

Innovative Verbindungstechnik für Stahlrohre

Automatisiertes Laserstrahlschweißen und Prüfen von Rohrverbindungen

Das Schweißen von Rohren mit einem Orbitalverfahren hat sich im Pipelinebau insbesondere bei Großrohren seit vielen Jahren bewährt. Mit dem Laserstrahlschweißen steht heute eine Technologie zur Verfügung, die bei wesentlich geringerem Zeit- und Materialaufwand vergleichbare Ergebnisse erwarten lässt. So bietet dieses Verfahren inzwischen auch für kleinere Baumaßnahmen eine interessante Alternative zur manuellen Schweißung mit Elektroden. Die verfahrensbedingt sehr geringe Wärmeeinbringung im Schweißnahtbereich erlaubt darüber hinaus eine zeitnahe Prüfung des Schweißergebnisses, so dass im Falle eines kombinierten Prozesses ein nicht zu unterschätzender logistischer Vorteil im Baustellenablauf resultiert. Im Rahmen eines geförderten Verbundprojektes wurde ein Prototyp für diese Aufgabenstellung realisiert.

1 EINLEITUNG

Das Verschweißen von Stahlrohren im Pipelinebau hat eine lange Tradition und ist nach wie vor geprägt von der Fähigkeit der Schweißer im Umgang mit den Elektroden und daher überwiegend Handarbeit. Am Anfang eines Bauprojektes steht häufig eine auf das jeweilige Projekt abgestimmte Schweißanweisung, ggf. eine Verfahrensprüfung und Unterweisungen bei schwierigen Schweißaufgaben, die angesichts eines oft Monate umfassenden Bauablaufes vom Zeitaufwand her kaum ins Gewicht fallen. Während im Pipelinebau ein geregelter Ablauf von der Trassierung über die Endenvorbereitung und das Verschweißen bis hin zum Prüfen der Schweißnähte und die Nachumhüllung sichergestellt ist, sind derartige Abläufe bei kleineren Baumaßnahmen im Verteilungsbereich der Gas- und Wasserversorgung mit einem erheblichen zeitlichen und logistischen Aufwand verbunden. Während im Pipelinebau der Rohrstrang überwiegend auf große Längen vorgestreckt und später als Strang in den Rohrgraben eingelegt werden kann, sind bei kleineren Baumaßnahmen nicht nur begehbarer Rohrgräben, sondern auch im Arbeitsbereich des Schweißers entsprechend Kopflöcher vorzusehen.

Dieser Aufwand steht beispielsweise auch neuen Verlegetechniken wie dem Rohreinzugsverfahren entgegen. Gerade hier wird die realisierbare Zeiterparnis durch einen komplexen Schweißablauf vielfach zunehmend gemacht. Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes wurde die Möglichkeit geprüft, diesen Aufwand mit den heute verfügbaren technischen Lösungen wie das Laserschweißen und neuen Prüftechniken zu reduzieren.

2 STAND DER TECHNIK, MOTIVATION UND AUFGABENSTELLUNG

Im Rahmen eines geförderten Forschungsvorhabens sollte der Prototyp einer Gerätetechnik zum Laserstrahlschweißen erarbeitet werden, der eine kombinierte Lösung zum Verschweißen und Prüfen von Stahlrohren mit Hilfe einer umlaufenden Verfahrenstechnik ermöglicht. Der Entwicklungsaufwand besteht dabei in der Kombination verschiedenster Prüftechniken, um letztlich eine dem Anwendungsbereich angemessene Aussagefähigkeit zu erzielen.

Die Gerätetechnik sollte schon im Falle des Prototypen auf einer möglichst leicht zu handhabenden und platzsparenden Konstruktion basieren. Mit Blick auf die oben bereits beschriebenen Anwendungsbereiche wird dazu im ersten Schritt ein Nennwanddickenbereich der Stahlrohre von 3-5 mm abgedeckt, der letztlich dem Anwendungsbereich von Rohraußendurchmessern von DN 100 bis etwa DN 400 entspricht [1, 2]. Die zulässigen Toleranzen für den Schweißspalt und die erfassbaren Fehlergrößen der Prüftechnik sind zu ermitteln.

