

Laserstrahlschweißen dickwandiger und großformatiger Stahlbaustrukturen mit modernen Diodenlasern – eine Alternative zum Laser-MSG-Hybridschweißen!

D. Dittrich, B. Keßler, R. Strohbach und A. Jahn, DE

Kurzfassung des Beitrags:

Die Fügetechnik im Stahl- und Schiffbau wird traditionell durch konventionelle Fügetechnologien dominiert. Etablierte Lichtbogen-Schweißverfahren stoßen aufgrund der Forderungen nach verbesserter Bauteilqualität, Verzugsfreiheit und wegen des enormen Kostendrucks angesichts der globalen Konkurrenzsituation sowie der fehlenden Anwendbarkeit auf höherfeste Werkstoffe an ihre Grenzen. Auch der Einsatz des Laserstrahls in Hybridverfahren ist aufgrund großer Schweißquerschnitte und Bauteiltoleranzen auf wenige Anwendungen begrenzt.

Mit dem neuen Entwicklungsansatz des Laser-Mehrlagen-Engspaltschweißens (Laser-MES) mit Kaltdraht unter Verwendung von Hochleistungsdiodenlasern sollen diese Limitationen überwunden werden. Diese Strahlquellen ermöglichen die Nutzung der lasertypischen Vorteile eines geringen Energieeintrages, verbunden mit einer Minimierung von Schweißeigenspannungen und -verzug. Ein deutlich reduzierter Öffnungswinkel der Schweißnahtvorbereitung $\leq 15^\circ$, angepasst an die Strahlkaustik des Lasers, verringert darüber hinaus erheblich die Menge an Schweißzusatzwerkstoff. Andererseits sollen durch eine angepasste Fokussierung die vorteilhaften stahlbautypischen Verfahren (Plasmazuschnitt) und Toleranzen für die Nahtvorbereitung weiterhin nutzbar bleiben.

Die Arbeiten fokussieren sich zunächst auf typische Schweißanwendungen des Stahl- und Kranbaus im Wandstärkenbereich bis 30 mm. Ausgehend von einer anwendungsspezifischen Analyse der Anforderungen an Gestaltung, Schweißverfahren und Prozesstechnik, erfolgt die lasergerechte Konstruktion für ausgewählte Stoßgeometrien. Den Kernpunkt der Arbeiten stellt die Entwicklung des Schweißprozesses zum Laser-MES Kaltdrahtverfahren mit der angestrebten Optimierung von Wärmeeinbringung, Prozessstabilität (Spaltüberbrückbarkeit), Bauteilqualität (Verzug) und Wirtschaftlichkeit (Schweiß-, Nebenzeiten) dar. Dazu werden Prozessparameterfenster für unterschiedliche Stoßgeometrien entwickelt und an praxisrelevanten Schweißproben validiert.

1 Einleitung und Motivation

Die Entwicklung von Laserstrahlquellen mit hohem Wirkungsgrad im technisch relevanten Leistungsbereich $< 10 \text{ kW}$ hat in den vergangenen 20 Jahren zu einem breiten Anwendungsbereich und einer umfassenden Integration in der Produktion geführt. Dazu beigetragen haben unter anderem stetig fallende Preise je Kilowatt bereitgestellter Laserleistung. Parallel dazu wurden große Anstrengungen unternommen, um Fertigungsprozesse zu automatisieren und deren Effizienz zu steigern. So wurden im allgemeinen Stahlbau, dem Schiffbau aber auch bei der Herstellung von Baumaschinen insbesondere die Fügeprozesse mit konventionellen Schweißtechnologien teil- bzw. voll automatisiert [PLA-09]. Dennoch steigen die Anforderungen an derartige Prozesse in Bezug auf eine Verkürzung der Taktzeit, eine Reduktion des Energieeintrages in das Bauteil und der damit möglichen Verzugsminimierung sowie der Kostensenkung stetig.

Der Schlüssel zur Umsetzung der Forderungen sind vielfach Laserstrahlschweißprozesse, die konventionelle Schweißverfahren in weiten Bereichen ersetzt haben. Nachteile bestehen allerdings in der geringen Spaltüberbrückbarkeit sowie der Notwendigkeit einer sehr genauen, das heißt in den meisten Fällen einer spanenden Kantenvorbereitung. Diese Einschränkungen sind maßgeblich, weshalb sich das Laserstrahlschweißen z. B. im Stahlbau, bei größeren Blechstärken, bisher nicht durchsetzen konnte [STE-08].

