

Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen von Rohren aus Hochfestem Stahl API-X80/ -X100

S. Gook

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, Pascalstraße 8-9, 10587 Berlin

A. Gumenyuk, M. Rethmeier

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

1 Einführung

Die Laserstrahl-Hybrid-Schweißtechnologie erweist sich in der schweißtechnischen Fertigung immer mehr als innovative Alternative gegenüber anderen Schweißverfahren und ist bereits bei vielen metallverarbeitenden Unternehmen im Einsatz.

Ein großes wirtschaftliches Potential des Laserstrahl-Hybridschweißverfahrens gegenüber den konventionellen Schweißverfahren, wie dem WIG-, MSG- oder UP-Schweißverfahren resultiert aus wesentlichen Vorteilen der Laserstrahl-Hybrid-Schweißtechnik, wie der hohen erreichbaren Einschweißtiefe und Schweißgeschwindigkeit sowie der geringen Wärmebelastung des Bauteils beim Schweißen. Insbesondere im Dickblechbereich z.B. bei der Herstellung von Großrohren werden die genannten Vorteile der Laserstrahl-Hybrid-Schweißtechnik bemerkbar. Hier führt z.B. ein reduzierter Nahtquerschnitt zu einer deutlichen Ersparnis an Zusatzwerkstoff.

Es sei hierzu aber erwähnt, dass die schweißtechnische Verarbeitung von modernen höherfesten Werkstoffen, wie z.B. API-X80/ -X100/ -X120, eine besondere werkstoffseitige Herausforderung darstellen kann, da diese Werkstoffe gegenüber der während des Schweißens zugeführten Prozesswärme empfindlich sind. So z.B. ist die üblich hohe Wärmeeinbringung beim UP-Schweißen von Längsnähten folglich eine Gefährdung für die Festigkeit der Wärmeeinflusszone (WEZ). Im Speziellen wurden bei der Güte X80 im Bereich zwischen -60 °C und -40 °C sowie an X100-Stählen bei -40 °C lokale grobkörnige Gefügebereiche mit verminderter Festigkeit in der WEZ identifiziert [1, 2]. Der Einsatz eines Laserhybridprozesses führt hingegen zu einer schmaleren WEZ mit vernachlässigbarer Kornvergrößerung, so dass die Festigkeitseigenschaften der Schweißverbindung weniger negativ beeinflusst werden.

Insbesondere sind für den sicheren Betrieb von Rohrleitungen für Transport von Erdgas und Erdöl neben den Festigkeitseigenschaften die nach DIN EN 10208 geforderten Kerbschlagzähigkeiten für die Schweißverbindung zu garantieren. Die hohen Abkühlraten (kurze $t_{8/5}$ -Zeit) beim Laserhybridschweißen können zu einer Aufhärtung in der WEZ führen, was folglich in einer Versprödung der Schweißverbindung resultieren kann. Da ein Vorwärmen und/oder Wärmenachbehandlungsmaßnahmen in der Großserienproduktion von Großrohren die Produktionseffizienz und somit die Durchsatzrate verringern würde, ist die Zähigkeit der Laser-MSG-Hybridnähte vornehmlich über das Erstarrungs- und Aufmischungsverhalten zu kontrollieren.

Das Ziel dieser Arbeit war es, geeignete Zusatzwerkstoffe für das Laserstrahlhybridschweißen der hochfesten Pipelinewerkstoffe zu identifizieren und die Möglichkeiten einer schweißmetallurgischen Beeinflussung der Zähigkeit der laserhybridgeschweißten Nähte zu demonstrieren.

Ferner sollen die ermittelten optimalen Schweißprozessparameter dazu beitragen, geeignete höherfeste Grund-Zusatzwerkstoffkombinationen mit den geforderten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften für das Laserstrahlhybridschweißen in der Großrohrfertigung zu etablieren.

