

HFI-geschweißte Rohre für Anwendungen im Tiefsttemperaturbereich

Von Holger Brauer, Michael Bick und Frank Meyer

Mannesmann Line Pipe GmbH hat für den Transport von gasförmigen oder flüssigen Medien bei niedrigsten Temperaturen hochanspruchsvolle bainitische Rohre entwickelt, die sich u. a. auch für den Bereich LNG eignen. Neben der Prozessroute der Rohrherstellung werden in diesem Fachbericht sowohl die Eigenschaften des Materials und der Rohre als auch der Rundnähte aufgezeigt. Die FW-FERNWÄRME-TECHNIK GmbH hat diese Rohre für die Konstruktion eines speziellen Mehrfach-Rohrsystems zur Förderung von LNG bei Temperaturen von -162 °C verwendet. Die mehrjährigen Versuche mit flüssigem Stickstoff bei -196 °C werden ebenfalls vorgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass das Tiefsttemperaturmaterial alle Anforderungen zum Transport von LNG erfüllt. Darüber hinaus bietet es Potential, um teure austenitische Stähle für Anwendungen bei Temperaturen bis zu -196 °C zu ersetzen.

Durch einen stetig wachsenden Energiebedarf und gesteigertes Umweltbewusstsein rückt Erdgas als Energiequelle weiter in den Vordergrund. Für den Transport über lange Entfernungen oder zur Versorgung von nicht an ein Pipelinennetz angebundenen Gebieten stellt der Transport von Erdgas im flüssigen Zustand (LNG) die wirtschaftlichste Alternative dar. Grund hierfür ist die Reduktion des Gasvolumens um den Faktor 600 durch die Verflüssigung. Dabei sind für den Transport und die Speicherung von verflüssigtem Erdgas allerdings extrem tiefe Temperaturen von bis zu -196 °C notwendig. Traditionell kommen dafür austenitische Edelstähle zum Einsatz, die auch bei diesen tiefen Temperaturen noch ausreichende Eigenschaften gegen sprödes Versagen aufweisen. Eine Alternative stellen wasservergütete, kaltzähe, Nickel-legierte Stähle dar. Der hohe Legierungsanteil an Nickel um die 9 % sorgt für eine hohe Zähigkeit bei tiefsten Temperaturen und erfüllt somit die Grundvoraussetzung zum sicheren Transport oder zur Speicherung von LNG in Flüssiggasbehältern. So sind beispielsweise die Stähle X7Ni9 (1.5663), X8Ni9 (1.5662) oder auch X12Ni5 (1.5680) bereits aus dem Großbehälterbau für die Speicherung von LNG (**Bild 1**) seit Jahren bekannt [1-3]. Als Beispiel seien die Lieferungen von Blechen der Ilsenburger Grobblech GmbH in diversen Dicken für verschiedene LNG-Projekte genannt. Als Zu- und Ableitungen z. B. zu Transportschiffen an Terminals werden allerdings auch heute noch im Wesentlichen die teuren Edelstähle eingesetzt. Daher hat die Mannesmann Line Pipe GmbH ebenfalls das alternative Materialkonzept der kaltzähen Nickel-Stähle zur Herstellung von Leitungsrohren für den Transport von Medien bei tiefsten Temperaturen eingesetzt. Zur Anwendung kommt dabei das Verfahren des Längsnahtschweißens nach dem Hoch-Frequenz-Induktions-(HFI-)Verfahren. Dieses Schweißverfahren ohne die Notwendigkeit eines Schweißzusatzwerkstoffes ist eine bewährte und anerkannte Methode. Es kommt schon seit Jahrzehnten auch für immer weiter steigende Projektanforderungen an die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Rohres

aufgrund von erschwerten Einsatzbedingungen oder einer beschleunigten Zunahme des Sicherheitsbewusstseins zum Einsatz.