Um die genannten Limitationen für Anwendungen im Dickblechbereich zu überwinden, wurden ab ca. 1990 Laserstrahl-Lichtbogen-Hybridverfahren entwickelt, bei denen ein konventioneller Lichtbogenprozess und ein Laserstrahlprozess kombiniert und in einer gemeinsamen Prozesszone zusammengeführt werden. Am besten etabliert hat sich das Laserstrahl-Metall-Schutzgas-Hybridschweißen (Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen), bei dem erstmals die Vorteile bei der Verfahren, Erzeugung einer hohen Einschweißtiefe (Laser) mit einer guten Spaltüberbrückbarkeit (MSG) im technischen Umfeld, nutzbar sind [STE-08].

Nachteilig an dieser Verfahrenskombination ist ein im Vergleich zu den Einzelverfahren deutlich komplexerer Schweißprozess, der dem verantwortlichen Prozessingenieur aufgrund der zu kontrollierenden Parameter ein tiefreifes Prozessverständnis abverlangt und somit oftmals für mittelständige Unternehmen eine hohe Einstiegschürde darstellt [BAG-05], [ZHO-12], [MAH-06].

Eine Möglichkeit zur Überwindung dieser Beschränkung stellt im Folgenden ein neuer, erweiterter Verfahrensansatz des am Fraunhofer IWS entwickelten Laser-Mehrlagen-Engspaltschweiß-Verfahrens [GBB-07] vor. Dieser wird grundlegend für Stahlbauanwendungen ausgelegt und an dessen Bedingungen adaptiert. Während Scheiben- und

Faserlaser vor allem aufgrund ihrer extrem hohen Strahlqualität auch bei Leistungen über 15 kW interessant sind, zeichnen sich die gegenwärtig jüngsten Laser in der Makromaterialbearbeitung, die Diodenlaser, durch höchste Wirkungsgrade (bis zu 50 %) und das beste Verhältnis von Preis/kW-Laserleistung aus [ALC-17], [REI-17]. Diese Diodenlaserstrahlquellen sind auch im hohen Leistungsbereich mit ausreichender Strahlqualität verfügbar, so dass sie sich für das Schweißen von Dickblech eignen. Am Beispiel einer Diodenlaserstrahlquelle im Leistungsbereich bis 10 kW soll gezeigt werden, wie die bei Hybridverfahren vorliegende Komplexität der Prozessführung reduziert und potenziell ein effektives, leistungsfähiges Schweißverfahren ermöglicht wird.

Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel dieses Beitrages darin, eine Einschätzung zu treffen, ob das Dioden-Laserstrahlschweißen mit Kaltdraht eine Alternative zum den Laserstrahl-MSG-Hybrid-schweißen sein kann.

2 Stand der Technik

Mit dem Laserstrahl-Lichtbogen-Hybridschweiß Verfahren lassen sich Konstruktionen mit Blechdicken bis 15 mm herstellen, ohne dass ein technischer Nullspalt zwischen den Fügepartnern erforderlich ist. Die Verbindungen können einlagig ausgeführt werden und zeichnen sich im Vergleich zu konventionellen Verfahren durch ihren verringerten Energieeintrag in das Bauteil und eine reduzierte Schweißzeit aus. Da Spaltbreiten bis zu 1 mm prozesssicher überbrückt werden, entfällt die bisher erforderliche teure mechanische Nahtvorbereitung [ACH-18].

Eine grundlegende Schwierigkeit, die einem flächendeckenden industriellen Einsatz des Hybridschweißens entgegensteht, ist die Vielzahl von Einflussfaktoren, die auf das Schweißergebnis wirken. Diesen Umstand belegen weit aus mehr wissenschaftliche Veröffentlichungen zu Hybridschweißverfahren als tatsächliche Anwendungen in der Industrie.

In Bild 1 ist die zeitliche Abfolge von der Einführung der Hybridschweißverfahren in die industrielle Fertigung über die kommerzielle Verfügbarkeit von energieeffizienten Festkörper- oder Diodenlasern zusammengefasst.

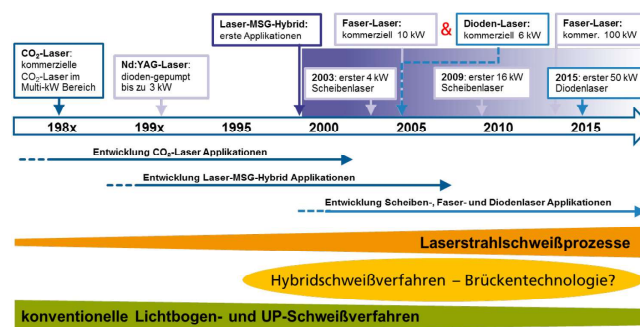


Bild 1. Einordnung der Hybridschweißtechnologie in die zeitliche Entwicklung auf dem Gebiet der Lasertechnik, Quellen: [STE-08], [LEI-12], [RAT-14], [ULL-16]

Seit der Verfügbarkeit von Hochleistungsfestkörperlasern hat sich tendenziell auch die Bedeutung der Einzelprozesse von Hybridschweißverfahren vom ursprünglich dominanten MSG-Prozess zum Laserstrahlprozess verschoben. Kommerziell erhältlich sind fasergeführten Diodenlaserstrahlquellen, die bei einem Strahlparameterprodukt von kleiner als 200 mm mrad eine Ausgangsleistung bis zu 50 kW aufweisen. In Kombination mit einem großen Spotdurchmesser ist ein wirtschaftliches Fügen von Stahlblechen mit großer Dicke und den dabei typischerweise auftretenden Toleranzen möglich [REI-17].

