

Aktuelle Entwicklungen des Laserstrahlschweißens im Pipelinebau

Integrierte 100 % Inline-Prüfung mit dem EMAT-Verfahren

Von Georg Trench, Hans-Jürgen Kocks und Steffen Keitel

Die Vorteile eines automatisierten Schweißprozesses mit dem Laserstrahl können aufgrund der niedrigen Wärmeeinwirkung dann umfänglich ausgeschöpft werden, wenn dieser Prozess mit einer entsprechenden Prüftechnik kombiniert werden kann. Für die zerstörungsfreie Prüfung der Schweißnähte bietet sich die Ultraschallprüfung geradezu an. Die mit dem Laserstrahl hergestellte Schweißnaht hat sehr viel Ähnlichkeit mit der bei dem zur Rohrherstellung angewendeten Hochfrequenz-Induktions-Pressschweißverfahren. In der Rohrproduktion ist die Anwendung der Ultraschallprüfung Stand der Technik und sollte auch auf der Baustelle in Kombination mit einem automatisierten Schweißverfahren die gewünschte Kontrollfunktion ermöglichen.

Einleitung

Das Lichtbogenschweißen zur Verbindung von Rohren ist Stand der Technik im Pipelinebau. Während im kleineren Nennweitenbereich die Schweißung von Hand der Standard ist, werden im großen Nennweitenbereich speziell bei großen Distanzen vielfach auch automatisierte Schweißverfahren angewendet. Unabhängig vom Schweißverfahren bleiben die bei der Herstellung der Rohrverbindung an der Baustelle erforderlichen Arbeitsschritte Schweißen, Prüfen und Nachumhüllen eigenständige Prozesse, die nacheinander und zumeist auch von unterschiedlichen Vertragspartnern mit entsprechend zeitlichem Versatz und logistischem Aufwand für den Baustellenbetrieb abgewickelt werden (**Bild 1**).

Mit dem Laserstrahlschweißen steht eine Fügetechnik zur Verfügung, die im Vergleich zu den heute üblichen Elektroschweißverfahren deutlich fokussierter unter gerin-

gerer Wärmeeinwirkung ausgeführt werden kann. Die geringe Wärmeeinwirkung könnte es ermöglichen die Arbeitsschritte Schweißen und Prüfen in einen Arbeitsgang zusammenzuführen und so den logistischen Aufwand auf der Baustelle deutlich zu reduzieren. Neben der für den Pipelinebau notwendigen orbitalen Technik sind natürlich auch andere Anwendungsfälle wie beispielsweise im Konstruktionsbereich interessant, wenn mit feststehenden Anlagen Verbindungsnahte realisiert werden.

Als zerstörungsfreies Prüfverfahren bietet sich die Ultraschallprüfung an. Mit den auf der Baustelle üblichen manuellen Verfahren können laut Regelwerk Wanddicke ab 6 mm geprüft werden [1]. Automatisierte Verfahren erfordern eine Validierung dieser Einsatzgrenzen, die laut Regelwerk ab ca. 6 mm angewendet werden kann. Mit Blick auf den hier interessanten kleineren Durchmesserbe-



Bild 1: Schweißen – Prüfen – Nachumhüllen

reich bietet sich somit ein Wanddickenspektrum von 3,6 mm bis etwa 12 mm an, das prinzipiell alle möglichen Anwendungsfälle eines HFI-geschweißten Rohres mit Außendurchmessern bis etwa DN 600 abzudecken vermag.

Vorteil eines automatisierten Prüfverfahrens wäre die zu 100 % ausgeführte Inline-Prüfung aller Verbindungsnahte. Ergänzend können weitere Informationen des Schweißprozesses zur Bewertung herangezogen werden, wie beispielsweise die Aufzeichnung der Emissionen des Laserprozesses.

Ein Rückblick

Ausgangspunkt dieses Projektes zum automatisierten Laserstrahlschweißens ist eine Machbarkeitsstudie, die in den Jahren 2009 bis 2010 unter Beteiligung der Stadtwerke München GmbH und der Gelsenwasser AG durchgeführt wurde [2]. Im Rahmen dieser Studie ist ein erster Prototyp entstanden, der für das Verschweißen von Rohrstößen im Wanddickenbereich bis 5 mm und im Durchmesserbereich zwischen DN 80 und DN 150 eingesetzt werden kann. Bereits mit diesem ersten Prototyp sind Prüfergebnisse realisierbar, die den Regelwerksanforderungen gerecht werden. Die automatisierte Ultraschallprüfung wird hier koppelmittelfrei ausgeführt. Die Ankopplung der Prüfköpfe erfolgt über Silikonrollen, die in einem festen Abstand zur Schweißnaht um das Rohr geführt werden.