Tabelle 1: Auswahl von gelieferten Mengen von Tiefsttemperaturstahl der Ilsenburger Grobblech GmbH für Onshore-Tanks [1,2]

Land	Menge	Dicke	Lieferjahr
Papua-Neuguinea	3.300 t	5 – 29 mm	2010 – 2011
Australien	3.600 t	5 – 30 mm	2012
Frankreich	6.100 t	5 – 29 mm	2012 - 2013
China	550 t	10 – 40 mm	2013
China	4.900 t	5 – 29 mm	2013
Russland	7.000 t	5 – 25 mm	2014
China	14.100 t	10 – 50 mm	2014/2015
USA	3.100 t	5 – 42 mm	2015
Russland	2.100 t	5 – 28 mm	2016
Deutschland	1.200 t	9 – 25 mm	2017



Bild 1: Onshore LNG-Tanks aus Tiefsttemperaturstahl [1]

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung des X8Ni9 gemäß DIN EN 10028-4 (in wt.-%)

C _{max}	Si _{max}	P _{max}	S _{max}	Mn	Mo _{max}	Ni	V _{max}
0,10	0,35	0,020	0,005	0,30 – 0,80	0,10	8,5 – 10,0	0,05

Stand der Technik

Nach dem HFI-Schweißen bei MLP des vom Vormateriallieferanten Salzgitter Flachstahl GmbH gelieferten warmgewalzten Bandes werden die Rohre der Abmessung 219,1 x 5,0 mm einer speziellen Wärmebehandlung unterzogen, um die gewünschten mechanisch-technologischen Eigenschaften zu erreichen. Bei diesem Vergütungsprozess im kontinuierlichen Durchlaufverfahren erfolgt die Erwärmung des gesamten Rohres induktiv, und ermöglicht so hohe Prozessgeschwindigkeiten von bis zu 2,5 m/min. Im ersten Schritt (Austenitisierung) wird die ferritisch-perlitische Struktur bei 930 °C in Austenit umgewandelt. Danach erfolgt die Härtung mit einer zeitunabhängigen Umwandlung des Austenits in eine martensitische Struktur. Da es sich bei dem verwendeten Werkstoff um einen sogenannten Lufthärter handelt, ist keine beschleunigte Kühlung z. B. über Wasser notwendig. Hierdurch werden gegenüber Wasserabschreckung deutlich weniger Eigenspannungen während des Härteprozesses eingebracht, die sich negativ auf die geometrischen Eigenschaften auswirken können. Da der durch die Gefügeumwandlung erzeugte Martensit zwar eine hohe Festigkeit, aber auch ein recht sprödes Bruchverhalten zeigt, erfolgt als abschließender Wärmebehandlungsschritt eine ebenfalls induktive Anlassbehandlung im Bereich von 600 °C mit nachfolgender Luftabkühlung. Hierdurch wird gegenüber dem martensitischen Zustand eine moderate Verringerung der Festigkeit bei gleichzeitig deutlich gesteigener Zähigkeit erreicht. So lassen sich im Zugversuch bei Raumtemperatur entsprechend hohe mechanische Werte von Streckgrenze (über

550 MPa), Zugfestigkeit (über 740 MPa) und Dehnung (über 20 %) erzielen, die den Vorgaben der DIN EN 10028-4 für den X8Ni9 genügen. Gleichzeitig weist das Rohr selbst bei einer Prüftemperatur von -196 °C im Kerbschlagbiegeversuch noch Zähigkeitswerte von über 70 J im Grundwerkstoff und über 40 J in der HFI-Naht auf [5]. Somit konnte die Eignung des Werkstoffes und der Produktionsrouten für die Herstellung von Rohren für den Transport von Medien bei tiefsten Temperaturen nachgewiesen werden.