Ein in seiner Komplexität deutlich reduziertes Verfahren ist das Laserstrahlschweißen mit Zusatzdraht, welches prinzipiell dieselben Vorteile wie das Hybridschweißen bietet. Obwohl die allgemeine Anwendbarkeit und Robustheit des Verfahrens im Labor bereits untersucht und überzeugend demonstriert wurde (siehe [DIL-95]), wird das Potenzial des Laserschweißens mit Schweißzusatzwerkstoff (SZW) industriell noch nicht ausgeschöpft. Bisher war eine ausreichende Prozessstabilität für Stahlbauanwendungen, insbesondere bezüglich Spaltüberbrückung, nicht sicher nachgewiesen. Diese Diskrepanz zwischen Labor und Praxis ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass ein wirtschaftlicher Einsatz des Verfahrens aufgrund der bis vor wenigen Jahren noch relativ teuren und nur begrenzt zur Verfügung stehenden Laserleistung bisher nicht möglich war.

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklung stellt sich die Frage, ob der Verfahrensansatz des Schweißens mit Diodenlaser und SZW für eine produktive schweißtechnische Fertigung von Blechdicken > 15 mm mit stahlbautypischen Toleranzen von max. 2 mm Spalt geeignet ist. Es besteht die begründete Hoffnung, dass das Schweißen mit Diodenlasern unter Verwendung von Zusatzdraht perspektivisch eine leistungsfähige und prozesstechnisch einfache Alternative zum Hybridschweißen sein kann, sofern sich für eine einheitliche, konkrete Schweißaufgabe vergleichbare oder bessere Schweißergebnisse bei ähnlichen Schweißgeschwindigkeiten erzielen lassen.

3 Lösungsansatz und Systemtechnik

Im Gegensatz zu dem bisherigen Lösungsansatz für das Laser-Mehrlagen-Engspaltschweißen [BRK-18], bei dem Laser höchster Strahlqualität Verwendung finden und der Laserstrahl lateral zur Vorschubbewegung oszilliert wird, ist der für den Stahlbau verfolgte Technologieansatz sehr stark auf die Möglichkeit der Spaltüberbrückung (max. 2 mm) und einer hohen Abschmelzleistung für Laserprozesse ausgerichtet. Dazu ist ein verhältnismäßig großer Spotdurchmesser von 0,6 mm bis 1,3 mm erforderlich, der einerseits eine ausreichende Überdeckung der Bauteilflanken, andererseits ein sicheres Aufschmelzen des zugeführten Schweißzusatzwerkstoffs ermöglicht, Bild 2.

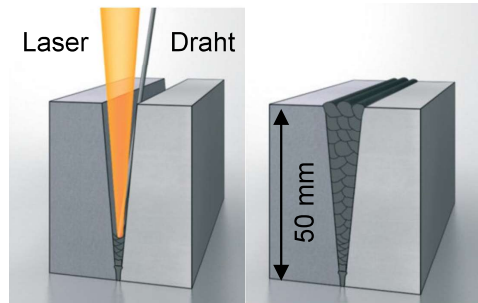


Bild 2. Prinzipbild Diodenlaser-MES Verfahren unter Verwendung von Kaltdraht

In Bild 2 ist für eine 50 mm dicke Probe ein möglicher Lagenaufbau skizziert. Die Verwendung einer Diodenlaserstrahlquelle mit hoher Strahlqualität (40 mm mrad) garantiert zudem eine ausreichende Zugänglichkeit in engen Schweißspalten bzw. Y- und V-Fugen.

Im Rahmen laufender Forschungsaktivitäten wurde deshalb ein Laborschweißkopf aufgebaut, Bild 3, der eine exakte Führung des Schweißzusatzwerkstoffes in Bezug auf den Strahlfokus erlaubt. Um der Forderung nach Automatisierung der Schweißeinheit nachzukommen, erfolgte die Integration eines Triangulationssensors, der neben der Spalttiefe und Spaltmitte, auch weitere wichtige Merkmale für eine Automatisierung, wie den Fugenquerschnitt ermitteln kann. Damit wird auch der Forderung entsprochen, den Schweißkopf potenziell an einfache Führungsmaschinen zu koppeln, wie zum Beispiel an einen modifizierten stahlbautypischen Schweißtraktor.

