

Hybridschweißen – eine interessante Ergänzung der Laserschweißtechnik

C. Walz, T. Seefeld, G. Sepold, Bremer Institut für angewandte Strahltechnik

Abstract

Das Laserstrahlschweißen ist nach heutigem Stand der Technik aufgrund der Heißrißproblematik auf Blechdicken bis ca. 10 mm begrenzt. Außerdem ist die oft nicht realisierbare Forderung nach sehr genauen Kantenvorbereitungen eine Einschränkung des Verfahrens.

Durch Einsatz der Hybridtechnik, einem kombinierten Laser-Lichtbogenschweißenverfahren, lassen sich die Vorteile der beiden Einzelverfahren günstig kombinieren.

Die Hybridtechnik ermöglicht das Überbrücken von Spaltmaßen, die beim Laserstrahlschweißen nicht akzeptabel sind. Außerdem kann mit geringem Aufwand die Streckenenergie so angepaßt werden, daß sich im Schiffbau übliche große Blechdicken mit variablen Spaltmaßen sicher verschweißen lassen und die Schweißnähte sich hinsichtlich ihrer Geometrie anpassen lassen.

Einleitung

Hybridschweißen ist in diesem Fall die Verfahrenskombination des Laserstrahlschweißens mit dem MIG-Schweißen.

Der Laserstrahlprozeß zeichnet sich aufgrund seiner konzentrierten Energieeinbringung in einem kleinen Bearbeitungsfleck durch tiefe, schlanke Schweißnähte bei hohen Prozeßgeschwindigkeiten aus. Diese erfordern eine genaue Kantenvorbereitung, ermöglichen andererseits ein verzugsarmes Schweißen. Beim MIG-Prozeß hingegen wird die Energie in einer wesentlich breiteren Prozeßzone bei geringeren Schweißgeschwindigkeiten eingebracht. Dadurch ergeben sich breite Schweißnähte und durch den hohen Energieeintrag größere Verzüge der geschweißten Komponenten.

Die ersten Untersuchungen zum lichtbogenunterstützten Laserstrahlschweißen wurden bereits vor mehr als zwei Jahrzehnten von Steen durchgeführt [1]. Die Vorteile und das große Potenzial des Verfahrens wurden verstärkt Mitte der Neunziger durch Maier oder Dilthey untersucht [2, 3]. Durch die zweite Energiequelle lassen sich die beim Laserschweißen erreichten Schweißgeschwindigkeiten weiter steigern [4].

Die Kombination beider Verfahren ermöglicht die Verknüpfung der Vorteile der Einzelverfahren zu guten Spaltüberbrückbarkeiten bei hohen Prozeßgeschwindigkeiten, hoher Prozeßeffizienz und gesteigerter Prozeßstabilität.

Das Laserschweißen von unlegierten Stählen mit Blechdicken oberhalb 10 mm ist aufgrund der sich ergebenden schlanken Nahtgeometrie und der daraus resultierenden Deformationsbeanspruchungen während der Erstarrungsphase heißrißgefährdet [5]. Die im folgenden beschriebene Beeinflussung der Nahtgeometrie bietet in dieser Hinsicht die Möglichkeit, eine gezielte Verbesserung der Heißrißanfälligkeit zu erreichen.

Versuchsaufbau

Als Laserquelle stand für die durchgeführten Versuche ein 10 kW CO₂-Laser (RS10000) mit einer Brennweite von 300 mm zur Verfügung. Kombiniert wurde der Laser mit einer Dalex Vario MIG 400-Anlage mit einem Binzel Everest Maschinenbrenner. Die freie Drahtlänge betrug 12 mm. Eine besondere Problematik beim Hybridschweißen mit CO₂-Lasern ergibt sich durch die Wahl des Schutzgases. Zur Vermeidung einer zu starken Plasmaabschirmung wird beim reinen Laserschweißen in den meisten Fällen ein hoch Helium-haltiges Gas eingesetzt [6]. Das MIG-Schweißen von Stahl wird hingegen mit überwiegend Argon-haltigen Schutzgasen durchgeführt. Die unterschiedlichen Gase erfordern so eine Abstimmung der Gasmischung auf die besonderen Anforderungen des Hybridschweißens. In diesem Fall wurde ein Gasgemisch von Helium (75%), Argon (25%) für Baustahlschweißungen bzw. He (75%), Ar (23%) und Sauerstoff (2%) für Edelstahlschweißungen eingesetzt, die jeweilige Durchflußmenge betrug 30 l/min.

Die Laser-Lichtbogen-Anordnung ist der Skizze in Bild 1 zu entnehmen.