Schweißversuche

Zur Durchführung von Langzeittests an einer Versuchsrrohrleitung aus X8Ni9 für den Transport von LNG durch die FW-FERNWÄRME-TECHNIK GmbH müssen die Rohre miteinander verbunden werden. Hierzu werden im Leitungsbau übliche Schweißverfahren mit Zusatzwerkstoffen verwendet. Zur Überprüfung der Eigenschaften der Rundnähte wurden von der FW-FERNWÄRME-TECHNIK Proberundnähte erzeugt und bei der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH geprüft.

Herstellung der Rund-Schweißnähte

Die Herstellung der Rundnähte erfolgt mit dem Wolfram-Inertgas Schweißverfahren (**Bild 2**). Dabei wird der austenitische Schweißzusatzwerkstoff 316S92 (BS2901: Pt2) der Fa. Metrode Welding Consumables (Metrode Products Ltd) verwendet. Die typische chemische Zusammensetzung ist in **Tabelle 3** aufgeführt. Die Naht besteht aus einer Wurzel- und einer Decklage.

Tabelle 3: Maximumwerte der Hauptlegierungselemente des austenitischen Schweißzusatzwerkstoffs 316S92 (in wt.-%)

C	Mn	Si	P	Cr	Ni	Mo	Cu	FN
0,01	1,4	0,5	0,015	18,5	12,8	2,6	0,15	6

FN = Ferrit-Nummer



Bild 2: Herstellung der Rundnaht mittels Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG) bei der FW-FERNWÄRME-TECHNIK GmbH und fertige Rundnaht

Eigenschaften der Rund-Schweißnähte

Die zur mechanisch-technologischen Prüfung vorgesehene Rundnaht wird zunächst in einer zerstörungsfreien Durchstrahlungsprüfung untersucht. Hierbei zeigen sich in der gesamten Naht keine Auffälligkeiten (**Bild 3**).

Im Querschliff lässt sich die typische Mikrostruktur der Naht und wärmebeeinflussten Zone (WEZ) erkennen (**Bild 4**). In der Schweißnaht liegt ein Gussgefüge vor, teilweise angelassen durch die Wiedererwärmung bei der Erzeugung der Decklage. Mit zunehmendem Abstand von Schweißnaht lässt sich in der WEZ nimmt die Korngröße ab. Der „Feinkornbereich“ weist dann noch mal interkritisch (zwischen Austenitend- (Ac3-) und Austenitstart- (Ac1-)Temperatur) und subkritisch (unter Ac1) erwärmte Bereich auf.

Die Härtemessungen an je zwei Proben wurden gemäß DIN EN ISO 15614-1 [6] sowohl im Bereich der Wurzel als auch der Decklage durchgeführt.

Bild 5 zeigt die Messpositionen und die ermittelten Werte. Erwartungsgemäß liegen für beide Schweißlagen die Werte in der Wärmeeinflusszone am höchsten, und in der Schweißnaht am niedrigsten. In jedem Fall liegen aber die Werte weit unter dem nach DIN EN ISO 15614-1 maximal zulässigen Wert von 450 HV10.

Wie anhand der Härtemessungen zu erwarten, wird in der Rundschweißnaht der in der DIN EN 10028-4 für den X8Ni9 geforderte Mindestwert von 680 MPa der Zugfestigkeit R_m nicht erreicht. Sollten höhere Werte benötigt werden, so kann auf einen Nickel-Basis Schweißzusatzwerkstoff gewechselt werden. Hier werden beispielsweise von voestalpine Böhler Welding GmbH zwei verschiedene Typen angeboten, die laut Werkstoffdatenblatt höhere Werte versprechen als der hier verwendete austenitische Werkstoff (**Tabelle 4**). Dafür liegen die Ni-Basis Werkstoffe im Preis jedoch um etwa einen Faktor 2 höher.

