



Nd:YAG-Laser-MSG-Hybridschweißen von Aluminiumlegierungen im Schiffbau

U. Jasnau, J. Hoffmann und P. Seyffarth, Rostock

Veröffentlicht im DVS-Berichte Band 225 (ISBN 3-87155-683-1):

„Schweißen und Schneiden 2003“

Vorträge der gleichnamigen
Großen Schweißtechnischen Tagung
In Berlin vom 17. bis 19. September 2003

Nd:YAG-Laser-MSG-Hybridschweißen von Aluminiumlegierungen im Schiffbau

U. Jasnau, J. Hoffmann und P. Seyffarth, Rostock

Der Einsatz von Nd:YAG – Lasern im Schiffbau ist gegenwärtig Schwerpunkt mehrerer Forschungsprojekte in Europa. Die SLV Mecklenburg-Vorpommern GmbH ist an einigen dieser Projekte beteiligt und verfolgt dabei vorrangig das Ziel, vorhandene schiffbauliche Fertigungsanlagen mit entsprechender Hybridschweißtechnik nachzurüsten und das gekoppelte Schweißverfahren unter den realen Fertigungsbedingungen auf einer Werft zu entwickeln. Die Untersuchungen zur Qualifizierung des neuen Schweißverfahrens erfolgen dabei u.a. an im Schiffbau zugelassenen Aluminiumlegierungen. Neben der verfahrenstechnischen Seite sind dabei werkstofftechnische Aspekte in hohem Maße zu berücksichtigen. Die Besonderheiten des Einsatzes des neuen Schweißverfahrens im Schiffbau werden deshalb sowohl aus Sicht der Anlagentechnik als auch der Schweißtechnik betrachtet.

1 Ausgangssituation

Mit den seit einigen Jahren verfügbaren Nd:YAG-Laserquellen mit Leistungen über 4 kW ist eine grundlegende Voraussetzung für den Einsatz von Festkörperlasern im Schiffbau erfüllt. Darüber hinaus ist die Übertragbarkeit der Laserstrahlung mittels flexibler Lichtleitfasern und die damit verbundene leichte „Handhabung“ des Werkzeuges Laserstrahl ein Grund für das verstärkte Interesse am Einsatz von Festkörperlasern im Schiffbau.

Das Laser-MSG-Hybridschweißen ist ein laserbasiertes Fügeverfahren, das unter den spezifischen Randbedingungen der schiffbaulichen Fertigung die Vorteile der Lasertechnik auch für den Schiffbau nutzbar machen kann. Gerade bei der Bearbeitung von Aluminiumlegierungen kommen die Vorteile dieses gekoppelten Schweißverfahrens zur Geltung.

Ausgehend von den genannten Gesichtspunkten arbeitet die Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Mecklenburg-Vorpommern GmbH in aktuellen Forschungsprojekten an der Nachrüstung eines Schweißportals mit Hybridschweißtechnik auf Basis eines Festkörperlasers auf der Warnow Werft in Rostock-Warnemünde.

2 Anlagentechnische Voraussetzungen für den Einsatz von Festkörperlasern

Die Implementierung des Hybridschweißprozesses in bestehende Anlagen bzw. der Aufbau von neuen Anlagen stellt je nach Lasertyp unterschiedliche Anforderungen. Dabei sind unterschiedliche Faktoren maßgebend für den Fall der Umrüstung einer bestehenden Laseranlage oder den einer bestehenden Lichtbogen-schweißanlage. Die beiden Varianten des Hybridschweißens mit dem Nd:YAG-Laser und dem CO₂-Laser sind bezüglich der Anlagen- und Prozesstechnik gesondert zu betrachten. Die unterschiedlichen Möglichkeiten der Strahlführung und der unterschiedliche Einfluss der Gase auf den Schweißprozess sind bei Planung, Auswahl und Betrieb entsprechender Anlagen zu beachten [5].

Der Nd:YAG-Laser weist mit seiner geringeren Wellenlänge einen für die Ausrüstung von Anlagen entschei-

denden Vorteil auf. Der Laserstrahl kann über eine flexible Lichtleitfaser zum Bearbeitungsort übertragen werden. Beim CO₂-Laser kann dies nur über ein Spiegelsystem erfolgen. Damit muss der gesamte Strahlführungsweg, also prinzipiell die gesamte Werkzeugmaschine hohe Anforderungen hinsichtlich des dynamischen Verhaltens erfüllen.