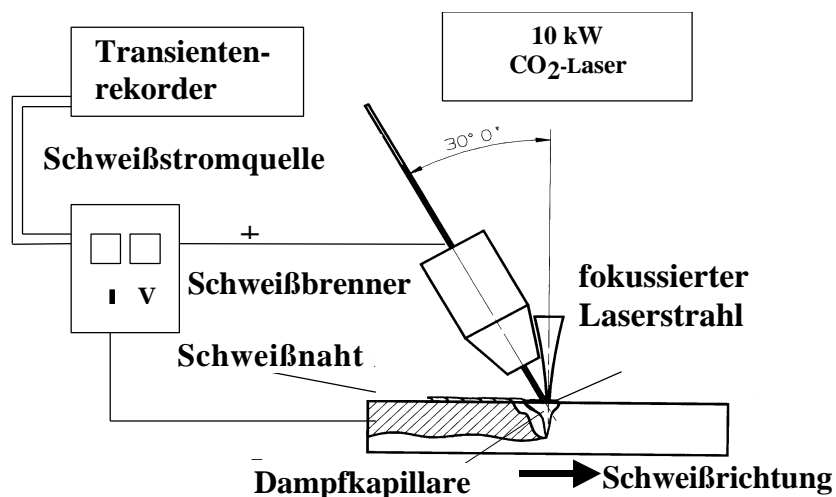


Bild 1: Versuchsaufbau mit Meßeinrichtung (Transientenrekorder der Fa. Nicolet)

Der Laser läuft dem Lichtbogen voraus, trifft aber in einem gemeinsamen „Fokuspunkt“ auf die Blechoberfläche ($z_f = 0$ mm). Das Schutzgas wird über die Gasdüse des MIG-Brenners zugeführt. Ein an die Stromquelle angeschlossener Transientenrekorder ermöglicht die

zeitlich hochauflösende Aufzeichnung der auftretenden Strom- und Spannungsverläufe während der Schweißungen.

Werkstoffe

Für die ausgewerteten Versuche kamen zwei Werkstoffe mit entsprechenden Zusatzdrähten zum Einsatz. Die Ermittlung der Einflüsse der Schweißparameter auf die Nahtgeometrie wurde an einem austenitischen Edelstahl (1.4404, Blechdicke 10 mm) mit einem entsprechenden Draht 1.4302 ($\varnothing = 1,2$ mm) durchgeführt. Versuche zur Prozeßstabilität wurden an einem konventionellen Baustahl S355M der Blechdicke 13 mm (Zusatzwerkstoff G3Si2, $\varnothing = 1,2$ mm) durchgeführt. Dabei kamen optimierte Schweißparameter aus vorangegangenen Studien zum Einsatz.

Versuchsdurchführung

Ziel der Versuche im ersten Teil war die Ermittlung der Einflüsse verschiedener Schweißparameter auf die Nahtgeometrie. Die Schweißungen dazu wurden als Blindnaht ausgeführt. Die so erhaltenen Erkenntnisse sollen Grundlage für die spätere Spaltmaßangepaßte Gestaltung der Nahtgeometrie sein, um z.B. den Aufwand für Nahtvorbereitung und Nacharbeit zu verringern. Im zweiten Teil wurden Untersuchungen zur Steigerung der Prozeßstabilität an V-Naht-Schweißungen durchgeführt. Eine verbesserte Prozeßstabilität führt zu besseren ökonomischen Bedingungen des Verfahrens.

Um die einzelnen Einflüsse der Parametereinstellungen besser ermitteln zu können, wurde ein „Bewertungssystem“ aufgestellt, woraus Veränderungen in der Nahtgeometrie infolge der beiden Einzelprozesse hervorgehen.