Tabelle 4: Mindestfestigkeiten für Ni-Basis Schweißzusatzwerkstoffe der voestalpine Böhler Welding GmbH

Ni-Basis Schweißzusatzwerkstoffe	Mindeststreckgrenze in MPa	Mindestzugfestigkeit in MPa
Boehler NIBAS 625-IG (2.4 x 1000 mm)	540	800
THERMANIT 625 (2.4 x 1000 mm)	460	740

Aus **Bild 7** wird ersichtlich, dass der gemäß DIN EN 10028-4 geforderte Mindestwert der Kerbschlagarbeit von 70 J nur in der Rundschweißnaht bei einer Prüftemperatur von -196 °C knapp nicht erreicht wird. Die Proben wurden quer zur Rundschweißnaht entnommen. Jedoch werden die laut Datenblatt für den austenitischen Werkstoff zugesagten 60 J übertroffen. In der Wärmeeinflusszone und dem Grundwerkstoff liegen die Werte stets auf einem hohen Niveau von über 100 J bis knapp oberhalb 200 J (auf 1/1-Probe hochgerechnet). Sollten höhere Werte benötigt werden, so kann auch hier auf einen der bereits oben genannten Nickel-Basis Schweißzusatzwerkstoffe zurückgegriffen werden. Für diese werden gemäß Datenblatt

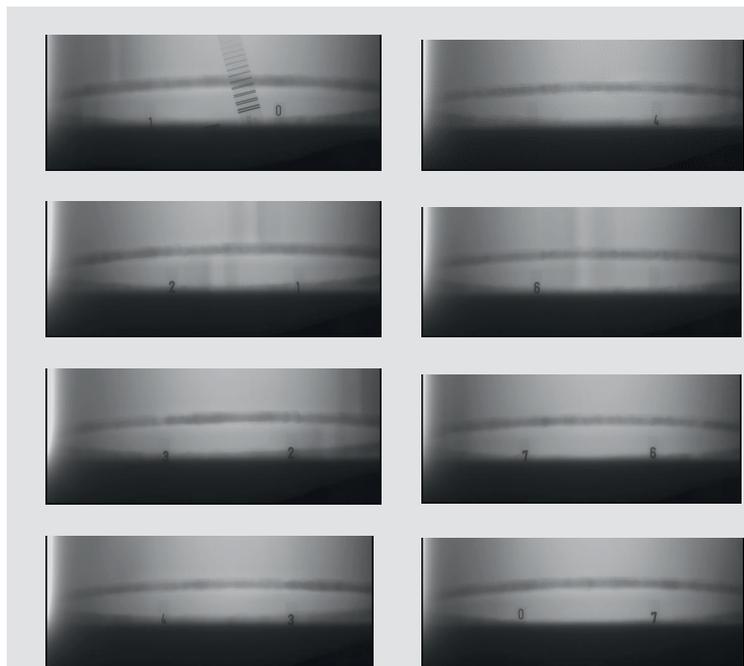


Bild 3: Ergebnisbilder der 360°-Röntgenuntersuchung bei der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH

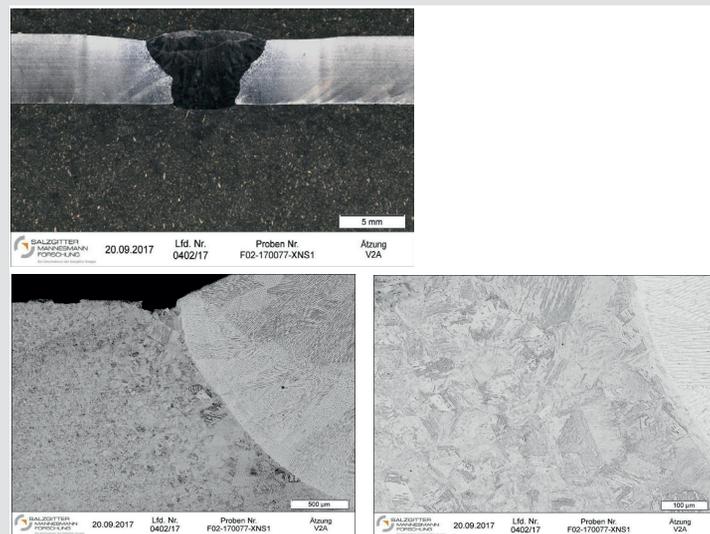


Bild 4: Makro- und Mikrostruktur der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone

Mindestwerte von 100 J bzw. 130 J angegeben (**Tabelle 5**).