Der mit Prüf- und Schweißtechnik ausgestattete Aufsatz zur Herstellung der Rohrverbindung ist von den Gerätschaften zu trennen, die zur Erzeugung der erforderlichen Schweißenergie und Verarbeitung der Messsignale erforderlich sind. Die Verbindung soll durch eine entsprechend ausgelegte Versorgungsleitung realisiert werden. Auf diese Weise können auch größere Entfernung zwischen der Gerätetechnik

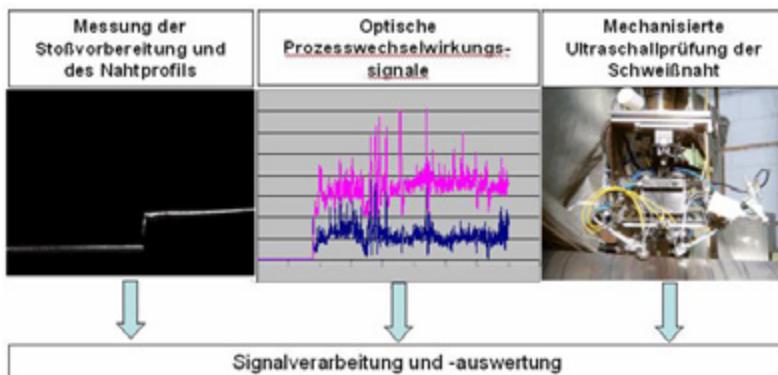


Bild 1: Überwachungs- und Prüfstrategie

und dem eigentlichen Arbeitsaufsatz bewältigt werden. Die Gerätetechnik kann dann je nach Anwendungsbereich auf einem baustellentauglichen Fahrzeug installiert werden.

3 VERSUCHSAUFBAUTEN UND -DURCHFÜHRUNG

Zur Lösung der zugrundeliegenden Aufgabenstellung musste zunächst eine Vorrichtung zur Realisierung der umlaufenden Schweißbewegung der Lseroptik konzipiert werden. Weiterhin sollte die Vorrichtung ausreichend Platz für die Sensorik zur Prozessüberwachung (LWM) und zerstörungsfreien Prüfung bieten. Hierbei stellt die Erarbeitung einer ganzheitlichen Überwachungs- und Prüfstrategie, die direkt nach Beendigung des Schweißens eine Aussage über die erzielte Nahtqualität liefert, den Schwerpunkt der Untersuchungen dar. Die hierzu notwendigen Informationen können vor, während und nach dem Schweißprozess in Form von unterschiedlichen Signalen gewonnen werden. **Bild 1** stellt diese Strategie und die notwendige Signalverarbeitung schematisch dar.

Die Analyse von Unregelmäßigkeiten an laserstrahlgeschweißten Verbindungen zeigt, dass der überwiegende Teil auf Störungen im Prozessablauf zurückzuführen ist. Ursächlich hierfür wiederum ist die Qualität der Stoßvorbereitung hinsichtlich Geometrie (Vorhandensein von Spalt bzw. Kantenversatz) und Sauberkeit.

3.1 Versuchsaufbau zum orbitalen Laserstrahl-schweißen mit integrierter Messung der optischen Prozesswechselwirkungssignale

Im ersten Arbeitsschritt wurde die Gestaltung und der Aufbau einer geeigneten Gerätetechnik zur Umsetzung der Umlaufbewegung der Lseroptik am stehenden Rohr einschließlich der zum Fügen und zur Fixierung der Rohrstöße notwendigen Spanntechnik für das Laserstrahlschweißen an Rohren im Durchmesserbereich DN 80 bis DN 150 mit Wandstärken von 2-5 mm entwickelt. Diese ist im Folgenden mit ihren grundlegenden Komponenten beschrieben.