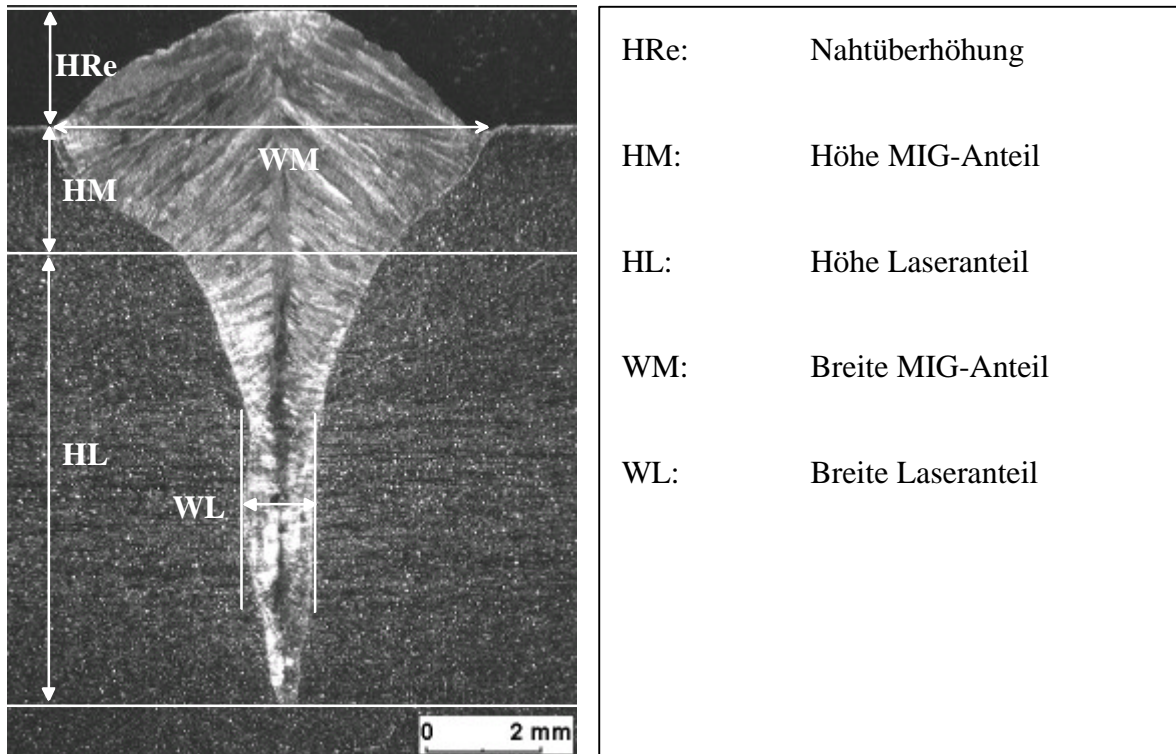


Bild 2: „Bewertungssystem“ für Hybridnähte

Bild 2 zeigt die im einzelnen aufgenommenen Werte der Hybrischweißnähte. Eine auftretende Nahtwurzel wird mit HRo bewertet.

Einfluß der Schweißparameter auf die Nahtgeometrie

Für die Ermittlung der unterschiedlichen Einflüsse wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Versuchsparameter untersucht.

Tabelle 1: Schweißparameter, v_D : Drahtvorschubgeschwindigkeit I_m : Mittlere Stromstärke

		$v_D = 9 \text{ m/min}$: $I_m \sim 230 \text{ A}$					$v_D = 11 \text{ m/min}$: $I_m \sim 260 \text{ A}$					$v_D = 13 \text{ m/min}$: $I_m \sim 290 \text{ A}$				
		Eingestellte Schweißspannung					Eingestellte Schweißspannung					Eingestellte Schweißspannung				
Laserleistun g[kW]	4	19	21	24	26	28	19	21	24	26	28	19	21	24	26	28
	6	19	21	24	26	28	19	21	24	26	28	19	21	24	26	28
	8	19	21	24	26	28	19	21	24	26	28	19	21	24	26	28
	9	19	21	24	26	28	19	21	24	26	28	19	21	24	26	28

Der wesentliche Faktor für Spaltüberbrückbarkeit ist die Breite der Naht im oberen und unteren Bereich (WM und WL). Beide Werte wurden in Abhängigkeit der Lichtbogen- und der Laserleistung untersucht.

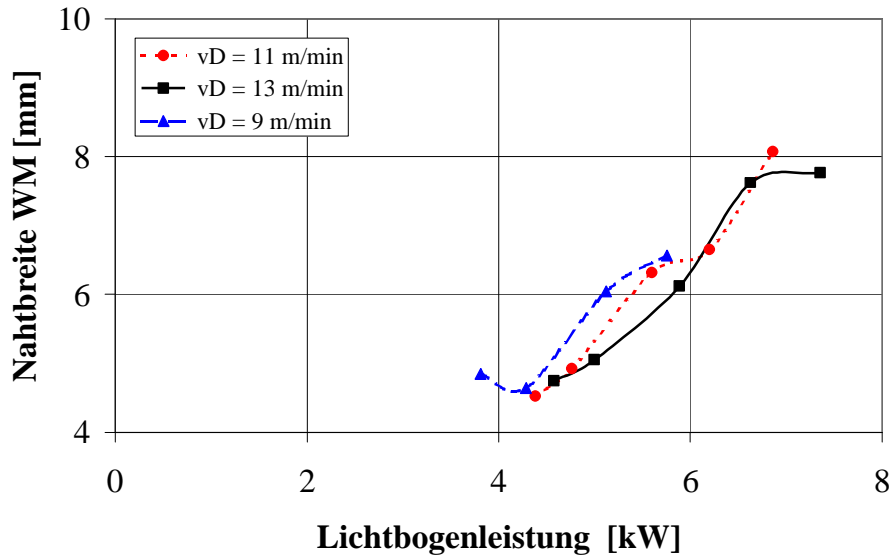


Bild 3: Nahtbreite WM in Abhängigkeit von der Lichtbogenleistung, bei $P_L = 4 \text{ kW}$

Höhere Lichtbogenleistungen führen im oberen Naht-Bereich zu einer Zunahme der Nahtbreite. Die Steigerung der Lichtbogenleistung wurde in den durchgeführten Versuchen über eine Steigerung der Spannung bei gleichbleibender Drahtvorschubgeschwindigkeit und nahezu konstantem Strom realisiert. Daher kommt es bei höherer MIG-Leistung zu einer Verlängerung und somit zu einer Verbreiterung des Lichtbogens und der Naht, siehe Bild 3. Die Zunahme der Nahtbreite ist nur bis zu einem Maximalwert steigerbar, danach nimmt zwar die Lichtbogenbreite weiter zu, da es zu einem Übergang vom Kurzschluß- zum Sprühlichtbogen kommt. Die Energie in den äußeren Bereichen des Bogens ist aber zu gering, um mehr Material aufzuschmelzen.