Im Gegensatz zum CO₂-Laser kann der Vorteil der flexiblen Strahlführung beim Nd:YAG-Laser durch die Lichtleitfaser genutzt werden, um bestehende Lichtbogenschweißanlagen aufzurüsten. Die Lichtleitfaser wird genau wie Schweißstromkabel und Medienschläuche in Kabelketten oder anderen Aufhängungen verlegt. Damit ist für die Führung des Laserstrahles bis zum Bearbeitungspunkt nur ein sehr geringer Aufwand zu betreiben. Da beim Nd:YAG-Laser nur das dynamische Verhalten des Bearbeitungskopfes, und nicht wie beim CO₂-Laser das der gesamten Strahlführungsstrecke ausschlaggebend ist, ist bei einem ungünstigen dynamischen Verhalten der Fertigungsanlage in gewissen Fällen eine Kompensation dieses Verhaltens durch Ausgleichsregelungen am Bearbeitungskopf selbst denkbar. Diese Ausgleichsregelungen würden dann nur eine Erweiterung des ohnehin unabdingbaren Nahtfolgesystems darstellen.



Bild 1: Im Vordergrund: mit Hybridschweißtechnik nachgerüstetes Schweißportal auf der Warnow Werft in Rostock-Warnemünde mit Sicherheitscontainer für Testschweißungen

Als das wesentliche Problem bei einer Nachrüstung von Anlagen wird somit das Schwingungsverhalten dieser Anlagen angesehen. Die von vornherein als Laserbearbeitungsanlagen vorgesehenen Maschinen werden durch die Hersteller entsprechend verwindungssteif ausgelegt. Angaben zu den tatsächlich am Bearbeitungskopf auftretenden Schwingungen und dem dynamischen Bahnverhalten werden von den Herstellern in der Regel nicht bereitgestellt. Allerdings existieren Normen [6] bzw. Normenentwürfe [7] zur Prüfung solcher Anlagen.

Das für eine Nachrüstung mit Lasertechnik ausgewählte Schweißportal der Warnow Werft weist eine nutzbare Bearbeitungsbreite von 12 m bei einer Gesamtbreite von ca. 16 m auf. Quer zur Schweißrichtung kann es ca. 30 m verfahren werden (Bild 1).

Durch die SLV M-V wurden bereits im Vorfeld der Nachrüstung des Portals auf der Warnow Werft Messungen zum dynamischen Verhalten am Ort des zukünftigen Bearbeitungskopfes durchgeführt. Es wurden gleichzeitig mit einem piezoelektrischen und einem kapazitiven Beschleunigungssensor jeweils Beschleunigungen in eine Richtung gemessen. Dabei wurden die Auslenkungen und Frequenzen in jeder Richtung mit jeweils drei verschiedenen Verfahrgeschwindigkeiten ermittelt.

In Tabelle 1 sind die Extremwerte der einzelnen Bewegungsrichtungen zusammengefasst, wobei die Differenz (Diff.) aus den jeweiligen Extremwerten um den Nullpunkt (Min. und Max.) hier als Schwingweite bezeichnet wird.

Mit Abstand am geringsten fallen die Höhenschwingungen aus. Sie sind für weitere Betrachtungen vernachlässigbar. Die Längs- und Querschwingungen liegen mit 130 und 171 μm Schwingweite bei der höchsten Verfahrgeschwindigkeit höher, sind jedoch in Anlehnung an [6] und [7] im zulässigen Bereich. Bei einer Verfahrgeschwindigkeit von 5 m/min sind die Schwingweiten noch geringer. Betrachtet man in Anlehnung an die beiden genannten Normen ([6] und [7]) den dort definierten Überschwingfehler f_0 als eine halbe Schwingweite der bei den Messungen am Portal ermittelten Schwingweiten, so erfüllt das Portal die Anforderungen an die höchste Genauigkeitsklasse A für die Bahngenauigkeit entsprechend beiden Normen. Nach [7] gelten Bearbeitungsanlagen mit der Einstufung in die Klasse A auch als geeignet für „super high accuracy welding“.

Durch die Messungen und die vorliegenden praktischen Erfahrungen beim Hybridschweißen mit dem Portal konnte die Eignung des betreffenden Portals für den Einsatz von Lasertechnik nachgewiesen werden.

Bei gleichartigen Messungen an drei weiteren Portalen auf Werften in Mecklenburg-Vorpommern wurde fest-

gestellt, dass auch diese Portale für die Nachrüstung mit Lasertechnik geeignet sind.