Die Trägerkonstruktion besteht aus vier ringförmigen Platten, die nach unten hin geöffnet sind, um sie auf die zu fügenden Rohre aufsetzen zu können. Die beiden äußeren Platten werden mit je einem der Rohre über eine Spannvorrichtung verbunden. An ihnen entlang werden die beiden inneren Ringe geführt, so dass diese eine Kreisbewegung um die Rohre ausführen können. Die beiden inneren Ringe sind starr miteinander verbunden. Zwischen diesen Ringen werden alle füge- und prüftechnischen Komponenten angeordnet. In dieses Trägersystem erfolgte im ersten Schritt die Integration einer miniaturisierten Schweißoptik, so dass zum weiteren Aufbau des Prototypen die in **Bild 2** dargestellte Trägerkonstruktion zur Verfügung steht.

Kernstück des Versuchsaufbaus ist eine transmissive Bearbeitungsoptik YW30 der Firma Precitec mit koaxial zum Strahlengang integrierter Sensorik zur photooptischen Erfassung relevanter Emissionen aus dem Laserstrahlschweißprozess. Diese Bearbeitungsoptik ist zur Versuchsdurchführung an das Trägersystem adaptiert worden. Die Gesamtanlage zur Versuchsdurchführung ist in **Bild 3** dargestellt.

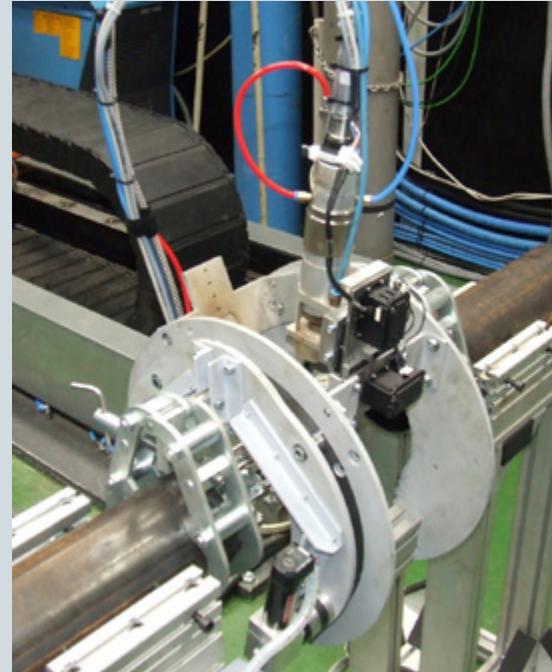


Bild 2: Trägersystem mit eingesetzter Schweißoptik

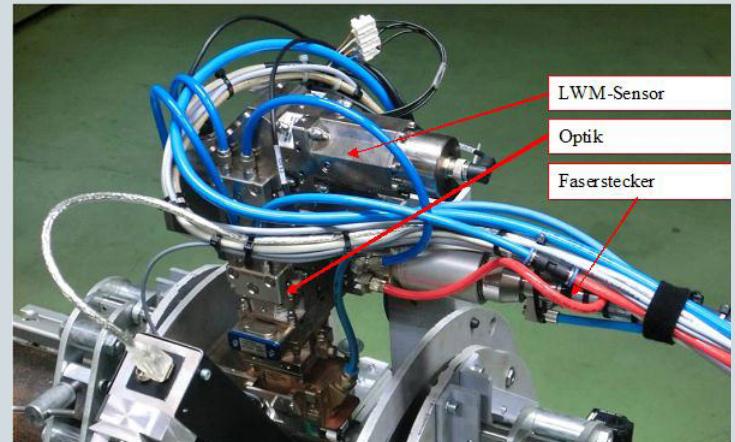


Bild 3: Abgewinkelte Lseroptik mit LWM-Sensor und Faserstecker

Die Aufzeichnung der aus dem Prozess emittierten Strahlung erfolgt mit einem Industrie-PC. Hierbei wird zunächst die optische Strahlung in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen über Photodioden gemessen und in analoge Spannungssignale umgewandelt. Nach einer Verstärkung der Signale findet die Verarbeitung der Messwerte als zeitabhängige Signalverläufe über unterschiedliche Messkanäle des Industrie-PC statt.