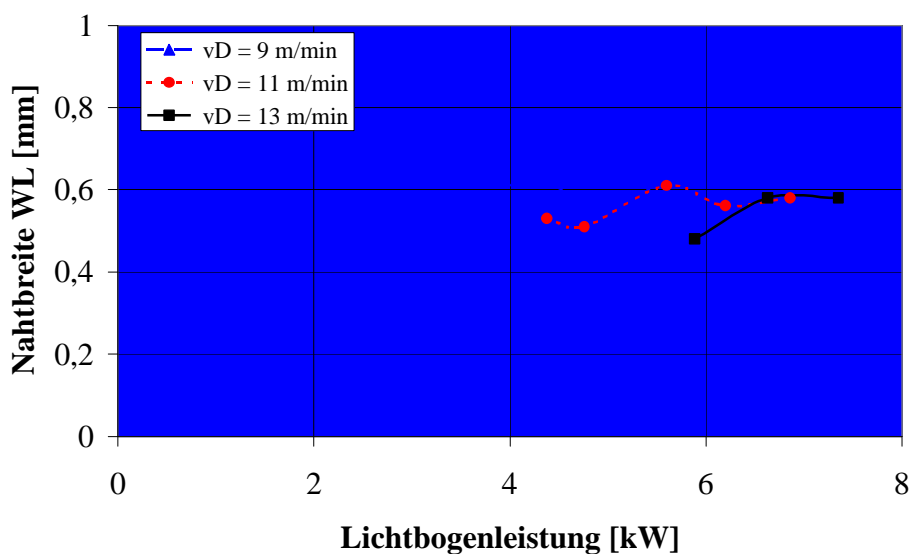


Bild 4: Breite der Naht WL in Abhängigkeit von der Lichtbogenleistung, $P_L = 4 \text{ kW}$

Die Breite des Laserteils der Naht nimmt bei höherer Lichtbogenleistung nicht zu, da sich die Form der Kapillare dadurch nicht ändert, die im wesentlichen die Nahtbreite WL bestimmt, Bild 4.