Tabelle 1: gemessene Grenzauslenkungen am Ort des Laserbearbeitungskopfes am Portal der Warnow Werft

Verfahrgeschw. [m/min]	Grenzauslenkungen in Bezug zur Vorschubrichtung z			
		quer (y) [μm]	hoch (x) [μm]	längs (z) [μm]
5	Min.	-46,6	-2,4	-28,8
	Max.	54,4	7,8	35,2
	Diff.	101,0	10,3	64,0
10	Min.	-59,2	-5,4	-65,2
	Max.	61,4	10,2	65,0
	Diff.	120,6	15,6	130,2
15	Min.	-79,9	-9,3	-44,7
	Max.	91,7	13,7	55,7
	Diff.	171,6	23,0	100,4

3 Laser-MSG-Hybridschweißen zum Fügen von Aluminiumknetlegierungen

In der Schweißtechnik versteht man unter Hybridschweißen ganz allgemein die Kopplung zweier unterschiedlicher Wärmequellen in einer gemeinsamen Schmelz- und Prozesszone. Dadurch unterscheiden sie sich von Verfahrenskombinationen, bei denen zwei vollständig getrennte Schmelzbäder existieren. Der Ausdruck „hybrid“ stammt ursprünglich aus dem lateinischen und bedeutet soviel wie „von zweierlei Herkunft“, „aus Verschiedenem“ zusammengesetzt.

Hybridschweißtechnologien, die durch die Kopplung herkömmlicher Wärmequellen entstehen, werden bereits seit längerer Zeit auch industriell genutzt. Zum Fügen von Aluminiumlegierungen ist beispielsweise das Plasma-MIG-Schweißen bekannt geworden.

Mit der zunehmenden Entwicklung der Lasertechnik wurden bereits in den 70-er Jahren die Grundlagen der Kopplung von Laserstrahl und Lichtbogen untersucht und beschrieben [1]. Erste Versuche wurden vorrangig mit dem WIG-Lichtbogen und dem CO_2 -Laser durchgeführt.

In Abhängigkeit von der eingesetzten Strahlquelle unterscheidet man heute im Wesentlichen zwei praxisrelevante Verfahrensarten: das CO_2 -Laser-Hybridschweißen und das Nd:YAG-Laser-Hybridschweißen. Die Kopplung der beiden unterschiedlichen Lasertypen mit verschiedenen herkömmlichen Wärmequellen (Plasmalichtbogen, WIG-Lichtbogen, MSG-Lichtbogen) ergibt eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahrensvarianten zur Lösung schweißtechnischer Aufgabenstellungen. Das Laser-Metall-Schutzgas-Hybridschweißen zeichnet sich dabei durch die prozessbedingt abschmelzende Drahtelekt-

rode aus. Der Werkstoffübergang erfolgt in der schmelzflüssigen Phase, wodurch sich die Prozesssicherheit und die Unempfindlichkeit gegenüber Positioniertoleranzen im Vergleich zum reinen Laserstrahlschweißen vergrößern. Insbesondere wenn der Werkstoff oder Toleranzen hinsichtlich der Güte der Kantenvorbereitung den Einsatz von Zusatzmaterial erfordern, bietet sich das Laser-MSG-Hybridschweißen als Alternative zum reinen Laserstrahlschweißen an.

In Bild 2 ist das Verfahrensprinzip des Laser-MSG-Hybridschweißens schematisch dargestellt. Der Laserstrahl zerstört im Schweißprozess zuerst die Oxidschicht der Aluminiumlegierung. Eine mechanische Vorbereitung der Oberfläche an den Fügekanten wie beim MSG-Schweißen ist somit nicht notwendig. Der Laserstrahl erzeugt die für den Tiefschweißmodus charakteristische Dampfkapillare. Das dabei entstehende laserinduzierte Plasma ist hoch ionisiert. Somit sind stets sehr gute Bedingungen für die Zündung und die Stabilität des MSG-Lichtbogens vorhanden. Durch diese Stabilisierung und die damit verbundene Ausrichtung des Lichtbogenfußpunktes auf den Fokus des Laserstrahles auf bzw. im Werkstück wird jegliches „Wandern“ des Lichtbogens während des Schweißens unterdrückt. Damit ist die Voraussetzung für die Anwendung sehr hoher Schweißgeschwindigkeiten beim Laser-MSG-Hybridschweißen gegeben.

Unter anderem in [2] wird neben der Stabilisierung des Lichtbogens ein erhöhter thermischer Wirkungsgrad des Lichtbogens im gekoppelten Prozess beschrieben. Begründet wird dies mit der bereits erfolgten Ionisation der Lichtbogenstrecke durch den Laserstrahl und durch Änderungen im Charakter der an der Anode ablaufenden Prozesse unter dem Einfluss der Laserstrahlung. Durch den hohen elektrischen Wirkungsgrad der Schweißstromquelle ist das Hybridschweißen zumindest energetisch effizienter als das herkömmliche Laserstrahlschweißen bei gleichgroßen aufgewandten Gesamtleistungen.

