluss des Strahlstromes auf den Benetzungswinkel und die Breite der Anschmelzung bei einer Drahtfördergeschwindigkeit von 3,0 m/min und Lötgeschwindigkeit von 1,5 m/min.

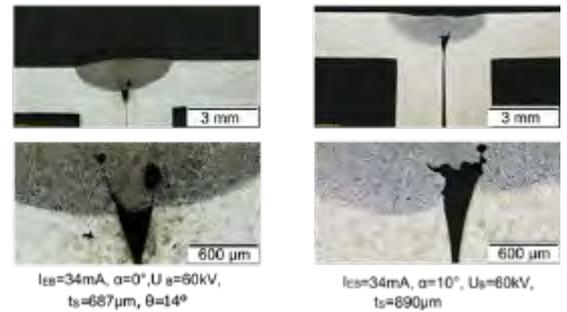
Zur Verminderung der Anschmelzbreite wurde die Leistungsverteilung nach Bild 11 (rechts) durch eine Anstellung des Strahlgenerators verändert. Dabei sollte ein verbessertes Temperaturprofil auf der Oberfläche erzielt werden.



**Bild 11:** Verfahrensprinzip bei angewinkeltem Strahl. Anstellwinkel  $\alpha$  zwischen z-Achse und dem Strahl; Winkel zwischen dem Werkstück und der Drahtzufuhr  $\beta$ . Leistungsverteilung beim angewinkelten Strahl a) und geraden Strahl b)

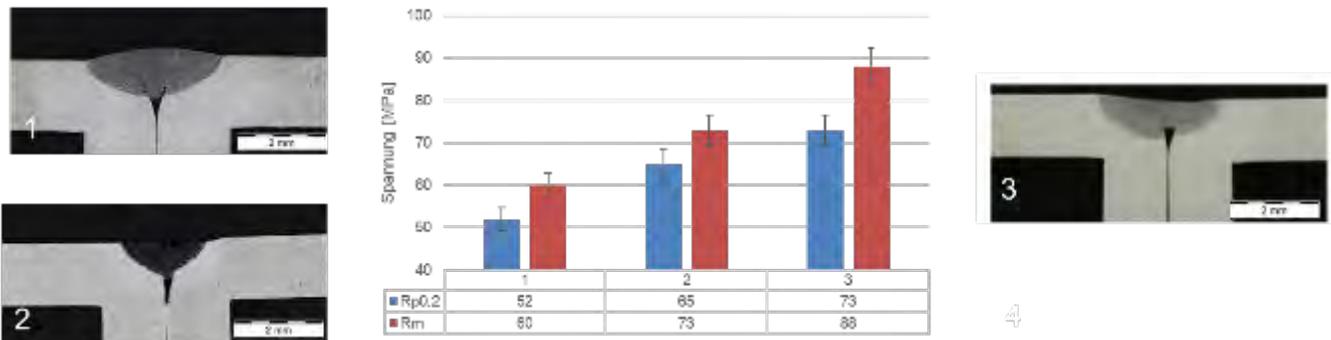
Die Ergebnisse zeigen, dass der Arbeitsbereich bei einem Anstellwinkel zwischen  $10^\circ$  und  $15^\circ$  liegt. Geringe Anstellwinkel ( $\alpha < 10^\circ$ ) und Anstellwinkel  $\alpha > 15^\circ$  weisen eine unzureichende Anbindung auf. Zudem muss bei einem zunehmenden Anstellwinkel der Strahlstrom von 28 mA auf 35 mA erhöht werden. Das wirkt sich positiv auf den Benetzungswinkel auf, vergrößert jedoch den Anschmelzbereich um ca. 200-300  $\mu\text{m}$ . Aus diesem Grund wurde der Anstellwinkel von  $10^\circ$  für weitere Versuche bestimmt. Im Bild 12 sind die Ergebnisse zwischen einem  $10^\circ$  Angestellten und einem senkrechten Strahl gegenübergestellt. Mit einem angestellten Strahl nimmt die Anschmelzbreite und der Benetzungswinkel ab.

Strahlstrom $I_{\text{str}}$ [mA]	Neigungswinkel [°]	Schmelztiefe $t_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	Benetzungswinkel [°]
34	0	687	14
34	10	690	0
32	0	639	15
32	10	777	0



**Bild 12:** Vergleich zwischen einem  $10^\circ$  angestellten Strahl und einem senkrechten Strahl

Im Bild 13 ist der Vergleich zwischen einem angestellten Strahl und einem senkrechten Strahl (mit und ohne Flussmittel gelöteten) dargestellt. Als Flussmittel wurde NOCOLOK(R) Flux der Firma Solvay Fluor GmbH verwendet. Das Flussmittel hat bei einem senkrechten Strahl eine reduzierende Wirkung auf die Anschmelzbreite und den Benetzungswinkel. Dabei reduziert das Flussmittel sowohl die Anschmelzbreite um 20% von 500  $\mu\text{m}$  auf 400  $\mu\text{m}$  als auch den Benetzungswinkel von  $12^\circ$  auf  $0^\circ$ .