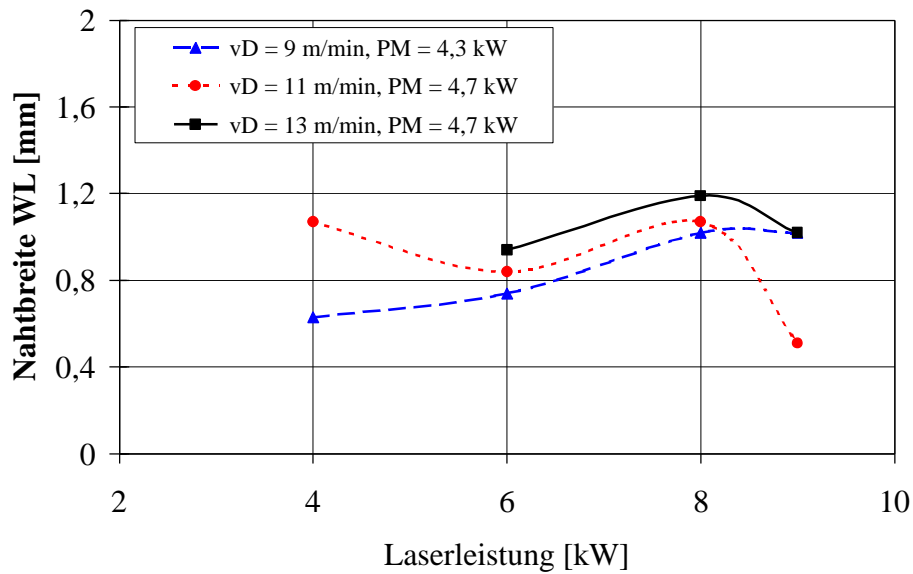


Bild 5: Nahtbreite WL in Abhängigkeit von der Laserleistung

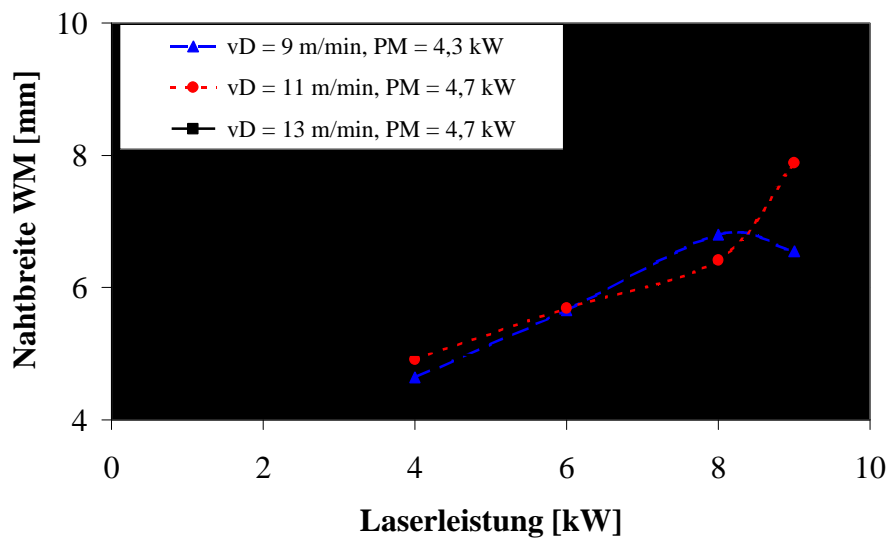


Bild 6: Nahtbreite WM in Abhängigkeit von der Laserleistung,

Im Gegensatz zur Steigerung der Lichtbogenleistung, führt eine Zunahme der Laserleistung zu geringfügig breiteren Nähten sowohl im oberen als auch im unteren Nahtbereich, Bild 6. Aufgrund größerer Leistungswerte des Lasers wird der Naht im oberen und unteren Bereich zusätzliche Energie zugeführt, die mehr Material aufschmelzen lässt. Bei Leistungswerten von 9 kW kommt es zu einer verstärkten Plasmaabschirmung bei der eingestellten Gasmenge und damit zu einer verringerten Einschweißtiefe und Nahtbreite WL.

Direkt in Zusammenhang mit der Nahtbreite WM steht die Nahtüberhöhung HRE. Eine breitere Naht, die aus einem Übergang zum Sprühlichtbogen resultiert, weist in der Regel weniger Nahtüberhöhung auf, da sich das konstante Drahtvolumen über die Breite verteilt.

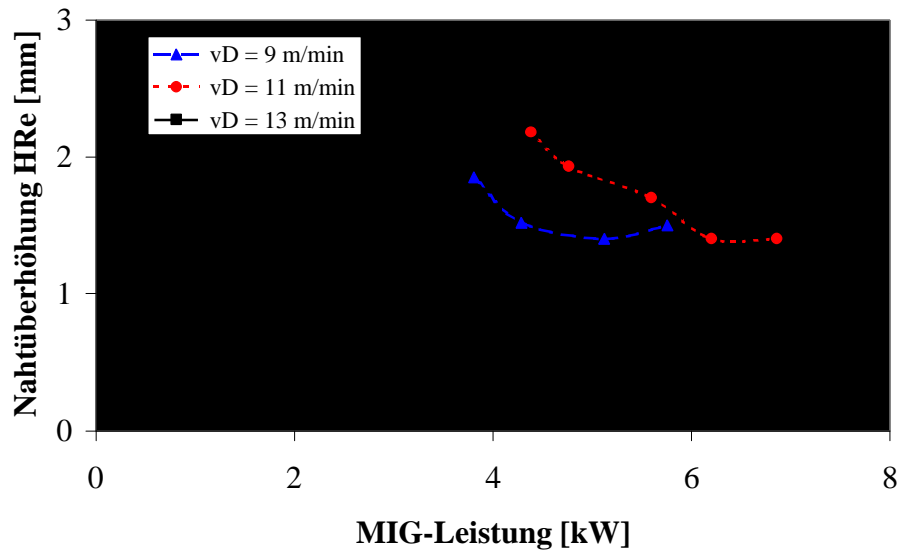


Bild 7: Nahtüberhöhung HRe in Abhängigkeit der MIG-Leistung, $P_L = 4 \text{ kW}$

Bild 7 bestätigt den bereits aus der konventionellen Schweißtechnik bekannten Zusammenhang.

Neben der Nahtbreite ist weiterhin die Höhe HM des MIG-Anteils der Naht für die Möglichkeit zur Spaltüberbrückung von Bedeutung, da ein größerer Schmelzenanteil zum Schließen des Spalts zur Verfügung steht.

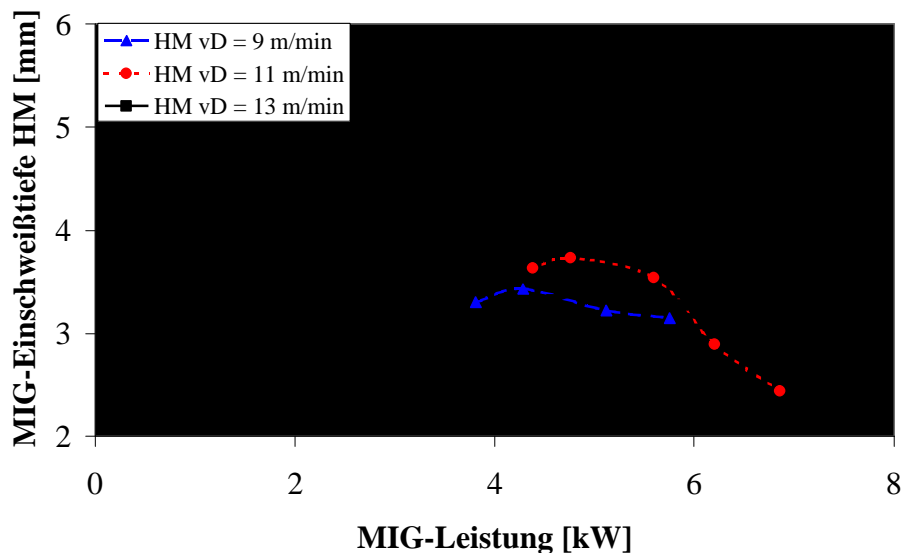


Bild 8: MIG-Einschweißtiefe HM in Abhängigkeit der MIG-Leistung, $P_L = 4 \text{ kW}$

Der bereits erwähnte Wechsel vom Kurz- zum Übergangs- und dann zum Sprühlichtbogen führt nach einer kurzen Zunahme zur Abnahme von HM bei größeren Lichtbogenleistungen.