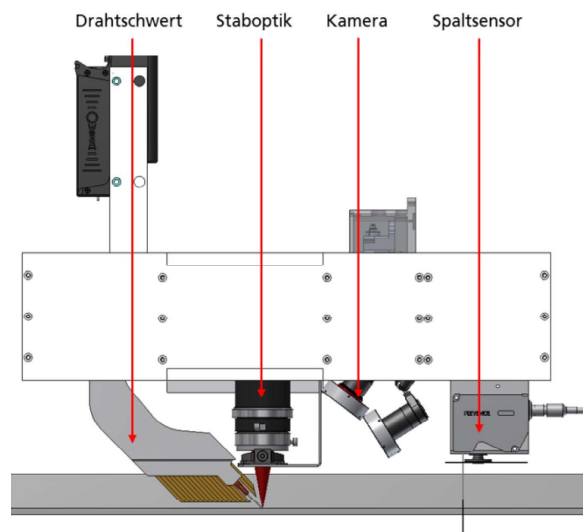


Bild 3. Überblick Schweißkopfaufbau zur Entwicklung des Diodenlaser-MES-Kaltdraht Verfahrens

Dieses Konzept ist perspektivisch um eine lichtdichte Laserschutzhaube mit integrierter Schweißrauchabsaugung erweiterbar. Die kompakte Bauweise wird eine bauteilangepasste Führung über die jeweilige Stahlbaukomponente ermöglichen. Somit sollen sich zukünftig auch in offenen Fertigungshallen solche neuartigen Schweißlösungen realisieren lassen.

4 Experimentelle Umsetzung und Ergebnisse

4.1 Schweißkonstruktion und technische Umsetzung

Als Grundlage für die Prozessentwicklung wurde die Schweißkonstruktion eines Hallenkranträgers ausgewählt, um die klassischen Vorteile von Laserapplikationen, wie hohe Prozessgeschwindigkeit und geringer Energieeintrag in

das Bauteil, auszunutzen. Zwei einseitig zu fügende Stoßkonfigurationen standen im Fokus der Entwicklung, eine Stumpfstoß-Verbindung für Blechdicken bis 30 mm und ein T-Stoß, der im Vollanschluss eine Schweißtiefe von bis zu 15 mm erreicht, siehe Bild 4. Als Basis für die Versuche wurde ein klassischer Konstruktionswerkstoff S355J2+N ausgewählt.

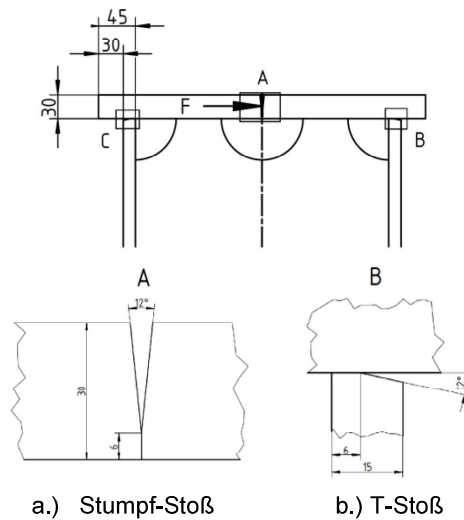


Bild 4: Skizze der verwendeten I-Stoß- (a) und T-Stoß- (b) Kantenvorbereitung für eine kranbautypische Kastenkonstruktion

Die Herausforderung für die experimentelle Umsetzung der adressierten Schweißnahtvorbereitungen lag in der Erzeugung adäquater Plasmaschnittkanten mit kleinem Öffnungswinkel. Hier wurden schrittweise zunächst 8, 15 und 30 mm dicke Grundbleche genutzt, um den minimalen Winkel und die maximale Schnittkantenqualität zu erreichen. Als Schnittkantenprozedur wurde eine Einschnittstrategie ermittelt, die in Form eines V-Schnitts ausgeführt, blechdickenabhängig für den Stumpfstoß zu einer der Y-Nahtvorbereitung ähnlichen Kanten geometrie führt, siehe Bild 5.

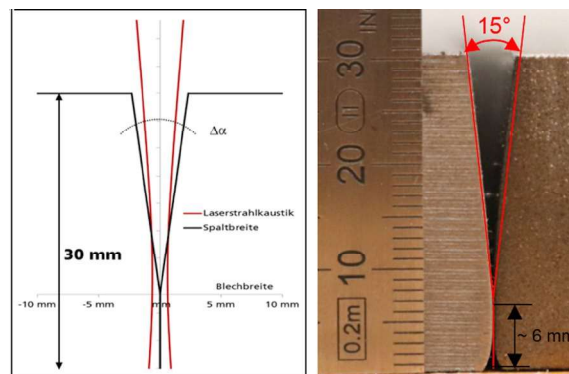


Bild 5: Strahlkaustik des eingesetzten Schweißlasers und Schnittkantenvorbereitung für einen 30 mm I-Stoß

Der Öffnungswinkel wurde so entsprechend der Winkelöffnung der Strahlkaustik reduziert, um das zu füllende Nahtvolumen auf ein Minimum zu optimieren. Bestimmt wird der Öffnungswinkel α aus der Strahlkaustik und einem Geometrieinfluss, der abhängig von der Blechdicke und dem perspektivisch zu erwartenden Bauteilverzug ist. Im gegebenen Beispiel einer 30 mm dicken Probe beträgt der Öffnungswinkel $\leq 15^\circ$. Die idealisierte Steghöhe beträgt für die gewählte Blechdicke ca. 6 mm.