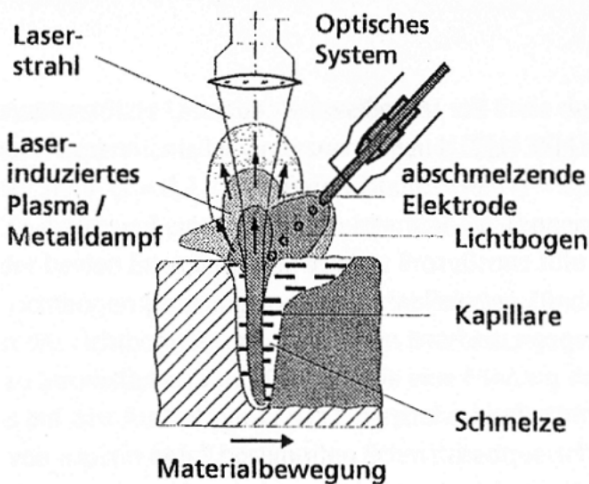


Bild 2: Verfahrensprinzip des Laser-MSG-Hybridschweißens

Beim Laser-MSG-Hybridschweißen von Aluminiumlegierungen wird ausschließlich die hier (Bild 2) skizzierte Anordnung von Laserstrahl und Lichtbogen in Bezug zur Vorschubrichtung angewendet, d.h. die abschmelzende Elektrode folgt dem Laserstrahl stehend nachlaufend. Ein Vorlaufen der Elektrode und damit verbunden eine Einkopplung des Laserstrahles in das vom Lichtbogen erzeugte Schmelzbad, wie es sich bei der Bearbeitung von Stahl in einigen Fällen bewährt hat, führt wegen der geringen Viskosität der Aluminiumschmelze zu starken Schmelzbadauswürfen und somit zu einer sehr schlechten Qualität der entstehenden Schweißnaht.

Beim Hybridschweißen wird ein möglichst kleiner Anstellwinkel des MSG-Brenners bzw. der Kontaktdüse relativ zur Laserstrahlachse angestrebt. Dieser Winkel wird im Wesentlichen durch die Bauform und die Geometrie der Einzelteile (insbesondere der Gasdüse) und die Strahlgeometrie (Brennweite, Strahldivergenz) beeinflusst. Der Abstand zwischen Laserstrahlaufftreffpunkt und Auftreffpunkt der Drahtelektrode wird bei der Aluminiumbearbeitung meist zwischen 2 und 5 mm gewählt. Zu beachten ist dabei, dass durch den Lichtbogendruck eine Mulde im Schmelzbad entsteht. Eine Anpassung der Fokallage des Laserstrahles an diese Vertiefung zur Maximierung der Einschweißtiefe hat sich in einigen Fällen als vorteilhaft erwiesen.

Das reine Laserstrahlschweißen von Aluminiumknetwerkstoffen ist nach [3] auf Nahtdicken von maximal 6 mm begrenzt. Grund dafür sind die beim reinen Laserstrahlschweißen auftretenden Prozessporen, die weit aus größer sind als die sonst vom Aluminiumschweißen bekannten Wasserstoffporen. Zur Vermeidung von Prozessporen beim reinen Laserstrahlschweißen sind Strategien entwickelt worden, die letztendlich immer zu einer Erhöhung der benötigten Laserleistung bei konstanter Einschweißtiefe führen. Hier stellt das Laser-MSG-Hybridschweißen eine günstige Möglichkeit zur Erhöhung der Leistung am Werkstück dar. Durch die Kopplung von Laserstrahl und Lichtbogen können die mit dem Laser auch an Aluminiumlegierungen möglichen hohen Einschweißtiefen bei gleichzeitig hohen Schweißgeschwindigkeiten ohne die Gefahr von Prozessporen realisiert werden. Der zusätzliche Wärmeintrag des Lichtbogens, die Anpassung der Fokallage des Laserstrahles an die entstehende Schmelzbadmulde und die geänderte Schmelzbadynamik führen darüber hinaus zu einer Vergrößerung der Einschweißtiefe. Durch die im Vergleich zum reinen Laserstrahlschweißen größere Schmelzbadgeometrie und die geänderten Strömungsverhältnisse im Schmelzbad verbessern sich einerseits die Bedingungen für die Ausgasung gebildeter Poren, andererseits aber auch die Bedingungen für eine metallurgische Beeinflussung des Schweißgutes durch entsprechenden Zusatzwerkstoff.