3.2 Kamerasytem zur Stoß- und Nahtgeometriemittlung

Für die Erfassung des Schweißstoßes, insbesondere von Kantenversatz und Spalt, wird der von einem Linienlaser erzeugte Strich quer zum Stoß von einer Kamera aufgenommen. Die Kamera und der Linienlaser sind wie die Schweißoptik

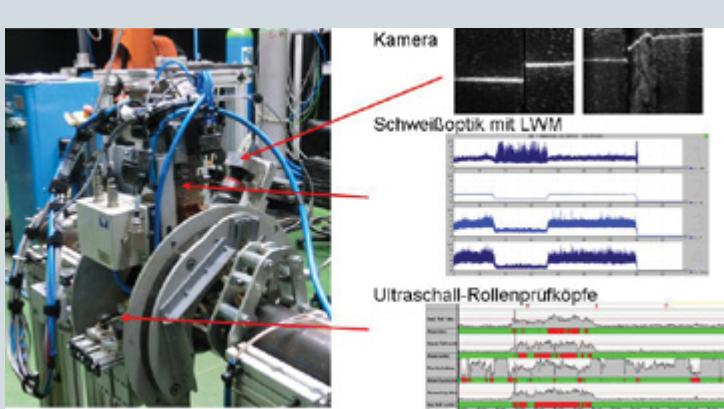


Bild 4: Prototypische Gesamtintegration der Gerätetechnik

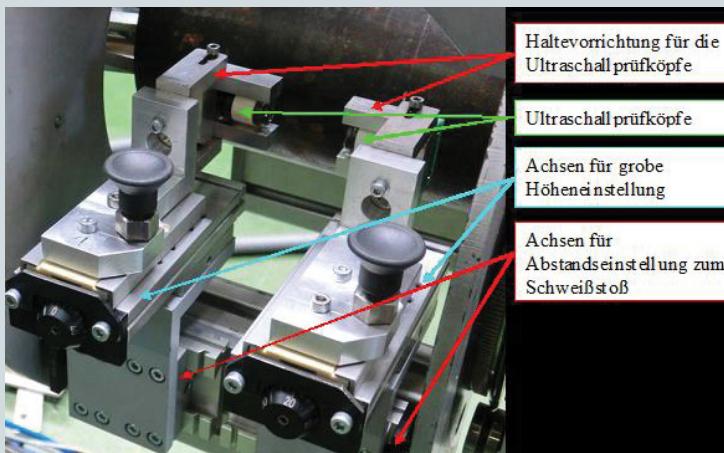


Bild 5: Ultraschallprüfköpfe mit Achsen

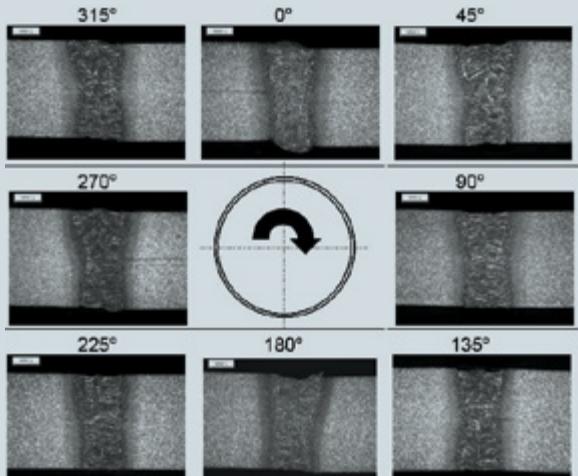


Bild 6: Nahtausbildung in Makroschliffe relativ zum Rohrwinkel

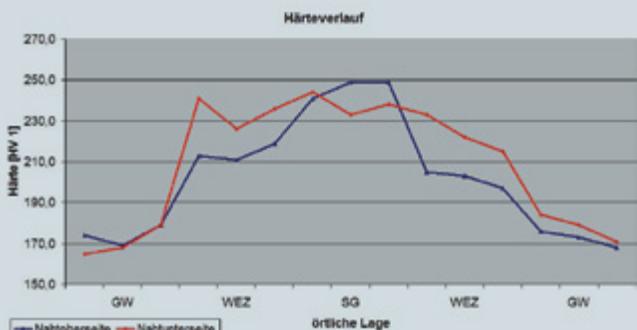


Bild 7: Härteverlauf über die Schweißnaht im Bereich des Rohrwinkels 180 ($t = 5 \text{ mm}$)