Tabelle 5: Mindestkerbschlagarbeit für Ni-Basis Schweißzusatzwerkstoffe der voestalpine Böhler Welding GmbH

Ni-Basis Schweißzusatzwerkstoffe	Mindestkerbschlagarbeit bei -196 °C
Boehler NIBAS 625-IG (2.4 x 1000 mm)	130 J
THERMANIT 625 (2.4 x 1000 mm)	100 J

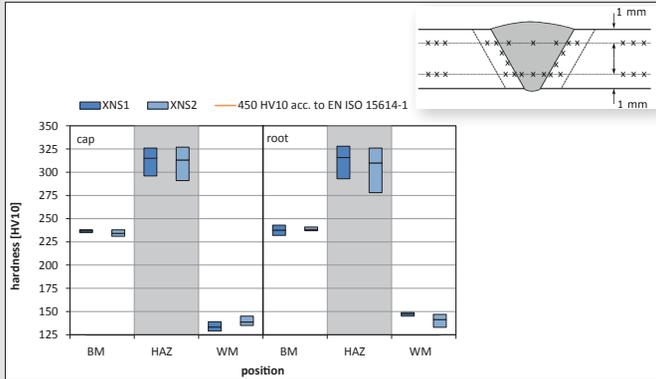


Bild 5: Härtemessungen in der Schweißnaht (SN), Wärmeeinflusszone (WEZ) und im Grundwerkstoff (GW)

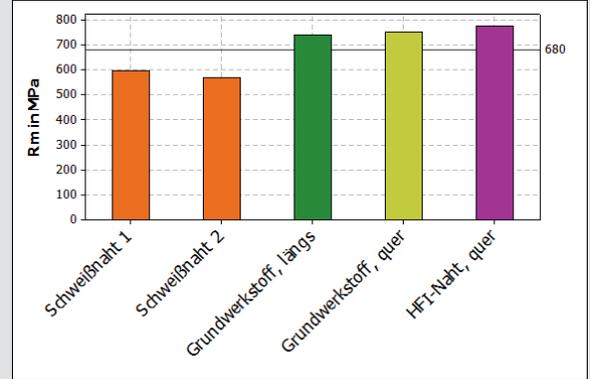


Bild 6: Zugfestigkeit R_m im Zugversuch

Ergänzend werden Dreipunkt-Biegeversuche nach DIN EN ISO 5173 [7] durchgeführt (**Bild 8**). Dabei beträgt der Durchmesser des Biegedorns das 4-fache der Wanddicke. Aufgrund der geringen Wanddicke des Rohres von 5 mm sind hier nicht die üblichen Seitenbiegeversuche möglich. Die Decklage wird im abgearbeiteten Zustand geprüft, die Wurzellage ohne Nachbearbeitung. In beiden Fällen zeigt sich eine plastische Verformung, ohne dass es zu Rissen kommt (**Bild 9**). Durch die geringere Festigkeit in der Schweißnaht gegenüber der Wärmeeinflusszone findet die gesamte Verformung in der Rundschweißnaht statt.