Die metallurgische Beeinflussung durch den Zusatzwerkstoff stellt in Zusammenhang mit dem gegenüber dem reinen Laserstrahlschweißen günstigeren Nahtprofil auch den Grund für eine größere Rissunempfindlichkeit beim Laser-MSG-Hybridschweißen dar. Im gemeinsamen Schmelzbad sind die Erstarrungsbedingungen wegen der günstigeren Wachstumsrichtung der Kristalle besser als beim reinen Laserstrahlschweißen. Außerdem kommt es durch das Zusammentreffen einer hohen Schweißgeschwindigkeit mit einer hohen Energieeinbringung zu einer starken konstitutionellen Unterkühlung und somit zu einer feinkörnigen Erstarrung. Dem Entstehen von Erstarrungsrissen wird damit entgegengewirkt.

Wie beim Laserstrahlschweißen lässt sich auch mit dem Laser-MSG-Hybridschweißen eine sehr geringe Streckenenergie im Vergleich zu den üblichen Lichtbogenschweißverfahren realisieren. Dies führt zu einer wesentlich geringeren Ausdehnung der Wärmeeinflusszone bei aushärtbaren und nicht aushärtbaren, kaltverfestigten Legierungen. Außerdem lassen sich als Folge dieser geringen Wärmeeinbringung die nachfolgend notwendigen Richtarbeiten an den bearbeiteten Bauteilen reduzieren.

Die entstehende Nahtgeometrie kann beim Laser-MSG-Hybridschweißen wie beim MSG-Schweißen auch über die Variation der Anteile von Argon und Helium im Schutzgas beeinflusst werden. Höhere Anteile an Helium führen auch hier zu einer besseren Wärmeübertragung auf das Werkstück und zu einem breiteren Einbrandprofil, welches z.B. auch die Ausgasung von entstandenen Prozessporen unterstützt. Die Zündung und Aufrechterhaltung des Lichtbogens wird dabei wegen der vorhergehenden Ionisation der Lichtbogenstrecke durch den Laserstrahl nicht negativ beeinflusst. Insofern können auch hoch heliumhaltige Gasgemische ohne Nachteile für den Lichtbogenprozess genutzt werden.

4 Schweißen der Legierung EN AW – 5083-O

Für die schweißtechnische Qualifizierung des neuen Verfahrens wurde in Zusammenarbeit mit der Warnow Werft in Rostock-Warnemünde die o.g. seewasserbeständige und nichtaushärtbare Legierung im Zustand „weich“ ausgewählt. Diese Auswahl ist das Ergebnis von Konstruktion und Dimensionierung einer kompletten Brückensektion aus Aluminiumlegierungen für ein typisches Containerschiff von Seiten der Werft.

Für die Schweißversuche an der SLV M-V kam folgende technische Ausstattung zum Einsatz:

- Diodengepumpter Festkörperlaser DY 044 der Firma Rofin Sinar Hamburg mit einer maximalen Ausgangsleistung von 4,4 kW (max. Leistung am Werkstück ca. 4,0 kW)

- Laserbearbeitungsanlage „modulaser“ mit einer Bearbeitungsfläche von ca. 6900mm*1500mm*1500mm
- Schweißstromquelle „aristo“ LUD 450 der Firma ESAB
- Vorschubpaket MEPTTZ der Firma DINSE im push-pull-Betrieb
- Hybridschweißkopf der SLV M-V mit Standardkomponenten der Firmen Rofin Sinar (Optik) und DINSE (MSG-Brenner)

Vor den Testschweißungen wurden die Blechoberflächen (bei Einschweißungen) bzw. die Stoßkanten (bei Verbindungsschweißungen) entfettet und gereinigt. Bei Verbindungsschweißungen (I-Naht am Stumpfstoß bzw. T-Stoß) wurden die Ecken der Stoßkanten mit einer Feile leicht angefast bzw. gebrochen.

Eine Entfernung bzw. gezielte Verringerung der Oxidschicht im Fügebereich fand nicht statt, ebenso wurden die geschlagenen Fugekanten nicht weiter bearbeitet.