zentral zwischen den beiden inneren Platten des Trägersystems angebracht und werden mit der Umlaufbewegung um das Rohr geführt. Im Anschluss an den Schweißprozess wird mit gleicher Kamera die Topografie der Schweißnaht erfasst. Dabei wird auf Spalt und Kantenversatz in der Nahtvorbereitung sowie auf Nahtunregelmäßigkeiten (Unterwölbung oder Überhöhung) und nach außen geöffnete Schweißfehler geachtet. Beispielhafte Aufnahmen zu den überprüften Situationen sind in **Tabelle 1** dargestellt. Die beim Umlauf registrierten Änderungen der Laserlinie können auch zur Positions berechnung sowie zur Höhen- und Seitenregelung der Schweißoptik genutzt werden.

3.3 Versuchsaufbau zur Qualifizierung der Ultraschalltechnik für die Prüfaufgabe

Die bei den Untersuchungen verwendete Ultraschall-Hardware setzt sich zusammen aus dem eigentlichen Ultraschall-Gerät, dem USIP 40 und den Rollenwinkelprüfköpfen. Beim USIP 40 handelt es sich um ein mehrkanaliges Ultraschall-System mit fünf Kanälen, die mit Hilfe eines Multiplexers voneinander getrennt werden. Zusätzlich zu den Prüfköpfen ist es möglich, externe Geräte an das USIP 40 anzuschließen. Dies können z. B. Winkelencoder zur Positionsbestimmung oder Geräte zur Prüfdatenfreigabe sein. Diese können über zwei I/O-Schnittstellen angeschlossen und über eine SYNC-Schnittstelle synchronisiert werden.

Zusätzlich zum USIP 40 werden spezielle Rollenprüfköpfe zur Schrägeinschallung mit einem Winkel von 55° und einer Frequenz von 6 MHz verwendet. Diese Prüfköpfe zeichnen sich dadurch aus, dass die ordnungsgemäße Ankopplung nicht mit Hilfe eines Koppelmittels erfolgt, sondern durch einen Silikonreifen realisiert wird. Auf diesem Reifen wird der Prüfkopf über das Bauteil bewegt, wodurch nur eine Bewegung parallel zur Schweißnaht erfolgen kann.

4 GERÄTECHNISCHE INTEGRATION UND ERPROBUNG

In der finalen Projektphase wurden die entwickelten Einzelsysteme bestehend aus Schweißoptik, der Kamera zur vorlaufenen Stoß- bzw. der Fugenlagedetektion und Prozesskontrolle sowie der Halterung für die Ultraschallprüfköpfe zu einer prototypischen Gesamtlösung zusammengeführt (**Bild 4**).

Zur direkten Beurteilung von inneren Unregelmäßigkeiten werden die zwei Ultraschallprüfköpfe in definiertem Abstand links und rechts der Schweißnaht um das Rohr geführt.

Bild 5 zeigt die Anbringung der Ultraschallprüfköpfe.

Über Federspannung wird der Kontakt der Prüfköpfe zum Rohr gehalten. Für unterschiedliche Rohrdurchmesser ist eine Höheneinstellung möglich.

5 DARSTELLUNG VON ERGEBNISSEN DER WERKSTOFFPRÜFUNG

Im ersten Schritt erfolgte zur Herstellung einer Referenz für die Prozessüberwachung (LWM) und zur Ermittlung der mechanisch-technologischen Kennwerte der laserstrahlgeschweißten Rohrverbindungsnähte eine Versuchsreihe unter idealen Bedingungen der Stoßvorbereitung und ohne pro-

vozierte Fehleinstellungen. Nach Herstellung dieser Referenzprobe wurden in Schritte von 45 ° verteilt am Umfang Schliffproben entnommen. Diese sind bezogen zum jeweiligen Rohrwinkel in **Bild 6** dargestellt.