Zusammenfassung und Ausblick

In vorhergehenden Untersuchungen konnten bereits die exzellenten Zähigkeitseigenschaften von HFI-geschweißten Rohren der Mannesmann Line Pipe GmbH aus dem höherfesten Tieftemperaturwerkstoff X8Ni9 selbst bei

-196 °C nachgewiesen werden. Die vorliegende Arbeit dient zur Überprüfung der Eignung des austenitischen Schweißzusatzwerkstoffs 316S92 der Fa. Metrode Welding Consumables zur Herstellung einer Rundnaht an diesen Rohren. Dabei zeigt sich, dass Festigkeit und Zähigkeit in der Rundschweißnaht deutlich unter den Werten der Wärmeeinflusszone und des Grundwerkstoffs liegen. Die mechanisch-technologischen Werte in der Naht erfüllen die Anforderungen der DIN EN 10028-4 für den X8Ni9 nicht. Eine großzügige Verformungsfähigkeit ist jedoch gegeben.

Zum Erreichen der spezifizierten Mindestwerte im Zug- und Kerbschlagbiegeversuch muss auf einen Nickel-Basis-Schweißzusatzwerkstoff zurückgegriffen werden. Am Beispiel von zwei Alternativen der voestalpine Böhler Welding GmbH kann laut Werkstoffdatenblatt gezeigt werden, dass diese Zusatzwerkstoffe die geforderten Werte für den X8Ni9 sowohl im Zugversuch als auch im

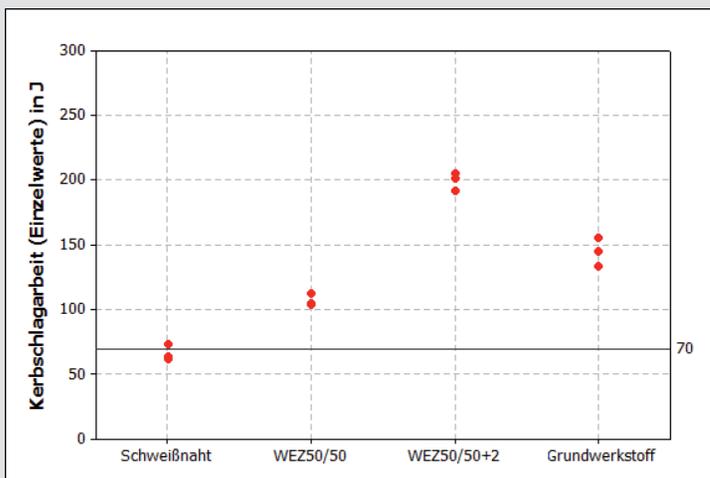


Bild 7: Zähigkeit im Kerbschlagbiegeversuch (Prüftemperatur -196 °C, Mindestwert 70 J gemäß DIN EN 10028-4)

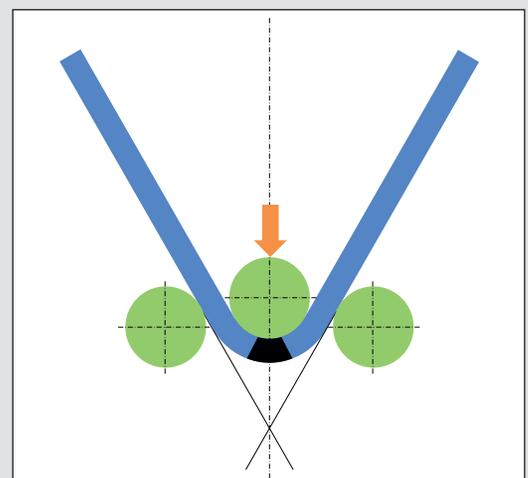


Bild 8: Aufbau der Dreipunkt-Biegeversuche nach DIN EN ISO 5173 (schematisch)