4.2 Prozessgrundlagen

Prozesstechnische Grundlagen wurden an einer 8 mm-Stumpfnah für das Diodenlaser-Kaltdraht-Schweißen entwickelt und mit typischen Laser-Hybrid-Schweißverbindungen verglichen, siehe Bild 6, [MAY-18].

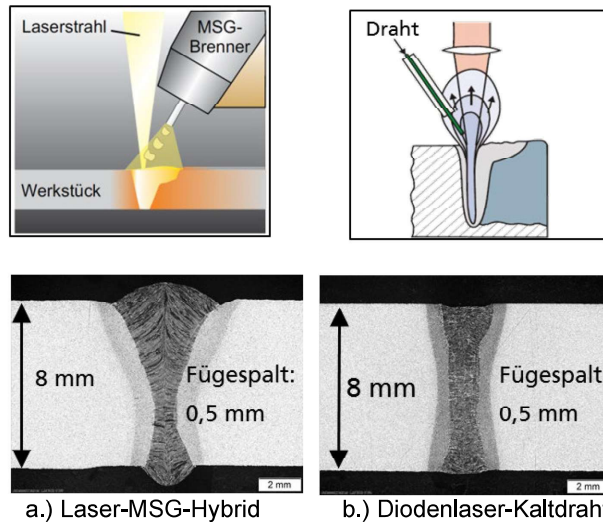


Bild 6. Prozess- und Energievergleich an einem 8 mm Blech für den Referenzprozess Laser-MSG-Hybrid und den Diodenlaser-Kaltdraht-Prozess [MAY-18]

Beide Schweißverbindungen lassen sich, nach der DIN EN ISO 13919-1, der Bewertungsklasse B zuordnen, wobei der Energieeintrag in das Blech bei Einsatz des Laser-Kaltdrahtprozesses 20% unter dem des Laser-MSG-Hybridprozesses liegt. Zudem entsteht durch die energetisch lokalisierte Energieeinbringung des Diodenlasers eine nahezu flankenparallele Schweißnaht, die deutlich weniger Schweißverzug erwarten lässt, Tabelle 1.

Tabelle 1. Vergleich der Verfahrens- und Prozesskennwerte für einen Laser-MSG-Hybridschweißprozess und das Diodenlaser-MES-Kaltdrahtschweißen [MAY-18]

Laserstrahl-MSG-Hybridschweißprozess	Diodenlaserstrahlschweißprozess
Energiequelle(n): - Faser- / Scheibenlaser - MSG-Stromquelle	Energiequelle: - Diodenlaser (Spot $\varnothing \sim 800\mu\text{m}$), SPP 40 mm mrad
Parameter (Beispiel): Prozessleistung: 12,5 kW Schweißgeschw.: 1,5 m/min Drahtvorschub: 11,3 m/min Energieverbrauch: 1356 kJ/m	Parameter (Beispiel): Prozessleistung: 10,0 kW Schweißgeschw.: 1,7 m/min Drahtvorschub: 4,8 m/min Energieverbrauch: 1069 kJ/m
Naht-Querschnittsfläche: Schweißnaht: 22,75 mm ² Bewertungsgruppe: R	Querschnittsfläche: Schweißnaht: 14,16 mm ² Bewertungsgruppe B

Der maximal überbrückbare Spalt für diese 8 mm dicke Stumpfstoßverbindungen lag bei ca. 1 mm der jedoch nur für die Diodenlaser-Kaltdraht Schweißverbindung der Bewertungsklasse B entsprach.

4.3 Technologietransfer auf größere Blechdicken

Im nächsten Schritt wurde der entwickelte Schweißprozess genutzt, um den Steg der Y-Nahtvorbereitung eines 15 mm und 30 mm Blech zu verbinden, Bild 7.