Wie deutlich sichtbar ist, gibt es für die gewählten Parameter keine Einflüsse aus der sich orbital stets verändernden Schweißposition, was den konstanten Signalpegel des Prozessüberwachungssystems unterstützt. Diese Aussage trifft sowohl auf die Nahtgeometrie hinsichtlich Ober- und Unterseite der Schweißnaht als auch auf das Auftreten innerer Unregelmäßigkeiten zu. Im Ergebnis kann eingeschätzt werden, dass unter den gewählten Bedingungen eine Bewertungsgruppe B nach DIN EN ISO 13919-1 erfüllt wird. In **Bild 7** ist der Härteverlauf für die Schweißposition 180 ° dargestellt.

Die Untersuchungen zur Bestimmung der statischen Nahtfestigkeit und der Zähigkeiten ergeben mit Bezug zum DVGW-Arbeitsblatt GW 350 [3] ebenfalls keine Auffälligkeiten. Die entsprechend im Zugversuch und der Kerbschlagbiegeprüfung (Untermaßproben) ermittelten Werte für den Werkstoff L360MB ($t = 5 \text{ mm}$) sind in **Tabelle 2**, **Tabelle 3** und **Tabelle 4** dargestellt.

5.1 Fehlersimulation zur Erprobung des Zusammenwirkens der Prüf- und Überwachungssysteme

Im folgenden Abschnitt wird durch ein Beispiel das redundante Zusammenwirken der Prüf- und Überwachungssysteme dargestellt. Dazu sind in der Erprobung an definierten Stellen Parameterabweichungen programmiert bzw. Unregelmäßigkeiten in die Stoßvorbereitung eingebracht. Diese werden dann unter Verwendung der Prozessüberwachung (LWM) geschweißt und anschließend durch die integrierte Ultraschalltechnik geprüft. Durch vergleichende Betrachtung der Signale beider Systeme und unter Zuhilfenahme der Aufnahmen der CCD-Kamera lassen sich die erkennbaren Unregelmäßigkeiten zuordnen. Zur Absicherung der Aussagen wurden dann die entsprechenden Bereiche mittels Durchstrahlungsprüfung untersucht.

Alle durch die Durchstrahlungsprüfung nachgewiesenen Unregelmäßigkeiten werden auch durch die Prozessüberwachung und Ultraschallprüfung detektiert. Durch die Auswertung der unterstützend wirkenden Stoß- und Nahtinspektion ist eine lokale Zuordnung der Unregelmäßigkeiten und teilweise auch der Ursachen dieser Unregelmäßigkeiten möglich.

Tabelle 1: Aufnahmen von Stoß- und Nahtprofil bei unterschiedlichen Toleranzsituationen

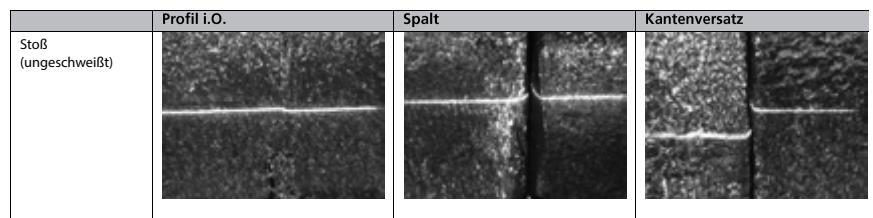


Tabelle 2: Ergebnisse des Kerbschlagbiegeversuchs in der Nahtmitte bei 0 °C – 2 Probensätze