Vergleichsschweißungen an Stahl S355

Vergleichende Querschliffe von Schweißungen zeigen in Bild 9 eine stark veränderte Nahtform der Hybridnaht im oberen Bereich. Beide Nähte wurden als V-Naht mit einem Gesamtöffnungswinkel von 6° ausgeführt. Die Hybridschweißung wies einen Luftspalt von 1,5 mm auf; sie führt zu einer wesentlich besseren Anbindung im Wurzelbereich, bei gleichzeitig höherer Schweißgeschwindigkeit (15 mm/s im Vergleich zu 12 mm/s bei der Lasernaht).

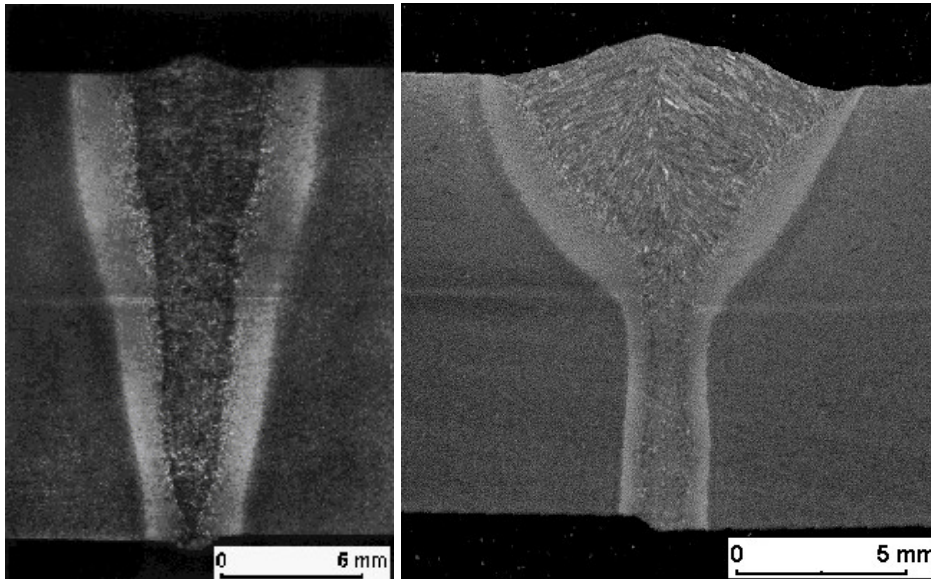


Bild 9: Querschliff einer Laser-Schweißnaht ($P_L = 9,5 \text{ kW}$, $v_S = 12 \text{ mm/s}$, $v_D = 0,8 \text{ m/min}$) und einer Laser-MIG-Schweißnaht ($P_L = 9,5 \text{ kW}$, $P_{MIG} = 9,5 \text{ kW}$, $v_S = 15 \text{ mm/s}$, $v_D = 14 \text{ m/min}$), Ätzmittel 2%ige HNO_3)

Fazit

Die Einflüsse der Laser- und Lichtbogenleistung auf die Nahtbreite und die Nahtüberhöhung bei Blindschweißungen konnten geklärt werden. Es ist möglich, durch eine gezielte Einstellung dieser Werte eine breitere Naht zu erzielen. Weiterhin läßt sich die Nahtüberhöhung und damit der Aufwand für Nacharbeit verringern. Im Hinblick auf die Heißrißanfälligkeit beim Schweißen großer Blechdicken oberhalb 10 mm kann eine positive Beeinflussung der Deformationsbeanspruchung prognostiziert werden.

Steigerung der Prozeßstabilität

Die Prozeßstabilität wurde an Blindnähten an S355M untersucht. Der Versuchsaufbau zum Hybridschweißen ist Bild 1 zu entnehmen. Die Fokuslage war auf $z_f = -1 \text{ mm}$ eingestellt. Dazu wurde eine 450 mm lange Schweißnaht in einen reinen MIG-Teil und einen Hybrid-Teil unterteilt. Bewertet wurde zum einen die Nahtraupe und zum anderen die mit dem Transientenrekorder aufgenommenen Strom- und Spannungsverläufe.

Ein wesentlicher Vorteil, welcher der Hybridtechnik zugesprochen wird ist die bessere Prozeßstabilität [3]. Um hierfür den Beweis anzutreten, wurden mit dem oben erwähnten Transientenrekorder die Strom- und Spannungsverläufe der MIG-Naht mit denen der Hybridnaht verglichen. Dabei kommt es zu einer Stabilisierung des MIG-Prozesses durch den Laserprozeß, Bild 10.