2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Während der Versuchsdurchführung wurde aus prozesstechnischer Sicht als erster Schritt die maximale erreichbare Aufmischungstiefe bzw. Eindringtiefe des Zusatzwerkstoffes untersucht. Nachdem optimale Aufmischungsverhältnisse festgestellt worden sind, wurde anschließend der metallurgische Einfluss unterschiedlicher Drahtelektrodentypen auf die Gefügeeigenschaften mit dem Bestreben nach hohen Zähigkeiten im Schweißgut verifiziert.

2.1 Werkstoffe

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden Bleche aus thermomechanisch gewalzten hoch- und ultrahochfesten Stählen der Güte X80 und X120 nach API 5L eingesetzt. Die Anforderungen an die mechanisch-technologischen Eigenschaften der untersuchten Stähle sind in der amerikanischen Norm API 5L bzw. europäischen Norm DIN EN ISO 3183:2011-02 beschrieben. Als Schweißzusatzwerkstoffe kamen Massiv- und Fülldrähte zum Einsatz, die nach EN 440 für das MSG-Schweißen von hochfesten Feinkornbaustählen konzipiert wurden.

Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Grund- sowie Zusatzwerkstoffe ist in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften der untersuchten Grundwerkstoffe sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 1: Grundwerkstoffe, chemische Zusammensetzung

Werkstoff/ Element in gew.-%	Blech- dicke in mm	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni
X80	23,7	0,052	0,33	1,82	0,008	0,0008	0,04	0,17	0,01
X120	20,0	0,054	0,31	1,6	0,009	0,0006	0,03	0,41	0,04
Werkstoff/ Element in gew.-%	CE _{PCM} in %	Mo	Cu	V	Nb	Ti	B	N	Fe
X80	0,17	0,14	0,02	0,004	0,04	0,012	0,0002	0,004	rest.
X120	0,19	0,21	0,03	0,038	0,04	0,012	0,001	0,006	rest.

Tabelle 2: Zusatzwerkstoffe, chemische Zusammensetzung

Werkstoff / Element in gew.-%	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
Massivdraht NiMo 1-IG G 55 6 M Mn3Ni1Mo	0,08	1,8	0,6	<0,015	<0,015	-	0,9	0,3	rest.
Massivdraht X90-IG G 89 6 M Mn4Ni2CrMo	0,1	1,8	0,8	<0,015	<0,015	0,35	2,3	0,6	rest.
Metallpulverfülldraht MF 940 M T 55 6 Mn1,5Ni M M1 H5	0,05	1,4	0,6	<0,015	<0,015	-	2,0	-	rest.
Metallpulverdraht alform 700-MC T 69 5 Mn2NiCrMo M M1 H5	0,07	1,6	0,7	<0,015	<0,015	0,35	2,0	0,3	rest.
Rutilfülldraht MF 821 R T 50 6 1Ni P M 1 H5	0,05	1,3	0,5	<0,015	<0,015	-	0,7	-	rest.

Tabelle 3: Grundwerkstoffe, mechanische Eigenschaften

Werkstoff	R _{p0,2} in MPa	R _m in MPa	A ₅ in %	R _p /R _m in %	A _v (10x10) in J
X80	quer	548	648	21,9	85
	längs	543	635	22,1	86
X120	quer	816	1020	14,7	80
	längs	813	998	16,6	81

2.2 Experimenteller Versuchsaufbau

Die Schweißversuche wurden mit Hybridtechnik durchgeführt. Als Strahlquelle diente ein 20 kW Yb-Faserlaser der Fa. IPG mit einer 200 µm Arbeitsfaser. Als Schweißoptik wurde eine Laseroptik der Fa. HIGHYAG mit 350 mm Brennweite eingesetzt. Der Durchmesser des Strahls im Fokuspunkt betrug 560 µm. Als MSG-Stromquelle kam eine moderne, elektronisch getaktete Schweißstromquelle Qineo Pulse 600 (Cloos) mit innovativen digitalen Prozesssteuerungs- und -regelungstechniken zum Einsatz. Diese ermöglichen eine größere Einbrandtiefe, verbesserte Wärmeinbringung und optimierte Werkstoffübergänge im MSG-Lichtbogen.