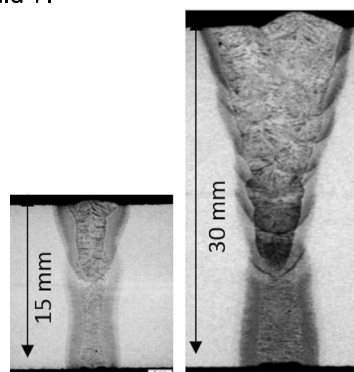


Bild 7. Makro-Querschliffe einer Diodenlaser-MES-Kaltdraht Verbindung mit 15 bzw. 30 mm Blechdicke

Um diesen Übergang prozesssicher zu ermöglichen, war ein Triangulationssensor für die Spalt- und Nahtlagenvermessung erforderlich. Die Anpassung der Schweißparameter erfolgte in Abhängigkeit vom gemessenen Fügespalt im Stegbereich und dem damit zu überbrückenden Spalt. Während die 15 mm tiefe Schweißverbindung mit lediglich 2 Lagen erzeugt wurde, waren für die doppelte Blechdicke 11 Lagen erforderlich. Der Schweißzeitunterschied lag damit um ca. den Faktor 4 höher. Beide Schweißnähte sind riss- und bindefehlerfrei ausgebildet, Poren entstehen keine. Sowohl die homogene Nahtüberhöhung an der Schweißnahtoberseite als auch die geringfügige Nahtunterwölbung an der Schweißnahtwurzel sind nach den gängigen Normen (DIN EN ISO 13919-1) der Bewertungsgruppe B zuzuordnen. In beiden Varianten wurde ohne eine Badstütze gearbeitet.

Die bis zu 700 mm langen Proben waren nicht vorgewärmt. Damit kommt ein weiterer Aspekt des Laser-MES-Verfahrens zu tragen. Durch Entfall der bei konventionellen Schweißprozessen üblichen Vorwärmung steigt die Energieeffizienz und es ist eine Verkürzung der Fertigungskette zu erwarten. Die Maximale Laserleistung der verwendeten Strahlquelle lag bei 10 kW mit einem Strahlparameterprodukt von 40 mm mrad. Das heißt, unabhängig von der Blechdicke ist das Diodenlaser-MES-Kaltdraht Verfahren hervorragend skalierbar. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, bei verhältnismäßig geringen Investitionskosten ein großes Portfolio an Bauteilen unterschiedlicher Blechdicken mit einem Verfahren sicher abdecken zu können. Die Investitionen in eine Strahlquelle von ca. 16 kW und eine MSG-Quelle, wie sie bei vergleichbarer Blechdicke für das Laser-MSG-Hybridprozesse erforderlich sind, können somit deutlich unterschritten werden [LAH-15].

Die Flexibilität des Diodenlaser-MES-Kaltdraht Verfahrens zeigt sich nicht nur in der Skalierbarkeit auf unterschiedliche Blechdicken sondern auch durch dessen Übertragbarkeit auf andere Stoß-Geometrien.

Die in Bild 4 aufgestellten Geometrieverhältnisse für einen 15 mm T-Stoß können mit der zuvor beschriebenen Plasma-Einschnittstechnologie sicher erzeugt und entsprechend konfektioniert werden, Bild 8a. Die Herausforderung besteht darin, die Flankenbindung trotz der asymmetrisch angeordneten Fügepartner sicherzustellen und ausreichend Schweißzusatzwerkstoff in den ca. 10 mm tiefen V-artigen Kerb einzutragen. Dazu wurde der für diese Blechdicke ermittelte Referenzparametersatz den geometrischen Bedingungen angepasst. Es zeigt sich erneut die Robustheit des MES-Schweißprozesses, bei dem die Schweißparameter mit leichten Anpassungen gut auf die geänderte Nahtvorbereitung übertragen werden können. In Bild 8 b ist ein riss- und bindefehlerfreier Querschnitt dargestellt, der in zwei Lagen ausgefertigt wurde.

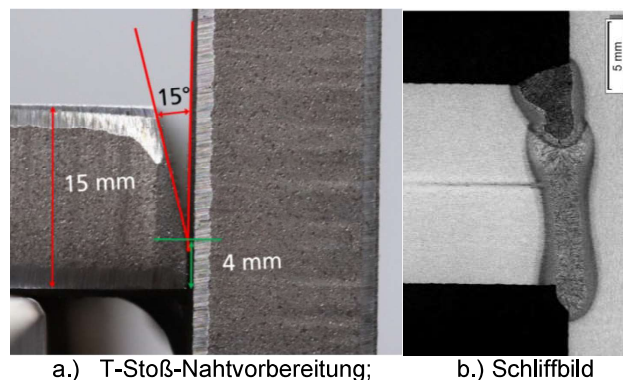


Bild 8. T-Stoß-Nahtvorbereitung und Makro-Querschliff der Diodenlaser-MES-Kaltdraht Verbindung bis 15 mm Blechdicke

5 Eigenschaftsbewertung

Bedingt durch die fehlende Vorwärmung, den konzentrierten Wärmeeintrag und die hohe Schweißgeschwindigkeit von ca. 1 m/min ist die Abkühlgeschwindigkeit ($t_{8/5}$ -Zeit) sehr hoch. Somit besteht die Gefahr erheblicher Aufhärtung im Schweißgut bzw. in der Wärmeeinflusszone und vermehrter Martensitbildung. Um dieser Vermutung nachzugehen, wurde eine zweilagig ausgeführte Schweißnaht an einem 15 mm Blech durch Vickers-Härteprüfung (HV0,1) vermessen, siehe Bild 9.