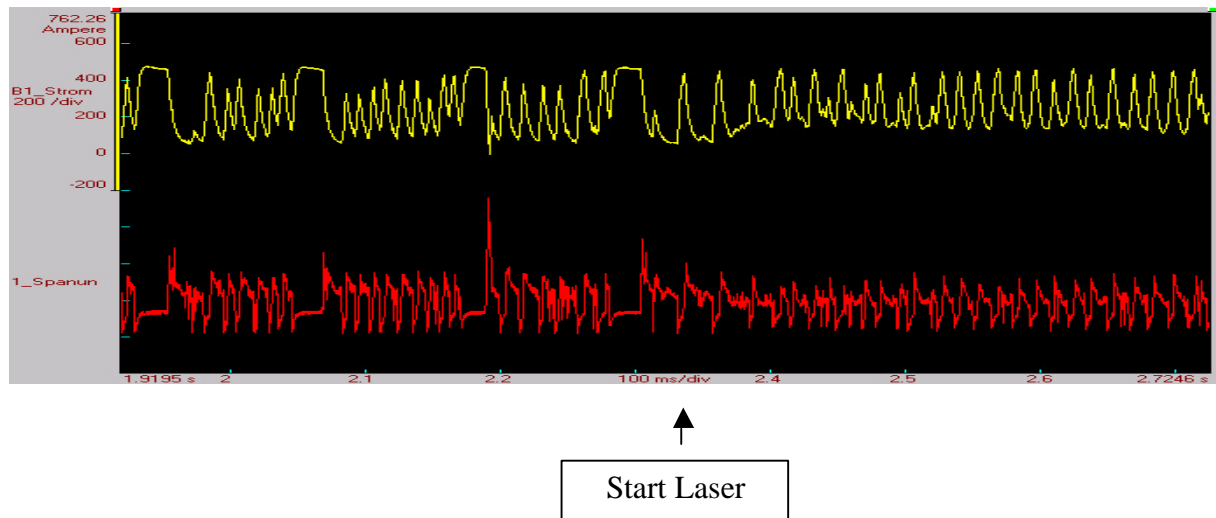


Bild 10: Strom- und Spannungsverlauf beim MIG- (links) und Hybridschweißen (rechts), $v_D=11\text{m/min}$, $U=19\text{V}$, $P_L=8\text{kW}$,

Der zugeschaltete Laser führt zu einer Verringerung Kurzschlußamplituden, Bild 10. Beim reinen MIG-Prozeß wird aufgrund der geringen Energiedichte lediglich das Schutzgas ionisiert und bildet so die Bedingungen für den Lichtbogen. Durch die Bildung der Dampfkapillare und das dadurch verdampfte Material beim Laserstrahlschweißen kommt es zu einer Zunahme des Ionisationsgrades und so zu einem stabileren Lichtbogen. Der so stabilisierte Prozeß spiegelt sich auch in der Ausbildung der Nahtoberraupe wieder, die wesentlich gleichmäßiger und glatter wird (siehe Bild 11).

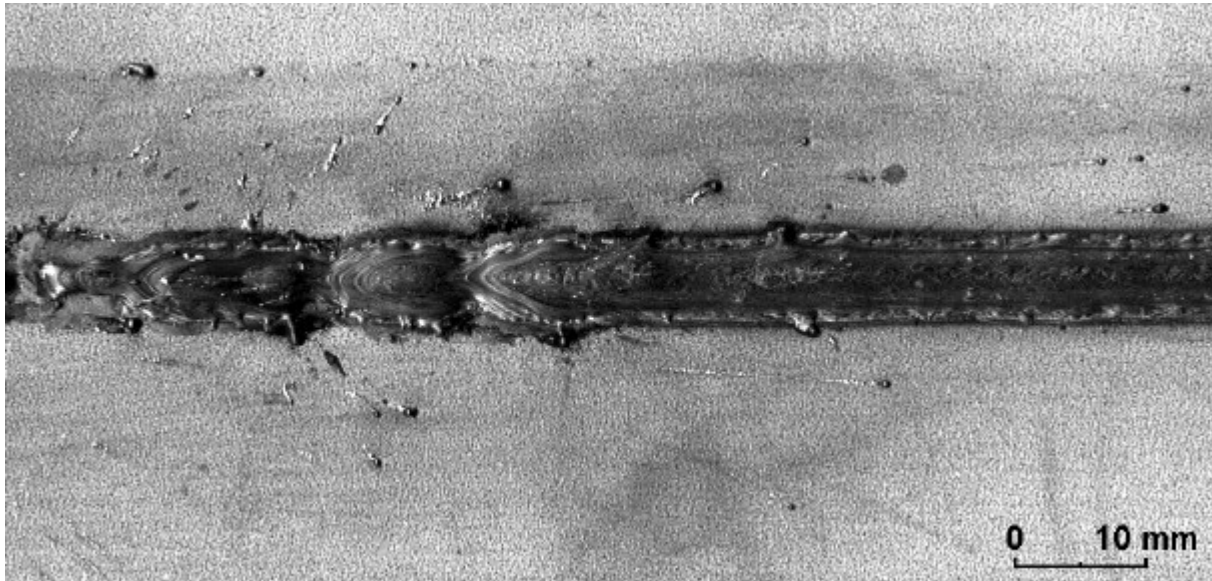


Bild 11: Bild der Nahtoberraupe, linke Hälfte nur MIG, rechte Hälfte Laser-MIG,
 $P_L = 6 \text{ kW}$, $v_S = 3 \text{ m/min}$, $v_D = 9 \text{ m/min}$, $I = 213 \text{ A}$, $U = 20,7 \text{ V}$

Fazit

Durch die Kombination der beiden Prozesse kommt es zu einer verbesserten Prozeßstabilität, die in der Verdampfung des Werkstoffs durch den Laser begründet liegt.