Probenlage	Prüftemperatur	Probenbreite a	Probenhöhe b	Kerbschlagarbeit Av			
				Einzelwerte	Mittelwert	Forderung GW 350 [J]	
Nahtmitte (Schweißgut)	0	3,4	8,0	59	62	27 mind. 20	
		3,4	8,0	75			
		3,4	8,0	53			
		3,4	8,0	79	71		
		3,4	8,0	66			
		3,4	8,0	68			

Tabelle 3: Ergebnisse des Kerbschlagbiegeversuchs in der Wärmeeinflusszone bei 0 °C – 2 Probensätze

Probenlage	Prüftemperatur	Probenbreite a	Probenhöhe b	Kerbschlagarbeit Av			
				Einzelwerte	Mittelwert	Forderung GW 350 [J]	
Wärmeeinflusszone	0	3,4	8,0	63	55	27 mind. 20	
		3,4	8,0	56			
		3,4	8,0	45			
		3,4	8,0	40	41		
		3,4	8,0	42			
		3,4	8,0	41			

Tabelle 4: Ergebnisse des Querzugversuchs

Probe	Streckgrenze $R_{p0,5}$ [MPa]	Zugfestigkeit R_m [MPa]	Bruchdehnung A [%]	Bruch einschnürung Z [%]	Bruchlage
1	448	487	20,1	70	GW
2	418	467	24,5	70	GW
3	416	466	21,6	67	GW
4	413	463	25,8	62	GW

Anmerkung: Mit der Bruchlage im Grundwerkstoff ist die Anforderung des DVGW-(A) GW 350 erfüllt

Tabelle 5: Generierte Messdaten beim Schweißen und Prüfen gemäß InSitu-Prüf- und Überwachungsstrategie am Beispiel einer ungenügenden Durchschweißung und eines partiellen Strahlversatzes quer zum Schweißstoß

LWM				
UT				
Anzeige-Nr.	1	2	3	
Interpretation	linienartige Anzeige; verringerte Laserleistung	linienartige Anzeige, Ursache aus LWM-Signal nicht eindeutig erkennbar	kurze Anzeige UT, keine Anzeige LWM	
CCD-Kamera				
Bewertung	Nahtbreite gering, Kantenversatz; n.i.O.	unverschweißte Kante erkennbar, Fehlpositionierung; n.i.O.	Nahtunterwölbung durch Fehlstelle in der Nahtvorbereitung n.i.O.	

Tabelle 6: Ermittelte Mindestgrößen der detektierbaren Unregelmäßigkeiten durch UT-Prüfung für den untersuchten Wanddickenbereich

Unregelmäßigkeit	Mindestgröße der Detektierbarkeit nach derzeitigem Entwicklungsstand	
	t = 3 mm	t = 5 mm
Poren (200) Porenzeilen (2015)	5 mm x 0,5 mm	5 mm x 0,5 mm
Ungenügende Durchschweißung (402) (Unregelmäßigkeit für Bewertungsgruppe B und C unzulässig)	0,4 mm	0,6 mm
Risse (100) (Unregelmäßigkeit für alle Bewertungsgruppen unzulässig)	0,4 mm	0,4 mm
Kantenversatz (507)	0,8 mm	0,8 mm
Bindefehler (401) (Unregelmäßigkeit für Bewertungsgruppe B und C unzulässig)	0,4 mm	0,4 mm