Anhand des senkrechten Härteverlaufs (H1, blau) wird deutlich, dass in der ersten Lage eine deutliche höhere Schweißguthärte vorliegt als in der darüber liegenden. Der Unterschied beträgt ca. 50 HV0,1. Die Ursache liegt im hohem GW-Anteil ($\approx 0,2\%C$) im Schmelzgut begründet. Dagegen steigt in der zweiten Lage der SZW-Anteil ($G3Si1$, $\approx 0,08\%C$) im Schweißgut um den Faktor 4 an, was zu einer deutlichen Reduzierung der Härte führt.

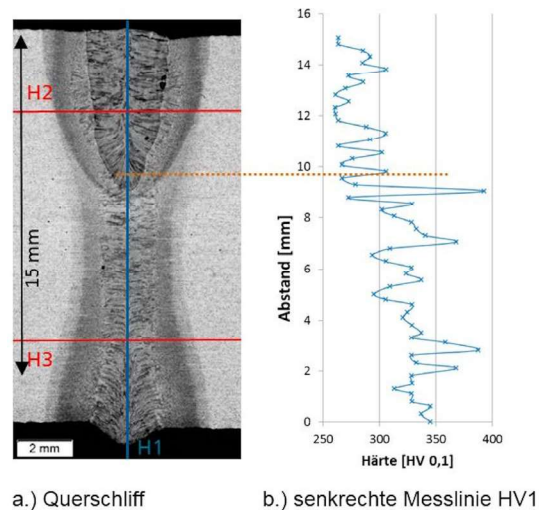


Bild 9. Makro-Querschliff einer 15 mm Diodenlaser-MES-Kaltdraht Schweißnaht mit unterschiedlich positionierten Härte-Messlinien

Der Übergangsbereich zwischen beiden Lagen ist durch eine lokale Härtespitze bis auf nahezu 400 HV_{0,1} gekennzeichnet. Dieser Höchstwert markiert die Aufhärtungszone der WEZ der zweiten Lage und wird gefolgt von einer deutlich reduzierten Härte.

Ergänzend zu dieser Darstellung wurden zwei weitere Härtemessungen quer zur Schweißnaht in den Positionen H2 und H3, siehe Bild 9 durchgeführt. Die Messwerte sind in Bild 10 dargestellt und bestätigen das bisher beobachtete Härtebild. Die erste Lage härtet im Schweißgut bis auf eine mittlere Härte von ca. 300 HV_{0,1} auf, die WEZ zeigt keine zusätzliche Aufhärtung. In der zweiten Lage härtet die WEZ lokal bis auf Werte von ca. 420 HV_{0,1} auf, die mittlere Schweißguthärte fällt bis auf ca. 250 HV_{0,1} ab. Dieses Bild entspricht einer typischen Härteverlaufskurve einer mit SZW gefertigten Laserstrahlschweißnaht ohne Vorwärmung in einem Baustahl S355.

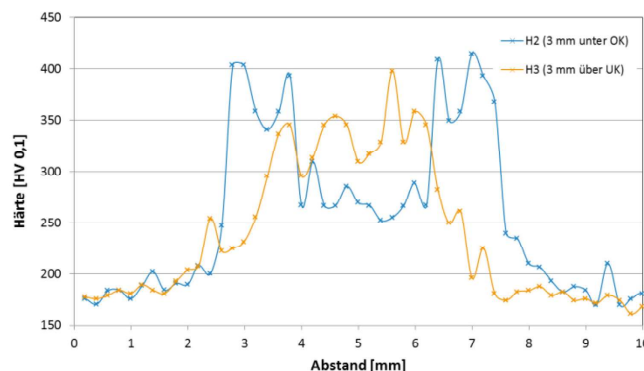


Bild 10. T-Stoß-Nahtvorbereitung und Makro-Querschliff der Diodenlaser-MES-Kaltdraht Verbindung bis 15 mm Blechdicke

6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der Diodenlaser-MES-Kaltdraht Prozess ermöglicht die Fertigung von 8 bis 30 mm dicken Blechen im Stumpf-Stoß und im T-Stoß.
- Der Diodenlaser-MES-Kaltdraht Prozess ist sehr gut skalierbar.
- Es ist zu erwarten, dass eine Verarbeitung größerer Blechdickenbereiche mit diesem Verfahren möglich ist.
- Die erzeugten Schweißverbindungen sind Riss- und Bindefehler-frei. Poren treten wenn überhaupt nur vereinzelt auf.
- Der Energieeintrag in das Bauteil ist durch die Verwendung des Diodenlaser-MES-Kaltdraht Verfahrens und den Entfall einer Vorwärmung bei gleicher Blechdicke im Vgl. zu Laser-MSG-Hybrid-Verfahren geringer. Dies ist vorteilhaft, um den Bauteilverzug stark zu reduzieren.
- Die Komplexität des Diodenlaser-MES-Kaltdraht Verfahrens ist deutlich geringer als ein vergleichbarer Laser-MSG-Hybridprozess.