Die Prozesseffizienz kann aufgrund einer Steigerung des aufgeschmolzenen Volumens bei weniger stark gesteigener Streckenenergie ebenfalls erhöht werden. Ausführliche Untersuchungen dazu werden derzeit durchgeführt.

Anwendungspotenzial für das Aluminiumschweißen

Neben den Schweißversuchen an Stahl wurden vergleichend Aluminiumwerkstoffen durch Hybridschweißen mit CO_2 -Lasern hoher Leistung aufgeschmolzen. Dabei konnte eine Zunahme der Einschweißtiefe, siehe Bild 12 beobachtet werden. Es zeigt den Querschliff einer Blindschweißung im Werkstoff AlMgSi1 der Blechdicke 6 mm, die bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 2,7 m/min mit einer Laserleistung von nur 6 kW ($P_{\text{MIG}} = 3,6 \text{ kW}$) mit Zusatzwerkstoff AlSi12 durchgeschweißt wurde. Im Vergleich dazu ist die Einschweißtiefe einer reinen Lasernaht bei gleicher Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit deutlich geringer.

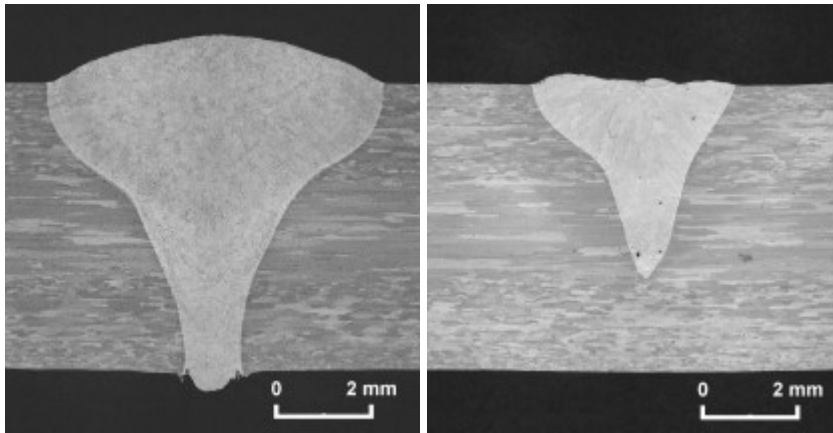


Bild 12: Querschliff einer Laser-MIG-Schweißnaht ($P_L = 6$ kW, $P_{MIG} = 3,6$ kW, $v_S = 2,7$ m/min, Zusatzdraht AlSi12) und einer Laser-Schweißnaht ($P_L = 6$ kW, $v_S = 2,7$ m/min, ohne Zusatzwerkstoff) Blindnaht in AlMgSi1, Blechdicke 6 mm (Ätzmittel: Molybdänsäure)

Zusammenfassung

Aufgrund der vorgestellten Versuche Voraussetzungen für die gezielte Gestaltung der Nahtgeometrie geschaffen werden. So wurde gezeigt, wie sich der Aufwand für Nahtvorbereitung und Nacharbeit durch erhöhte Nahtbreite und geringere Nahtüberhöhung gezielt reduziert lässt. In weiteren Versuchen sollen nun unterschiedliche Nahtvorbereitungen (I-Naht mit Spalt, Y-Naht) optimal verschweißt werden. Eine Steigerung der Stabilität des MIG-Prozesses durch den Laser wurde nachgewiesen.

Dem Hybrischweißen von Aluminiumwerkstoffen großer Blechdicken mit CO₂-Lasern hoher Leistung wird ein großes Potenzial zugeschrieben.

Schrifttum

- 1 W.M. Steen, M. Eboo: *Arc augmented laser beam welding*, in Metal Construction, July 1979
- 2 C. Maier, P. Reinhold, H. Maly, K. Behler, Aachen, und N. von Heesen, Bonn: *Aluminium- Strangpreßprofile im Schienenfahrzeugbau, geschweißt mit dem Hybridverfahren Nd:YAG-Laser / MIG*, DVS Berichte 176, 1996, S. 198 – 201
- 3 U. Dilthey, F. Lüder, A. Wieschemann: *Technical and economical advantages by synergies in Laser Arc Hybrid Welding*, Proceedings IIW International Conference "The Human Factor and it's Environment, Lissabon, 1999, S. 141 - 152
- 4 N. Abe, Y. Agamo, M. Tsukamoto, T. Makino, M. Hayashi, T. Kurosawa: *High speed welding of thick plates on laser-arc combination system*, Trans. JWRI, Vol. 26, 1997

-
- 5 S. Weise: *Heißrißbildung beim Laserstrahlschweißen von Baustählen*, Diss, Strahltechnik Bd. 7, BIAS Verlag, Bremen, 1998
- 6 M. Funk: *Absorption von CO₂-Laserstrahlung beim Laserstrahlschweißen von Grobblechen*, Diss. RWTH Aachen, 1994