Als Zusatzwerkstoffe wurden drei Arten von Drahtelektroden ausgewählt. Neben den in Deutschland und Europa genormten und für den betrachteten Grundwerkstoff empfohlenen Zusatzwerkstoffen SG-AlMg5 und SG-AlMg4,5MnZr kam der aus der Ukraine stammende Zusatzwerkstoff Sv-AlMg6s mit Beimengungen von Zirkon und Scandium zum Einsatz. Alle Zusatzwerkstoffe lagen als Drahtelektrode mit einem Durchmesser von 1,2 mm vor.

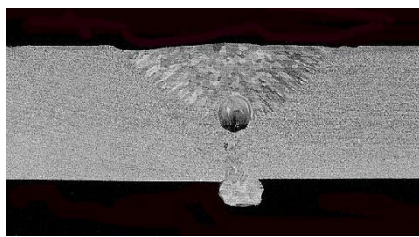
Die Verwendung von Zusatzwerkstoffen mit unterschiedlich hohen Gehalten an Magnesium, Mangan und kornfeinenden Elementen zielte auf das Erkennen von Unterschieden im Schweißverhalten und in den Eigenschaften der entstehenden Verbindungen.

Als Schutzgase standen Argon und Helium sowie Gemische aus diesen beiden Gasen in verschiedenen Mischungsverhältnissen zur Verfügung. Auf den Einsatz von dotierten Gasen als Schutzgas wurde bei den durchgeführten Versuchen verzichtet. Die größte Anzahl der Versuche wurde wegen einer guten Wirkung auf das Einbrandprofil mit einer Gasmischung aus 70% He und 30% Ar durchgeführt.

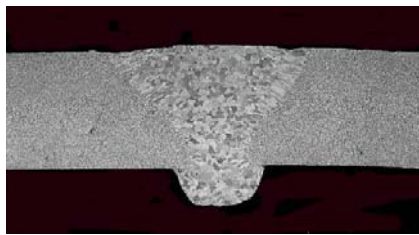
Ausgehend von bisherigen Erfahrungen zum Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen an der SLV M-V und weiteren Erkenntnissen gemäß dem Stand der Technik besteht beim laserbasierten Fügen der Legierung EN AW – 5083-O in größeren Blechdicken das Hauptproblem in der Gefahr der Entstehung von Prozessporen aufgrund der instabilen laserinduzierten Dampfkapillare. Die Unempfindlichkeit des Werkstoffes gegenüber der Entstehung von Erstarrungs- und Wiederaufschmelzrisen ist auch beim Laserstrahlschweißen gegeben.

Für die Einstellung eines ruhigen und spritzerarmen Schweißprozesses mit röntgenografisch porenfreien Nähten wurden zunächst Einschweißungen an 8 und 10 mm dicken Blechen durchgeführt. Dabei wurde abwechselnd einer der ausgewählten Zusatzwerkstoffe verwendet.

Unterschiede im Schweißverhalten der unterschiedlichen Zusatzwerkstoffe wurden weder bei diesen vorbereitenden Einschweißungen noch bei den späteren Verbindungsschweißungen festgestellt.



Schweißgeschw. : 2500 mm/min
mit Prozessporen



Schweißgeschw. : 2000 mm/min
keine Prozessporen

Bild 3: Vermeidung von Prozessporen durch Anpassung des Einbrandprofils infolge geänderter Streckenenergie beim Hybridschweißen (Legierung EN AW – 5083-O, $t=5\text{mm}$)

Im Prozessbereich des Kurz- bzw. des Sprühlichtbogens kam es zu verstärkter Spritzerbildung und demzufolge zu einer starken Beeinflussung des Schmelzbades mit dem Ergebnis ungleichmäßiger Obernähte. Partiiell gute Ergebnisse hinsichtlich der Obernähte (wie z.B. in Bild 3) konnten nicht reproduziert werden. Bereits hier wird aber die Bedeutung des Einbrandprofils für das Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein von Prozessporen deutlich. Die Absenkung der Schweißgeschwindigkeit führte zu einer Erhöhung der Streckenenergie und zu einem geänderten Einbrandprofil, welches die Entstehung von Prozessporen verhindert oder deren Ausgasung erleichtert.

Auf Grund der nicht reproduzierbaren Ergebnisse bei den Versuchen im Kurz- und Sprühlichtbogen wurde bei den weiteren Versuchen ausschließlich mit dem Impulslichtbogen gearbeitet. Der besser kontrollierbare Tropfenübergang machte sich von Anfang an positiv bemerkbar. Auch bei der Arbeit mit dem Impulslichtbogen wurden vorerst die in der Schweißmaschine hinterlegten Werte für einen Zusatzwerkstoff vom Typ AlMg und dem Schutzgas Argon genutzt. Die Verwendung von Gasgemischen mit hohen Heliumanteilen zur Erzeugung prozessporenvermeidender Einbrandprofile machte eine Anpassung dieser Werte erforderlich.