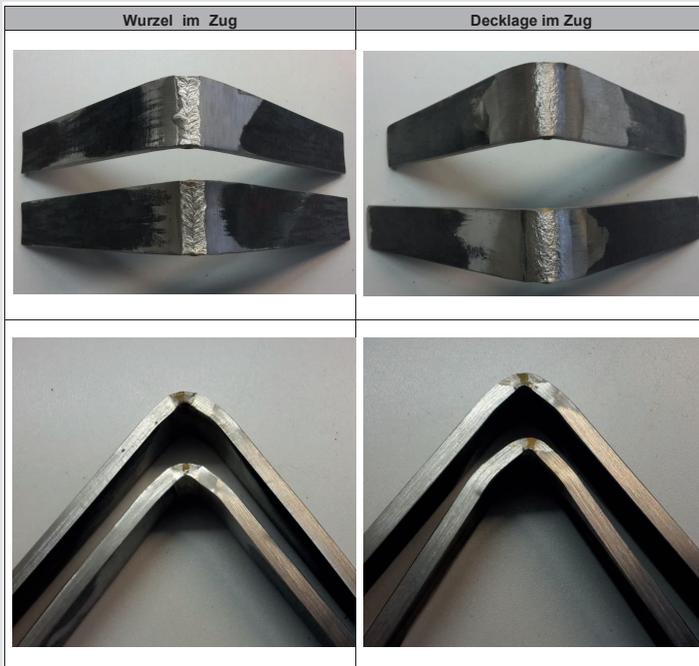


Bild 9: Proben nach den Dreipunkt-Biegeversuchen

Kerbschlagbiegeversuch bei -196 °C deutlich überschritten werden. In Kauf genommen werden muss hier jedoch der um einen Faktor 2 höhere Preis als beim untersuchten austenitischen Schweißzusatzwerkstoff. Qualifizierungsversuche, wie die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellten Untersuchungen, sollen im nächsten Schritt an einer Rundnaht aus einem der Ni-Basis-Werkstoffe an den Rohren aus X8Ni9 durchgeführt werden. Abschließend danken wir unserem Partner der FW-FERNWÄRME-Technik GmbH für die Erstellung der Rundnähte und der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH für die Durchführung der Qualifizierungsversuche.

Literatur

- [1] Steel Grades for Cryogenic Applications – Nickel Alloyed Plates. Prospekt der Ilsenburger Grobblech GmbH (2013), www.ilsenburger-grobblech.de
- [2] <https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/produkte/grobblech/druckbehaelterstahl/ni-steel/produktseite-ni-steel.html> (09.11.2017)
- [3] Saitoh, N.; Yamaba, R.; Muraoka, H.; Saeki, O.: Development of Heavy 9% Nickel Steel Plates with Superior Low-Temperature Toughness for LNG Storage Tanks. Nippon Steel Technical Report 58 (1993)
- [4] DIN EN 10028-4: Flat products made of steels for pressure purposes - Part 4: Nickel alloy steels with specified low temperature properties
- [5] Brauer, H.; Veit, M.; Harder, V.; Grube, L.; Meyer, F.: HFI geschweißte Stahlrohre für Tieftemperatur-Rohrleitungen. 3R 6 (2016), S. 80/7
- [6] DIN EN ISO 15614-1: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test -

Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys

- [7] DIN EN ISO 5173 (2017-05): Destructive tests on welds in metallic materials - Bend tests

SCHLAGWÖRTER: Tieftemperatureinsatz, LNG, Innovation, HFI

AUTOREN



Dr. **HOLGER BRAUER**

Mannesmann Line Pipe GmbH, Siegen
Tel. +49 2381 420-447
holger.brauer@mannesmann.com
www.mannesmann-linepipe.com



MICHAEL BICK

Mannesmann Line Pipe GmbH, Siegen
Tel. +49 271 691-456
michael.bick@mannesmann.com
www.mannesmann-linepipe.com



FRANK MEYER

FW-FERNWÄRME-TECHNIK GmbH, Celle
Tel. +49 5141 888-880
info@fw-gmbh.de
www.fw-gmbh.de