In einem zweiten Teilprojekt wurde in Kooperation mit der Köster GmbH als Verleger auf dem Werksgelände der ONTRAS Gastransport GmbH mit einem für Rohrdurchmesser bis DN 400 optimierten Prototyp unter Baustellenbedingungen Schweißversuche durchgeführt. Es wurden verschiedene Verlegeabläufe simuliert, um die Möglichkeiten des Schweißverfahrens optimal nutzen zu können. In Bezug auf die automatisierte Schweißnahtprüfung zeigte sich dabei, dass die gewählte Konzeption einer Ankopplung über Silikonrollen nur bedingt baustellentauglich ist. Die Silikonrollen verschmutzen sehr leicht, so dass die Signale deutlich zu Lasten der Aussagekraft einer Schweißnahtbewertung gedämpft werden. **Bild 2** zeigt ein CAD-Modell der Umlaufkonstruktion und die Verschmutzung der zur Ankopplung verwendeten Silikonrollen.

Im Zuge einer Baumaßnahme der ONTRAS Gastransport GmbH folgte ein erster Feldversuch in der Nähe von Greifswald, der ohne automatisierte Schweißnahtprüfung abgewickelt wurde. Bei dem etwa 1000 m langen Abschnitt einer Hochdruckgasleitung konnte das Laserstrahlschweißverfahren mit dem Prototypen der SLV Halle GmbH erfolgreich angewendet werden [3].

Im Rahmen eines dritten Teilprojektes wurde nunmehr mit EMAT die Anwendung eines alternativen zerstörungsfreien Prüfverfahrens untersucht. Das Potenzial dieser Technologie ist dabei so überzeugend, dass im Rahmen dieses Projekt die Validierung des Prüfverfahrens für laser-

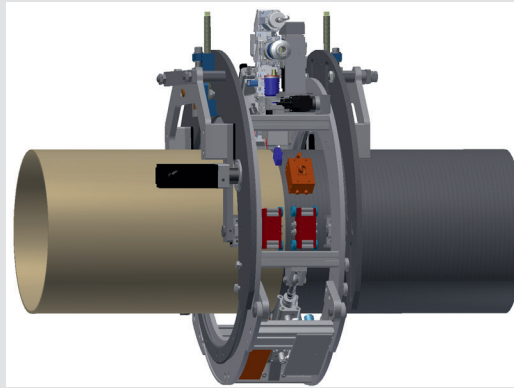


Bild 2: CAD-Modell des Prototyps für die Kombination aus Laserstrahlschweißen und Schweißnahtprüfung und verschmutzte Silikonrollen zur Ankopplung der Ultraschallprüfköpfe

strahlgewweißte Pipelines in einem Wanddickenbereich von 4 bis 8 mm abgeschlossen wurde.