Abschließend wurden mit optimierten Parametersätzen Prüfstücke von I-Nähten an 5 mm dicken Blechen geschweißt und die mechanisch-technologischen Eigen-

schaften ermittelt. Querschliffe der entsprechenden Prüfstücke zeigt Bild 4.

Die Sichtprüfung aller geschweißten Prüfstücke ergab keine unzulässigen Unregelmäßigkeiten an Obernaht und Wurzel.

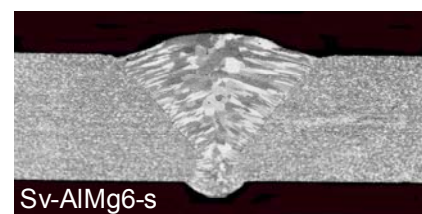
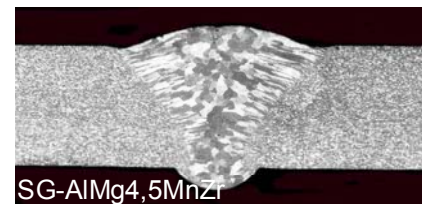
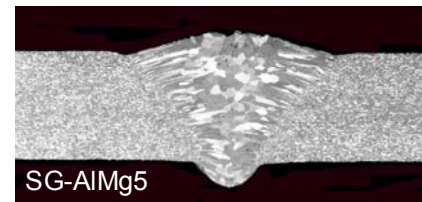


Bild 4: I-Nähte an EN AW 5083-O mit verschiedenen Zusatzwerkstoffen ($t=5\text{mm}$, $v_s=2800\text{ mm/min}$)

Bei der Durchstrahlung der 6 Prüfstücke konnten in 2 Prüfstücken Prozessporen detektiert werden, deren Größe und Verteilung aber die Einordnung in die Bewertungsgruppe B gemäß [9] und [10] zuließ.

An den präparierten Makroschliffen wurde die äußere Nahtgeometrie (Nahtüberhöhung, Wurzelüberhöhung und Randkerben) vermessen. Zur Beurteilung wurden auch hier sowohl [9] als auch [10] herangezogen. Hinsichtlich der äußeren Nahtabmessungen konnte ebenfalls eine Einordnung der geschweißten Verbindungen in die Bewertungsgruppe B erfolgen, wobei die Grenzwerte für die Nahtüberhöhung wegen des großen Einflusses des Lichtbogens auf die Formung der Obernaht aus [9] entnommen wurden. Wurzelüberhöhung und Randkerben wurden nach [10] beurteilt.

Die Härteprüfungen ergaben die für Verbindungen dieses „weichen“ Grundwerkstoffes typischen, gleich bleibenden Härtewerte über Grundwerkstoff, Wärmeinflusszone und Schweißgut.

Die Quersugversuche wurden ausschließlich mit abgearbeiteter Nahtüberhöhung durchgeführt. Für Verbindungen des Grundwerkstoffes EN AW – 5083-O wird in [8] eine Mindestzugfestigkeit von 275 N/mm^2 gefordert, dies entspricht der Mindestzugfestigkeit des Grundwerkstoffes. Die Zugversuche erbrachten die Ergebnisse gemäß **Tabelle 2**. Alle Zugproben erreichten die geforderte Mindestzugfestigkeit.

Weiterhin wurden Querbiegeversuche als „freie“ Biegeversuche gemäß [8] mit dem für die Blechdicke von 5 mm geforderten Biegedorndurchmesser von 30 mm durchgeführt. Alle geprüften Proben erreichten den Biegewinkel von 180° ohne zu berücksichtigende Fehlstellen.

Tabelle 2: Ergebnisse der Querzugversuche an den geschweißten Proben

GW:	SG-ALMg5	SG-ALMg4,5MnZr	Sv-ALMg6-s
EN AW - 5083-O	Min...Max Mittelwert	Min...Max Mittelwert	Min...Max Mittelwert
R _m (N/mm ²)	280.8...303.7 286,7	283.2...293.6 289,5	278.2...295.1 282,7
A _{65mm} (%)	11.8...14.2 13,2	13.1...19.4 14,5	12.2...15.0 13,1
Z (%)	16.9...21.3 19,8	20.13...24.75 23,24	17.0...28.9 21,6

Nach Abschluss der Schweißversuche an Stumpfnähten wurden die Schweißparameter für das Schweißen von T-Stößen optimiert. Auch hierbei gelang die Einstellung prozesssporenfreier Nähte unter Anwendung der ausgewählten Zusatzwerkstoffe und die Erfüllung der Forderungen hinsichtlich einer Schweißverfahrensprüfung.