Die Schweißversuche wurden an Blechdicken von 20 mm und 23,7 mm durchgeführt. Die Prozessanordnung sowie die Schweißnahtfolge sind im Bild 2 dargestellt. Die Steghöhe der Schweißnähte betrug 14 mm.

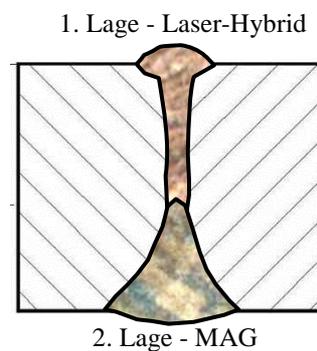
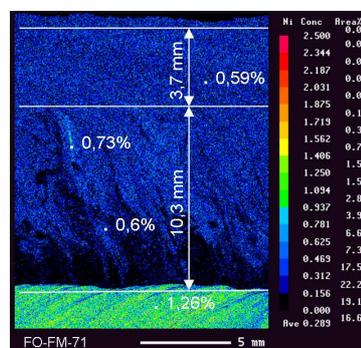
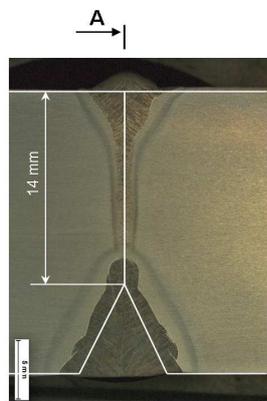


Bild 2: Prozessanordnung mit vorlaufendem MAG-Brenner (links) und Schweißnahtfolge (rechts)

2.3 Untersuchungen der Aufmischung

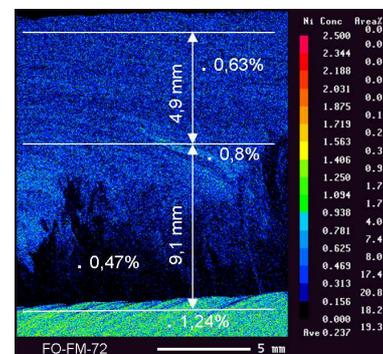
Der Grad und die Tiefe der Aufmischung der Laserstrahlhybridschweißungen wurden mittels ES-MA (Elektronenstrahlmikrobereichsanalyse) untersucht. Die Werkstoffanalyse erfolgte mit einer JEOL-Mikrosonde JXA-8900 RL.

Die Schweißversuche erfolgten mit dem konventionellen MSG-Pulse-Lichtbogen sowie mit dem modifizierten Sprühlichtbogen. Das Bild 3 zeigt die ermittelten Ni-Verteilungen im Längsschliff für beide Verfahrensvarianten, für das konventionelle MSG-Pulse-Verfahren (links) und den modifizierten Sprühlichtbogen (rechts).



MSG Pulse,
 $P_L = 15 \text{ kW}$, $v_s = 2,4 \text{ m/min}$,
 $U_{LB} = 33,9 \text{ V}$, $I_{LB} = 381,0 \text{ A}$

A-A



MSG mit modifiziertem Sprühlichtbogen,
 $P_L = 15 \text{ kW}$, $v_s = 2,4 \text{ m/min}$,
 $U_{LB} = 34,9 \text{ V}$, $I_{LB} = 410,0 \text{ A}$

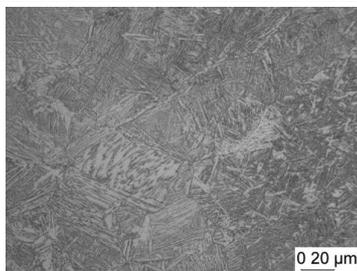
Bild 3: Querschliff (links) einer laserhybrid Naht und Verteilung von Ni (rechts)

Aus den Messungen geht hervor, dass mit dem modifizierten Sprühlichtbogen der Bereich homogener Aufmischung (MSG-Anteil der Laserstrahl-MSG-Hybridnaht) mit 4,9 mm ca. 30% tiefer als bei konventionellem MSG-Pulse-Verfahren (3,7 mm) ist.