Das EMAT-Verfahren

Hinter dem Begriff EMAT verbirgt sich ein Verfahren, dass mit elektromagnetisch induziertem Ultraschall arbeitet. Im internationalen Raum als „Electro Magnetic Acoustic Transducer“ (EMAT), im deutschsprachigen Raum als „Elektromagnetischer Ultraschallwandler“ (EMUS) bezeichnet, werden bei diesem Verfahren elektromagnetische Wechselwirkungen zwischen Prüfkopf und Werkstück genutzt, um im Werkstück eine hochfrequente akusto-elastische Schwingung zu erzeugen. Die Schwingungen sind vergleichbar mit klassisch eingebrachtem Ultraschall, der beispielsweise über einen Piezoschwinger auf das Werkstück übertragen wird. Durch die EMAT-Prüftechnik ist es möglich, viele verschiedene Wellenarten direkt im Prüfobjekt zu erzeugen. Diese können sowohl modenrein als auch polarisiert im Werkstück entstehen. Das Besondere hierbei ist, dass kein Koppelmittel zwischen Prüfköpfen und Prüfobjekt vorhanden sein muss. Der Abstand zwischen Prüfkopf und Prüfobjekt soll aufgrund des Wirkungsgrades der Ultraschallerzeugung nur wenige Zehntelmillimeter betragen. Eine weitere Voraussetzung ist die elektrische Leitfähigkeit des Prüfobjektes, da sonst mangels elektromagnetischer Wechselwirkungen keine hochfrequente akusto-elastische Schwingung erzeugt werden kann. Das verwendete Prüfsystem arbeitet im Impuls-Echo-Verfahren, bei dem ein einzelner Prüfkopf für das Entsenden und Empfangen des Messsignals ausreicht. Wie aus dem klassischen Ultraschall bekannt, wird das Signal in Richtung des Prüfobjektes, in diesem Fall die Schweißnaht, gesendet und ggf. durch Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht reflektiert. Ein geringer Anteil des entsendeten Ultraschalls wird durch den metallurgisch bedingten Homogenitätsunterschied von Schweißnaht und Grundwerkstoff reflektiert und als Schweißnahtauschen erfasst. Im Falle einer Schweißnaht ohne Unregelmäßigkeiten ergibt sich im Prüfverlauf nur

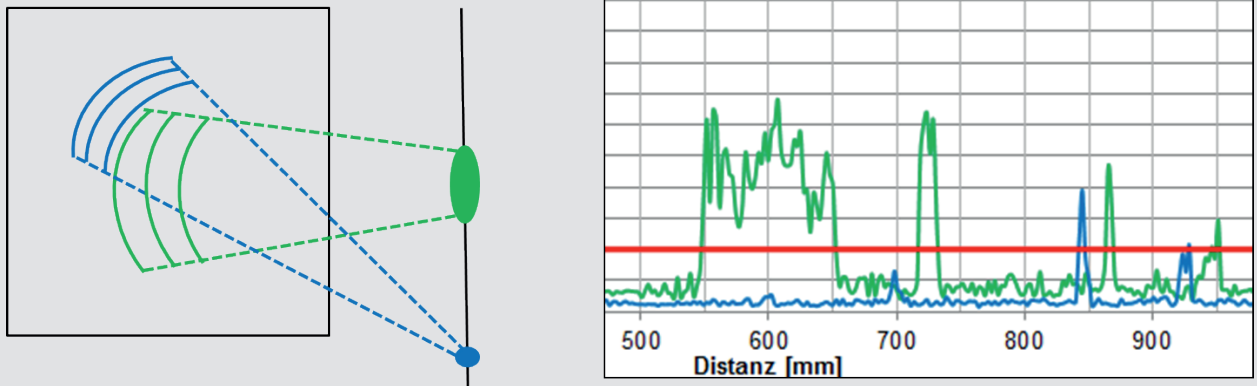


Bild 3: Skizze der Schallfeldorientierung und Ausschnitt eines Messergebnisses

ein vergleichsweise schwaches Grundrauschen. Der Prüfkopf ist so aufgebaut, dass zwei verschiedene Schallfelder generiert werden können. Dabei handelt es sich um ein fokussiertes, vorlaufendes Schallfeld und ein planares Schallfeld, das parallel zum Prüfkopf ausgesendet wird (**Bild 3**). Durch diese Anordnung wird eine gesteigerte Sensitivität für eindimensionale, sowie zweidimensionale Unregelmäßigkeiten erreicht. Ein weiterer Schritt zu einer verbesserten Sensitivität ist die Wahl der Wellenart. Bei den vorliegenden Untersuchungen ist eine vertikal polarisierte Transversalwelle mit einem Einschallwinkel von 35° verwendet worden.