5.2 Nachweisbare Unregelmäßigkeiten durch das Prüf- und Überwachungssystem

Im Ergebnis der vorgestellten Arbeiten zur Entwicklung einer In-Situ-Prüf- und Überwachungsstrategie zum laserbasierten Rohrschweißen wurden Funktion und Eignung auf Laborebene nachgewiesen. Im Einzelnen bedeutet das, dass die Prüfbarkeit laserstrahlgeschweißter Verbindungen mittels Ultraschalltechnik auch im Bereich von Wanddicken von 3-5 mm für kritische Unregelmäßigkeiten wie Bindefehler, Wurzeldefekte (ungenügende Durchschweißung), Porenzeilen und starke Nahtunterwölbungen in der aktuellen Entwicklungsphase bis zu den in **Tabelle 6** angegebenen Größen der Unregelmäßigkeiten gegeben ist. Einschränkungen müssen für die Detektierbarkeit von Einzelporen gemacht werden, die aufgrund ihrer Geometrie ein sehr schlechtes Reflexionsverhalten gegenüber den Ultraschallwellen aufweisen. In der finalen gerätetechnischen Ausführung wurde gezeigt, dass das Zusammenwirken der Einzelsysteme Kamera, photooptische Prozessüberwachung und Ultraschallprüfung gegeben ist. Dieses wurde in der Fehlersimulationen nachgewiesen. Eine weitere Optimierung der erfassbaren Größen von Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht ist im weiteren Verlauf der Arbeiten vorgesehen.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein Prototyp für das kombinierte Schweißen und Prüfen einer Rohrverbindung im Orbitalverfahren realisiert. Die durch das orbitale Laserstrahlschweißen hergestellten Verbindungen erfüllen hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Kennwerte die Anforderungen des DVGW-Arbeitsblattes GW 350. In dem für den Rohrleitungsbau relevanten Regelwerk sind derzeit weder das hier vorgestellte Schweiß- noch das Prüfverfahren erfasst. Die Anforderungen an die Ultraschallprüfung sind bisher für einen Wanddickenbereich von etwa 6-10 mm beschrieben [3].

Die Optimierung des Prototypen, die Anwendung unter Baustellenbedingungen und die Klärung einer Akzeptanz der Schweiß- und Prüftechniken für die Anwendung in der Gas- und Wasserverteilung sowie in der FernwärmeverSORGUNG werden die nächsten Arbeitsschritte in der Weiterentwicklung der vorgestellten gerätetechnischen Lösung sein.

7 DANKSAGUNG

Die vorgestellten Arbeiten wurden durch das BMWi im Rahmen des Projektes „Entwicklung redundanter In-Situ-Überwachungs- und Prüfstrategien zum laserbasierten Rohrverbindungsschweißen“ (FKZ MF090208) unterstützt. Hierfür sei ausdrücklicher Dank gesagt.

Weiterer Dank gilt den an dem Projekt beteiligten Industriepartnern Salzgitter Mannesmann Line Pipe GmbH; Gelsenwasser AG und der Stadtwerke München Services GmbH für ihre Unterstützung bei der Umsetzung der Untersuchungen.

LITERATUR

- [1] DIN 2460: Stahlrohre und Formstücke für Wasserleitungen; Ausgabe Juni 2006
- [2] DIN 2470-1: Gasleitungen aus Stahlrohren mit zulässigen Betriebsdrücken bis 16 bar; Ausgabe Dezember 1987
- [3] DVGW-Arbeitsblatt GW 350: Schweißverbindungen an Rohrleitungen aus Stahl in der Gas- und Wasserversorgung; Ausgabe Oktober 2006



Halle 3.2., Stand 204

AUTOREN



Dipl.-Ing. (FH) **JAN NEUBERT**
Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH, Halle (Saale)
Tel. +49 345 5246-428
E-Mail: neubert@slv-halle.de



Dr. rer. nat. **HANS-JÜRGEN KOCKS**
Salzgitter Mannesmann Line Pipe GmbH, Siegen
Tel. +49 271 691-170
E-Mail: hans-juergen.kocks@smlp.eu



Dipl.-Ing. **TONY KRÄKER**
Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH, Halle (Saale)
Tel.: +49 345 5246-230
E-Mail: kraeker@slv-halle.de

Pioniere im grabenlosen Leitungsbau seit 1962



Erdraketen · Stahlrohrramen · HHD-Spülbohrtechnik · Berstlining-Technik



Die richtige Verlegeotechnik für alle Rohre



TRACTO-TECHNIK GmbH & Co. KG · Postfach 4020 · D 57356 Lennestadt
Tel.: +49 (0)2723 8080 · Email: vertrieb@tracto-technik.de · www.tracto-technik.de



Wir stellen aus: BAUMA München, 15.-21.4.13, Freigelände FGN.N521/1