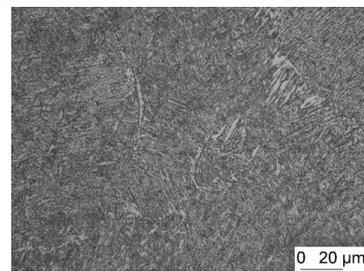
Im Laseranteil der Laserstrahl-MSG-Hybridnaht befindet sich der Bereich mit stark ausgeprägter inhomogener Aufmischung. Ein positiver Einfluss der angewandten Lichtbogentechnologie auf den Charakter der Aufmischung im Laseranteil der Naht konnte nicht festgestellt werden. Maximale Eindringtiefe des Zusatzwerkstoffes liegt bei ca. 14 mm.

2.4 Untersuchungen zur metallurgischen Beeinflussung von Gefügeeigenschaften

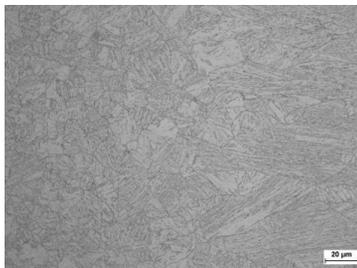
Die untersuchten Grund- und Zusatzwerkstoffe wurden in verschiedenen Kombinationen geschweißt, um signifikante Einflüsse des Drahttyps sowie der chemischen Zusammensetzung des Drahtes auf das Umwandlungsverhalten feststellen zu können. Gefügeaufnahmen im Bild 4 zeigen das resultierende Gefüge des Schweißgutes.



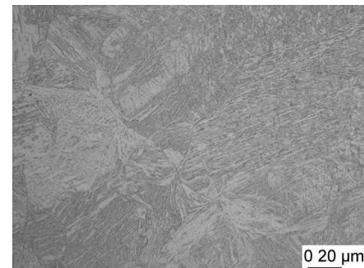
X80 / Massivdraht Union NiMo 1-IG



X80 / Metallpulverdraht MF 940 M



X120 / Massivdraht Union X90-IG



X120 / Metallpulverdraht alform 700-MC

Bild 4: Schweißgutgefüge für verschiedene Werkstoffkombinationen

Ein sehr feinkörniges Gefüge konnte bei allen Werkstoffkombinationen identifiziert werden. Insbesondere ist zu erwähnen, dass ein fein nadeliges Gefüge bei Schweißproben vorliegt, die mit Fülldrähten geschweißt wurden. Daher werden beim Einsatz einer Metallpulverfülldrahtelektrode deutlich verbesserte Zähigkeiten gegenüber konventionellen Massivdrähten erwartet. Grund dafür ist der gewünschte hohe Nadelferritanteil, der von der exothermen Reaktion und daraus resultierenden Oxidpartikeln des Fülldrahtes abhängig ist. So wurden bei der Probe, die mit dem Rutildraht MF 821 R geschweißt wurde, mittels QBSD-Analyse nicht gelöste Rutilpartikel (TiO_2) im Schweißgut identifiziert, die die Kornverfeinerung begünstigen. Ein fein nadeliges Mikrogefüge im Schweißgut war dabei deutlich zu erkennen (Bild 5).

Der Einfluss der verwendeten Schweißzusätze auf die Schweißgutzähigkeit der Laserhybridnähte wird im nächsten Abschnitt dargestellt.

X80 mit Rutildraht
MF 821 R

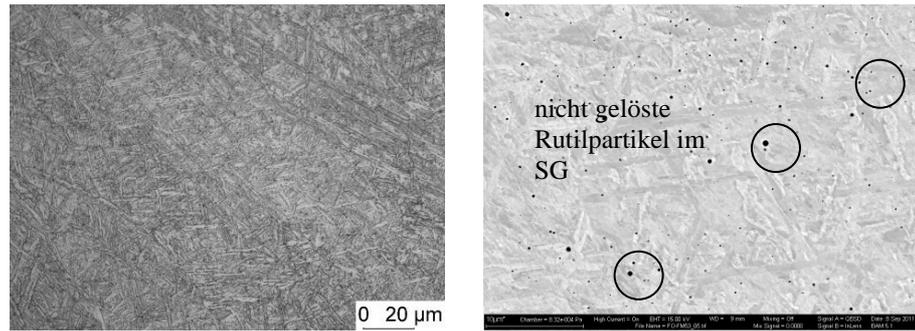


Bild 5: X80 geschweißt mit Rutildraht MF 821 R: Mikrogefüge (links) und QBSD-Aufnahme (rechts)