Validierung der Schweißnahtprüfung

Im Laufe der Untersuchungen ist die EMAT-Prüftechnik in die Laserorbitalschweißzange der SLV Halle GmbH integriert worden. Durch die hohe Robustheit der Prüfköpfe und den Erfahrungen aus den Feldversuchen ist ein Konzept umgesetzt, das auch einen Großserieneinsatz ermöglicht. In Zusammenarbeit mit der TÜV Nord Systems GmbH & Co. KG existiert nunmehr eine Prüfstrategie, die den Wanddickenbereich von 4,0 mm bis

einschließlich 8,0 mm abdeckt. In diesem Bereich erfolgte die Validierung des Prüfsystems nach CEN/TR 14748 an Stahlrohren für den Pipelinebau für Rohrdurchmesser ab DN 100 [4]. Diese Validierung bestätigt somit die Eignung der EMAT-Technologie als koppelmittelfreie Ultraschallprüfung für laserstrahlggeschweißte Stahlrohre nach den entsprechenden Richtlinien und Normen. Um eine belastbare Aussage über die Leistungsfähigkeit des Prüfsystems treffen zu können, wurde im Rahmen der Validierung eine Laborsimulation in der SLV Halle durchgeführt (**Bild 4**). Es wurden mehr als 15 Schweißnähte verschiedener Wandstärken laserstrahlggeschweißt und anschließend der teilautomatisierten EMAT-Prüfung unterzogen.

Die Rohrstöße sind dazu unter Verwendung eines 6-kW-Faserlasers des Herstellers IPG Laser GmbH geschweißt worden. Die Verifizierung jedes EMAT-Prüfergebnisses erfolgte dabei durch eine nachgelagerte Röntgenprüfung. Als Bewertungsmaßstab der eingebrachten Unregelmäßigkeiten wird die Bewertungsgruppe „B“ der DIN EN ISO 13919-1:1996-09 zugrunde gelegt [5]. Die Kalibrierung der EMAT-Prüftechnik erfolgt auf eigens hergestellten Rohrstößen mit wanddickenspezifischen Testfehlernuten der Empfindlichkeitsklassen U2 und U3 nach DIN EN ISO 10893-11:2011-07 [6]. Das Prüfsystem ist in der Lage radiale flächige Unregelmäßigkeiten ab einer Größe von 10 % der Wandstärke zuverlässig zu detektieren. Dieser Testfehler entspricht einem Flankenbindefehler, wie er im Bereich des Strahlschweißens auftreten kann. Durch die nahezu senkrechten Flankenwinkel einer Strahlschweißnaht kann der reale Bindefehler durch eine radiale Nut simuliert werden.

Fazit und Ausblick

Auf Basis der erfolgreichen Validierung des Prüfsystems ist der Prototyp für die Kombination aus Laserstrahlorbitalschweißen und EMAT-Prüfung der Serienreife ein großes Stück nähergebracht worden. Durch den vorliegenden Eignungsnachweis kann das EMAT-Prüfsystem zur Prüfung von laserstrahlggeschweißten Stahlrohren

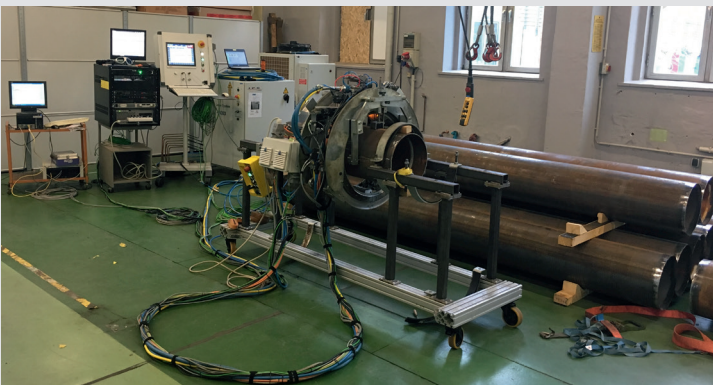


Bild 4: Testbaustelle in der SLV Halle GmbH zur Validierung des Prüfsystems

der entsprechenden Dimensionen eingesetzt werden. Die Anwendung dieser Technologie spart enorm viel Zeit auf der Baustelle, da die Prüfergebnisse innerhalb von 90 Sekunden vorliegen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass konzeptionell 100 % der Schweißnähte geprüft werden. Des Weiteren sind beim EMAT-Verfahren im Vergleich zu gängigen zerstörungsfreien Prüfmethode keine besonderen Maßnahmen (Strahlenschutz, Entsorgung von Koppelmittel, usw.) vorzusehen.