Das Diodenlaser-MES-Kaltdraht Verfahren unter Verwendung von SZW stellt somit eine attraktive Alternative zu den etablierten Verfahren der Lichtbogen und Laser-MSG-Hybridtechnik dar. Die Eignung des Verfahrens für das Verschweißen großer Waddicken unter stahlbautypischen Bedingungen (Plasmaschnitt, max. 2 mm Spalt) wurde an praxisnahen Versuchsträgern nachgewiesen.

Im Vergleich zum Laser-MSG-Hybrid-Verfahren zeichnet sich für das Diodenlaserschweißen mit SZW ein deutlicher Vorteil hinsichtlich Minimierung des Wärmeeintrags und damit des Verzugs und hinsichtlich Vereinfachung des Prozessführung dar.

7 Literatur

- [PLA-09] Platz, J.; Haiger: Moderne Hochleistungsschweißverfahren im Vergleich, In: DVS-Berichte, Bd. 258, S. 376 - 378, DVS Media GmbH, Düsseldorf, 2009
- [STE-08] Stelling, K.: Laserstrahl-Plasma-Hybridschweißen austenitischer Stähle, Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (BAM Dissertationsreihe,39), 2008
- [BAG-05] Bagger, C.; Olsen, F. O.: Review of laser hybrid welding. In: Journal of Laser Applications 17 (1), S. 2 - 14, 2005
- [ZHO-12] Zhou J.; Tsai H. L: Hybrid Laser-Arc Welding, In: Welding Processes, (Chapter 1), S 3 - 32, InTech, 2012
- [MAH-06] Mahrle, A.; Beyer, E.: Hybrid laser beam welding—Classification, characteristics, and applications, In: Journal of Laser Applications 18 (3), S. 169 - 180, 2006
- [GBB-07] Göbel, G.; Brenner, B.; Beyer, B.: „New application possibilities for fiber laser welding“, Proc. of 26th Intern. Congress on Applications of Laser & Electro-Optics, Tagungs-CD, 29.10. -01.11.2007, Orlando (FL), USA
- [REI-17] Reisgen, U.; Olschok, S.; Weinbach, M.; Engels, O.: Welding of high thickness steel plates using a fiber coupled diode laser with 50 kW of output power, Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik e.V. - Lasers in Manufacturing Conference, München, 2017
- [ALC-17] Alcock, J. A.; Baufeld, B.: Diode laser welding of stainless steel 304L. In: Journal of Materials Processing Technology (240), S. 138 - 144, 2017
- [ACH-18] Acherjee, B.: Hybrid laser arc welding: State-of-art review. In: Optics and Laser Technology (Volume 99), S. 60 - 71, 2018
- [LEI-12] Leibinger, P.: Industry Laser Trends - Have we reached a Turning Point? Vortrag auf: Stuttgarter Lasertage, 2012
- [RAT-14] Rath, W.; Brettschneider, C.: Industrial Laser Materials Processing - A review of the origin, current status and an outlook, In: Laser Technik Journal 04/2014, S. 23 - 27, 2014
- [ULL-16] Ullmann, C.: High Power Diode Laser between Innovation and Production Technology, Vortrag auf: International Laser Symposium, Dresden, 2016
- [DIL-95] Dilthey, U.; Fuest, D.; Scheller, W.: Laser welding with filler wire. In: Optical and Quantum Electronics (27), S. 1181 - 1191, 1995
- [BRK-18] Brenner, B et al.: Laser Multi Pass Narrow Gap Welding – A New Technology for Joining Thick Walled Components of Power Stations; VGB-Workshop “Materials and Quality Assurance 2017”, Mai 18/19 th 2017, Maria Enzersdorf, Austria
- [MAY-18] J. Mayle: „Vergleichende Untersuchung zwischen Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen und Diodenlaser-Strahlschweißen zum Fügen von Stahlblech bis 8 mm Dicke“ 2018
- [LAH-15] Lahdo, R.; Seffer, O.; Springer, A.; Kaierle, S.; Collmann, M.; Schaumann, P.: Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen von Feinkornbaustählen für den Einsatz im Stahlbau, In: Stahlbau, Band 84, Heft 12, S. 1016-1022, 2015