**Bild 13:** Makroschiffe und Ergebnisse von Zugversuchen: 1) ohne Flussmittel und einem senkrechten Strahl. 2) ohne Flussmittel und einem  $10^\circ$  angewinkelten Strahl. 3) mit Flussmittel und einem senkrechten Strahl. 1) und 3) wurden mit 30 mA Strahlstrom gelötet. 2) wurde mit 32 mA Strahlstrom gelötet. Bei allen Versuchen lag Vorwärmungstemperatur bei  $150^\circ\text{C}$ , die Drahtfördergeschwindigkeit bei 3,0 m/min und Lötgeschwindigkeit bei 1,5m/min.

Trotz der höheren Nahtporosität beim Löten mit Flussmittel nimmt die Festigkeit im Vergleich zum Löten ohne Flussmittel um 20% zu. Dabei ist die Anschmelzbreite bei flussmittelfreien Lötungen um 22 % schmäler als bei Lötungen mit Flussmittel. Im Vergleich zum flussmittelfreien Löten mit senkrechtem Strahl verbessert sich die Festigkeit bei einem um  $10^\circ$  angestellten Strahle um weitere 25%.

## 5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das Potential sowie die ersten Erkenntnisse beim Schweißen und Löten mit reduzierten Beschleunigungsspannung an konventionellen NonVac EBW Anlagen erarbeitet. Dabei konnte der Strahlwirkung durch strömungstechnischen Optimierungen im Druckstufensystem (DSS) sowie Optimierungen im Strahlerzeugerraum auf über 70% gesteigert werden. Mit Hilfe von statistischer Versuchsplanung wurde an Einschweißversuchen Prozessfenster identifiziert und diese auf andere Nahtgeometrien übertragen. Zusammenfassend wurden folgende Ergebnisse erarbeitet:

- $>70\%$  der emittierten Strahlleistung können zum Fügen genutzt werden
- Parameterfenster für Aluminiumlegierungen mit einer Dicke von bis zu 5 mm erarbeitet
- Robustes Verfahren mit einer Spaltüberbrückbarkeit im I-Stoß von bis 0,4 mm möglich
- Erfolgreiche Parameterübertragung auf Schweißungen im Überlappstoß
- Schweißen mit Zusatzwerkstoff verbessert die Nahteigenschaft signifikant
- Kleines Prozessfenster beim Schweißen mit Zusatzwerkstoff
- Kein Prozessfenster beim Löten

- Vorwärmtemperatur von 150°C verbessert den Benetzungswinkel
- Anstellung des Strahls um 10° vergrößert die Anschmelzbreite und reduziert den Benetzungswinkel und verbessert somit die Zugfestigkeit

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nummer 19.435 N/DVS-Nummer 06.114 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 Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Schrifttum

- [1] C. Lungwitz, „20 Jahre Audi Space Frame – Siegeszug begann auf der IAA,“ 2013.
- [2] L. Brooke, „F-150: Ford drops an aluminum blockbuster,“ SAE Automotive Engineering Magazine, 8 Januar 2014.
- [3] „Leichtbau in Mobilität und Fertigung - Chancen für Baden-Württemberg,“ e-mobil BW GmbH - Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie, 2012.
- [4] L. Quintino, R. Miranda, U. Dilthey, D. Iordachescu, M. Banasik und S. Stano, „Laser Welding of Structural Aluminium,“ Adv. Struct Mater, Bd. 8, pp. 33-57, 2012.
- [5] H. Behnisch, „Schweißen, Schneiden und Veredeln von metalischen Oberflächen mit Elektron- und Laserstrahl - ein anwendungstechnischer Vergleich,“ Laser und Optoelektronik, Bd. 14, Nr. 3, pp. 21-27, 1982.
- [6] P. Stritt, Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrissen beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016, München: Herbert Utz Verlag, 2016.
- [7] S. Jäger, Nonvakuum-Elektronenstrahlschweißen mit gepulstem Strahlstrom und Ultraschallanregung, Hannover: Books on Demand, 2009.
- [8] S. Schiller, U. Heisig und S. Panzer, Elektronenstrahltechnologie, Berlin: VEB Verlag Technik, 1977
- [9] W. Behr, Elektronenstrahlschweißen an Atmosphäre, Aachen: Shaker, 2003
- [10] K. Lau, Nonvakuum-Elektronenstrahlfügen von beschichteten Stahlfeinblechen und Stahl-Aluminium-Mischverbindungen, PZH, Produktionstechn. Zentrum, 2006
- [11] J. Braumöller, „Beitrag zum flussmittelfreien Laserstrahlhartlöten von Aluminiumwerkstoffen,“ Dissertation, 2001
- [12] M. Asgharifar, F. Kong, J. Abramovitch, B. Carlson und R. Kovacevic, „Wettability characterization and adhesion enhancement of arc-treated surface of aluminum alloys,“ The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Bd. 71, Nr. 5, pp. 1463-1481, 2014
- [13] Aluminium-Zentrale e.V., „Aluminium-Merkblatt O6: Beizen und Entfetten von Aluminium,“
- [14] Ostermann F., 2005, „Schweißen von Aluminiumwerkstoffen,“ pp. 435–468.