VdTÜV-Merkblatt 1060 – Stresstest 2.0

Überarbeitung der Richtlinien für die Durchführung von Stresstests

Von Guntram Schnotz und Christian Engel

Das VdTÜV-Merkblatt Rohrleitungen 1060 „Richtlinien für die Durchführung von Stresstests“ beschreibt die Methodik für eine umfassende Integritätsprüfung von Rohrleitungen. Das Ziel dieser Wasserdruckprüfung geht über die – sonst übliche – Feststellung von Festigkeit und Dichtheit weit hinaus. Mit dem Stresstest soll nicht nur der sichere Zustand und die sachgemäße Herstellung der Rohrleitung eindeutig bestätigt, sondern auch eine Aussage über den tatsächlich erreichten Sicherheitsbeiwert ermöglicht werden.

Mit aus diesem Grund zählt der Stresstest zu den grundsätzlichen Maßnahmen bei der Verlegung von Rohrleitungen in Gebieten mit besonderem Schutzbedürfnis. Der Stresstest verbindet die Prüfung der Rohrleitung auf Festigkeit und Dichtheit mit weiteren Vorteilen. Ein erfolgreicher Stresstest ermöglicht eine Verbesserung des Rohrleitungszustandes insgesamt, z. B. werden durch geringe plastische Verformungen Eigenspannungen und Unrundheiten aus der Herstellung und Verlegung abgebaut. Erreicht wird dies durch eine Wasserdruckbelastung über den elastischen Bereich hinaus. Das Prinzip der Prüfung mit erhöhtem Prüfüberdruck ist seit langem bekannt, es ist besonders gut für einfache Geometrien wie z. B. Rohr-

leitungen geeignet. Beim Übergang in den plastischen Bereich erfolgt eine Verfestigung der zuerst verformten Bereiche. Wiederholte Druckentlastungen und Wiederbelastungen resultieren in einem Trainingseffekt für die Rohrleitung.

Der kontrollierte Übergang von der elastischen zur plastischen Verformung stellt in der realen Durchführung eine Herausforderung für die Messtechnik und die beteiligten Experten dar. Die Bandbreite der Materialeigenschaften, der realen Geometrien, Einflüsse der Trasse und der Verlegung sowie der Baustellenbedingungen sorgen für Abweichungen vom gleichförmigen Idealzustand.

Hier setzt das VdTÜV-Merkblatt 1060 Stresstest an, das die Methodik des Stresstests beschreibt. Mit passender Messtechnik und gewissenhafter Durchführung wird die Druckaufgabe über die Streckgrenze hinaus beherrschbar. Bei der aktuellen Überarbeitung sollte nicht nur die technische Entwicklung berücksichtigt, sondern auch die Lesbarkeit und die Eindeutigkeit des Merkblatts verbessert werden.

Überarbeitungsbedarf wurde u. a. für die folgenden Abschnitte gesehen:

- » Schrittweiten bei der Druckbelastung
- » Abbruchkriterien
- » Berechnung des maximalen Prüfdrucks
- » Anlage 1 Dehnungswerte (Werkstoffentwicklung!).

Unter Federführung des VdTÜV wurden mit Beteiligung von Vertretern von TÜV NORD (Leitung der Arbeitsgruppe), TÜV Süd, TÜV Hessen und TÜV Rheinland sowie des DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn), des SZMF (Salzgitter Mannesmann Forschung) und der BASF Werkstofftechnik die Richtlinien für die Durchführung des Stresstests neu bearbeitet und einvernehmlich beschlossen. Mit diesem Teilnehmerkreis sind Hersteller, Betreiber und Sachverständigenorganisationen angemessen vertreten. Die Herausgabe der neuen Fassung des VdTÜV-Merkblatts wird in Kürze durch den VdTÜV erfolgen.

Allgemeines

Wichtigste technische Änderung ist die Bezugnahme auf die realen Werkstoffkennwerte und Wanddicken der verwendeten Rohre. Die Ziele des Stresstests sind qualitativ



Bild 1: Die Druckwaage für den Stresstest – robust, zuverlässig und genau