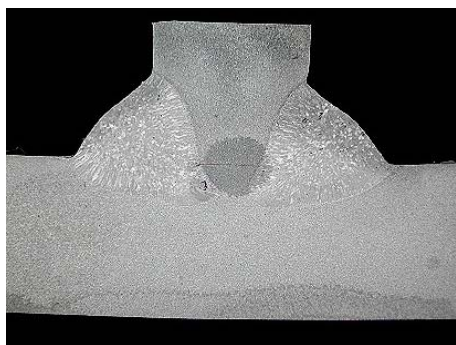


Bild 5: Hybridgeschweißter T-Stoß an EN AW – 5083-O (t=8 mm, v_s=2000 mm/min)

5 Zusammenfassung

Mit den im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte durchgeführten Arbeiten konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Nachrüstung herkömmlicher schiffbaulicher Fertigungsanlagen mit Festkörperlasern nicht nur technisch machbar, sondern aus Sicht der Schweißtechnik auch sinnvoll ist.

Die Anwendung des Laser-MSG-Hybridenschweißens in einer Fertigung setzt die Kenntnis der Wirkungen und Wechselwirkungen einer außerordentlichen Vielzahl von Schweißparametern voraus. Zu den ohnehin schon zahlreichen Parametern des Laserstrahlschweißens kommen beim Hybridenschweißen noch die Parameter des MSG-Prozesses hinzu. Gerade wegen dieser

Vielzahl an Parametern und Wechselwirkungen kann davon ausgegangen werden, dass das Laser-MSG-Hybridenschweißen zum heutigen Zeitpunkt erst in den Anfängen erforscht ist und noch ein großes industrielles Entwicklungs- und Anwendungspotenzial aufweist.

6 Danksagung

Die Forschungsarbeiten wurden im Rahmen verschiedener Projekte durch das BMBF unterstützt. Hierfür sei ausdrücklich gedankt.

7 Schrifttum

- [1] Eboo, M.; Steen, W.M.; Clarke, J.: "Arc Augmented Laser Welding"; in „Conference Proceedings of the 4th Intern. Conference of Advances in Welding Processes“, paper 17, Harrogate, 1978
- [2] Gvosdetzky, V.S.; Krivtsun, I.V.; Chizhenko, M.I.; Yarinich, L.M. : "Laser-Arc Discharge – Theorie and Applications"; Harwood Academic Publishers, 1995
- [3] N.N.: DVS-Merkblatt 3202-3: Qualitätssicherung von CO₂-Laserstrahlschweißarbeiten, Laserstrahlschweißbeignung von metallischen Werkstoffen
- [4] Fortain, J.M. et.al.: "Recent developments in arc welding with shielding gas of aluminium and its alloys!"; in „Welding International“, Vol. 15 (2001), No. 4, p. 294...300
- [5] Jasnau, U.; Walz, C.; Hoffmann, J.; Seefeld, T.; Seyffarth, P.; Seepold, G. : „Systemvergleich zum Laser-MSG-Hybridenschweißen mit unterschiedlichen Strahlquellen an Stahl und an Aluminiumlegierungen“; 3. Sondertagung „Schweißen im Schiffbau und Ingenieurbau“, Tagungsband S.51 – 65, Hamburg, April 2002
- [6] N.N.: „prEN ISO 15616: Abnahmeprüfungen für CO₂-Laserstrahlanlagen zum Schweißen und Schneiden“, Beuth-Verlag, 1998
- [7] Japan Welding Engineering Society: "proposal: Acceptance tests for Nd:YAG-laser beam welding machines – part 1: machines with optical fiber delivery"; IIW – document, 2001
- [8] N.N.: „Germanischer Lloyd, Klassifikations- und Bauvorschriften, II – Werkstoff- und Schweißtechnik, Teil 1 – Metallische Werkstoffe“; Hamburg, 1998
- [9] N.N.: „DIN EN 30042: Lichtbogenschweißverbindungen an Aluminium und seinen schweißgeeigneten

Legierungen – Richtlinie für die Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten“; Beuth-Verlag, 1994

[10] N.N.: „DIN EN ISO 13919-2: Elektronenstrahl- und Laserstrahl-Schweißverbindungen, Richtlinie für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten, Teil2: Aluminium und seine schweißgeeigneten Legierungen“; Beuth-Verlag, 2001