2.2 Untersuchungen zur Bestimmung der Schweißgutzähigkeit

Die Kerbschlagarbeit wurde für die Kerblage in der Mitte der Laserstrahl-MSG-Hybridnaht ermittelt. Die ermittelten Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurven sind im Bild 6 dargestellt.

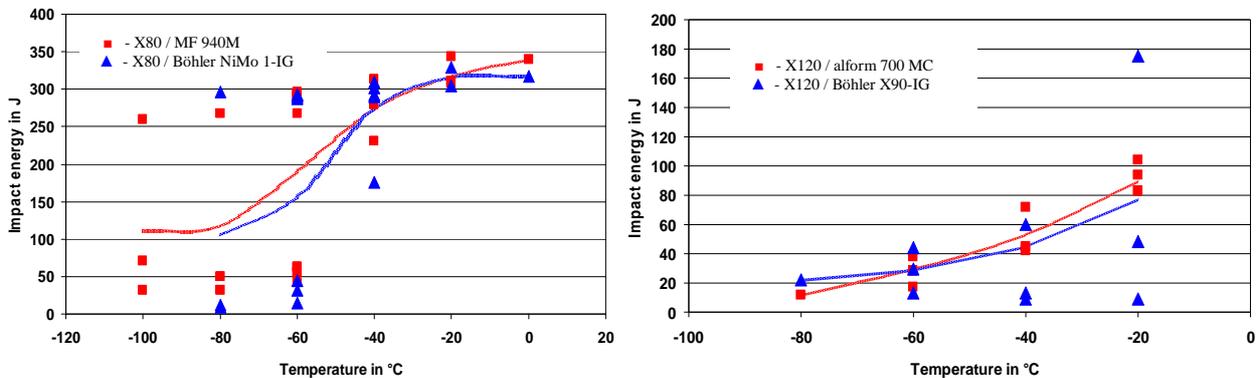


Bild 6: Ermittelte Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurven für X80 und X120

Es wurde gezeigt, dass die erzielten Werte der Kerbschlagarbeit bei tiefen Testtemperaturen für beide untersuchten Stähle X80 und X120 ausreichend hoch sind, wobei die besten Ergebnisse mit den Metallpulverdrähten erreicht wurden. So liegt die Übergangstemperatur für die Werkstoffkombination X80 mit MF 940 M bei -60 °C . Für X80 geschweißt mit Böhler NiMo 1-IG verschiebt sich die Übergangstemperatur in Bereiche von -50 °C bis -40 °C . Für den Werkstoff X120 sind die Mittelwerte der Schlagarbeit bei -40 °C ausreichend hoch (ca. 53 J). Somit werden die Anforderungen der API 5L und DIN EN 10208-2 (40 J bei 0 °C) für die beiden untersuchten Werkstoffe erfüllt.

Die Bruchflächen ausgewählter Kerbschlagbiegeproben wurden mit Hilfe von REM-Aufnahmen untersucht, um den Charakter des Bruches festzustellen. Ein repräsentatives Beispiel im Bild 7 zeigt, dass bei den Proben mit minimalen erzielten Werten der Schlagarbeit, in diesem Fall 42 J für die Werkstoffkombination X80 mit MF 940 M, der Mischbruch gut erkannt werden konnte. Die Bruchflächen wiesen überwiegend spröde Bruchanteile auf. Bereiche mit duktilem Bruchcharakter sind ebenso erkennbar. An diesem charakteristischen Beispiel wird gezeigt, dass am Rand der Bruchfläche (Zonen 1 und 3) ein duktiler Bruchverhalten zu beobachten ist und der spröde Anteil in etwa in der Mitte der Bruchfläche (Zone 2) als glänzend kristalline Fläche erscheint.