Die reine Fertigungszeit der Rundnaht eines Rohrdurchmessers im Bereich DN 300 bis DN 350 beispielsweise wird durch die Kombination aus Laserstrahlschweiß- und EMAT-Prüftechnologie auf weniger als fünf Minuten reduziert und ermöglicht aufgrund des geringen Wärmeintrags die unmittelbare Nachumhüllung der Nahtbereiche. Weiterhin wird durch die Integration von optischen Messeinrichtungen das Programmieren der Schweißbahn präziser und komfortabler für den Anwender und der Zeitaufwand für die Festlegung des Schweißverlaufs deutlich verringert. Die Verarbeitung aller Messdaten auf einem zentralen Rechnersystem bietet außerdem die Möglichkeit einer umfassenden Prozessanalyse, bei Bedarf auch per Onlinezugriff. Somit ist es möglich, eine komplette Historie jeder einzelnen Schweißnaht einer Rohrleitung anzulegen. In dieser Historie sind alle Schweißparameter der Laserschweißung sowie die Ergebnisse der EMAT Messung erfasst. So kann jederzeit nachgewiesen werden, dass die Schweißung überprüft und frei von Unregelmäßigkeiten ausgeführt wurde.

Der aktuelle Entwicklungsstand konnte im Rahmen des 34. Oldenburger Rohrleitungsforums 2020 am Gemeinschaftsstand der Mannesmann Line Pipe GmbH und SLV Halle GmbH besichtigt werden (**Bild 5**). Neben einigen Live-Vorfürhrungen wurden dem interessierten Fachpublikum Einblicke in die Anlagentechnik geboten. Das durchgehend positive Feedback der Besucher zeigt das Interesse der Branche an dieser bisher einmaligen Anlagenkombination.

Die SLV Halle arbeitet derzeit an einer Erweiterung der Einsatz- und Prozessgrenzen, um auch Rohre größerer Dimensionen mit dieser Verfahrenskombination schweißen und prüfen zu können. Da die stetige Weiterentwicklung regelmäßige Praxisversuche unter realen Baustellenbedingungen erfordert, ist die SLV Halle stets auf der Suche nach neuen Einsatzmöglichkeiten im realen Baustellenumfeld.

Literatur

- [1] DVGW-Arbeitsblatt GW 350 „Schweißverbindungen an Rohrleitungen aus Stahl in der Gas- und Wasserversorgung; Herstellung, Prüfung und Bewertung“ (2015-06)
- [2] Neubert, J.; Kocks, H.-J.; Kräker, T.: Innovative Verbindungstechnik für Stahlrohre – Automatisiertes Laserstrahlschweißen und Prüfen von Rohrverbindungen. 3R (2013), Nr. 4-5, S.54 ff.
- [3] Keitel, S.; Neef, H.; Kocks, H.-J.; Raschke, A.: Laserstrahlschweißen einer Pipeline im Raum Greifswald. 3R (2018), Nr. 6, S. 90 ff.



Bild 5: Gemeinschaftsstand Mannesmann Line Pipe und SLV Halle auf dem 34. Oldenburger Rohrleitungsforum 2020

- [4] DIN-Fachbericht CEN/TR 14748 „Zerstörungsfreie Prüfung – Vorgehensweise zur Qualifizierung von zerstörungsfreien Prüfungen“
- [5] (2005-01)
- [6] DIN EN ISO 13919-1 „Elektronen- und Laserstrahlverbindungen, Leitfaden für Bewertung von Unregelmäßigkeiten – Teil 1: Stahl“
- [7] (1996-09)
- [8] DIN EN ISO 10893-11 „Zerstörungsfreie Prüfung von Stahlrohren, Teil 11: Automatisierte Ultraschallprüfung der Schweißnaht geschweißter Stahlrohre zum Nachweis von Unvollkommenheiten in Längs- und/o-der Querrichtung“ (2011-07)

SCHLAGWÖRTER: Pipelinebau, Laserstrahlschweißen

AUTOREN



GEORG TRENSCH

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt
Halle GmbH, Halle (Saale)
Tel. +49 345 5246 405
trench@slv-halle.de



Dr. HANS-JÜRGEN KOCKS

Mannesmann Line Pipe GmbH, Siegen
Tel. +49 271 691 170
Hans-Juergen.Kocks@mannesmann.com



Prof. Dr.-Ing. STEFFEN KEITEL

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt
Halle GmbH, Halle (Saale)
Tel. +49 345 5246 415
gf@slv-halle.de