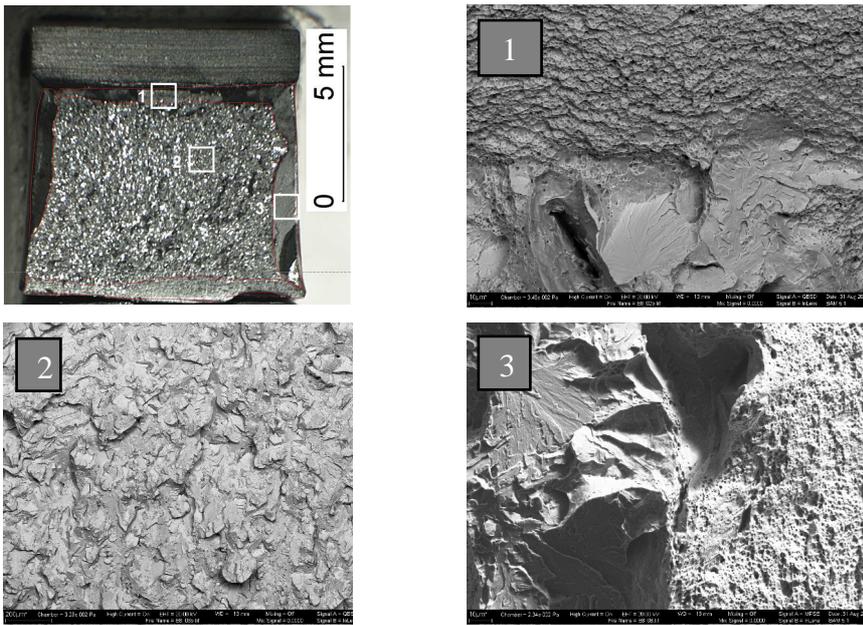


Bild 7: REM-Aufnahme der Bruchfläche: X80 mit MF 940 M, Prüftemperatur -60 °C, 42 J

3 Zusammenfassung

Das Laser-MSG-Hybridschweißverfahren führt bei untersuchten hochfesten Pipelinestählen API X80 und X120 reproduzierbar zu Schweißverbindungen mit anforderungsgerechten Zähigkeitseigenschaften.

Eine metallurgische Beeinflussung der Schweißnahtzähigkeit ist durch eine gezielte Auswahl des Zusatzwerkstoffes möglich, wobei die maximale Eindringtiefe des Zusatzwerkstoffes in die Tiefe der Laserhybridnaht zu beachten ist.

Die maximal erzielbare Eindringtiefe des Zusatzwerkstoffes ist auf ca. 14 mm begrenzt. Die eingesetzte Art des MSG-Lichtbogens hatte keinen erkennbaren Einfluss auf die Aufmischung im Laseranteil der Laserhybridnaht.

Die besseren Ergebnisse der Kerbschlagzähigkeit konnten mit Metallpulverdrähten erreicht werden. Mit den erzielten gemittelten Werten der Schlagarbeit: ca. 200 J bei -60°C für X80 und ca. 53 J bei -40°C für X120 werden Anforderungen der Norm API 5L und DIN EN 10208-2 für die beiden untersuchten Grundwerkstoffe erfüllt.

4 Literatur

- [1] Liessem, A., Erdelen-Peppler, M.; A critical view on the significance of HAZ toughness testing, IPC - 5th Biennial International Pipeline Conference, Calgary (CA), Bd. 5, 4. – 8. Okt. 2004, S. 1871 - 1878
- [2] Gräf, M.; Niederhoff, K.; Denys, R. M. (ed.); Properties of HAZ in two-pass submerged-ARC welded large-diameter pipe, Proceedings of the 3rd International Pipeline Technology Conference, Laboratory Soete, Ghent University, Brugge (BE), Bd. 2, 21. - 24. Mai 2000, S. 553 – 566

Danksagung

Diese Studie wurde im Rahmen des IGF-Vorhabens 16415N der FOSTA Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.