

HFI-geschweißte Stahlrohre für Tieftemperatur-Rohrleitungen

Holger Brauer, Manfred Veit, Volkward Harders, Lutz Grube, Frank Meyer

Ungeachtet des steigenden Energiebedarfs durch eine wachsende Industrialisierung der Gesellschaft ist die weltweite Reduzierung der ausgestoßenen Treibhausgase in den nächsten Jahren und Jahrzehnten eine allgemein anerkannte absolute Notwendigkeit. Zusätzlich erschwert wird dies durch einen Rückgang der klassischen Energiereserven, des globalen wirtschaftlichen Stockens der Konjunktur, sowie Marktinstabilitäten. Um diese Herausforderung zu meistern, bietet die Industrie verschiedenste Lösungen, von fortschrittlichen Technologien mit höherer Effizienz, wie z. B. wasserstoffbasierte Energieversorgung und Brennstoffzellen, bis hin zu alternativen, neuen oder erneuerbaren Energiequellen wie Solar-, Wind- oder Wellenenergie. Um jedoch die fossilen Energieträger wie Öl durch alternative Konzepte zu ersetzen, bedarf es des Einsatzes von hohen Investitionskosten, um die neuen Konzepte zu installieren. Die Nutzung von Liquefied Natural Gas (LNG) wird mittlerweile als eine der besten Lösungen für die Übergangsphase hin zu wirtschaftlichen und zuverlässigen erneuerbaren Energien in vielen Bereichen akzeptiert und favorisiert. SALZGITTER MANNESMANN LINE PIPE hat für den Transport von gasförmigen oder flüssigen Medien bei niedrigsten Temperaturen hoch anspruchsvolle bainitische Rohre entwickelt, die sich auch für den Bereich LNG eignen. Im ersten Teil des Fachberichts werden sowohl die Prozessroute der Rohrerstellung als auch die Eigenschaften des Materials und der Rohre kurz aufgezeigt. Die FW FERNWÄRME-TECHNIK hat diese Rohre für die Konstruktion eines speziellen Mehrfach-Rohrsystems zur Förderung von LNG bei Temperaturen von -162 °C verwendet. Die dreijährigen Versuche mit LNG werden im zweiten Teil vorgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass das Tieftemperaturmaterial alle Anforderungen zum Transport von LNG erfüllt. Darüber hinaus bietet es Potential, um die teuren austenitischen Stähle für Anwendungen bei Temperaturen bis zu -196 °C zu ersetzen.

Das Klima ändert sich! Glücklicherweise nimmt mit der Zunahme der Heftigkeit der extremen Wetterbedingungen auch die Akzeptanz der Reduzierung von Treibhausgasen zu. Dies löst weltweit Gedanken, Pläne und Aktivitäten aus, um den Energieverbrauch zu minimieren, Treibhausgase zu reduzieren und eine kurz-, mittel- und vor allem langfristige „Energieevolution“ zu beginnen. Als eines von vielen Beispielen zur näheren Zukunft kann der Verzicht auf Kernkraftwerke in Deutschland genannt werden, gesetzlich verboten ab 2020 durch eine Entscheidung der Bundesregierung. Gleichzeitig wurde das Ziel ausgegeben, bis zum Jahr 2020 den CO₂-Ausstoß um 40 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Langfristige Ziele bis 2050 sind die Halbierung des Primärenergie-Verbrauchs, die Reduzierung des elektrischen Energieverbrauchs um 25 % (gegenüber 2008), eine Einsparung von Treibhausgas-Emissionen um 80 % (verglichen mit 1990) und ein Anteil von 60 % an regenerativen Energien [1].

Eines der genannten Szenarien zur Erfüllung der Ziele beschäftigt sich mit der Mobilität der Zukunft und der Entwicklung von Technologien ohne Schadstoffausstoß wie reine Elektro- oder Brennstoffzellenfahrzeuge auf Wasserstoffbasis. Wichtig ist in dem Zusammenhang natürlich die Erzeugung der Energie aus alternativen Energiequellen wie Wind, Sonne oder Wellen. Jedoch ist es ein weiter Weg diese Technologien dem Großteil der Bevölkerung zugänglich zu machen und zu etablieren, und nicht selten werden

Zeithorizonte von 20 Jahren und mehr diskutiert. Um daher schon jetzt mit der Reduzierung des CO₂-Ausstoßes und der Verlangsamung der globalen Erwärmung der Atmosphäre und, noch viel schlimmer, der Meere zu beginnen, ist es unumgänglich kurzfristige Verbesserungen basierend auf bekannten Technologien zu nutzen.

In dem Kontext aller Mobilitätssektoren ist die Nutzung von Erdgas eine der vielversprechenden Technologien. Ein Vorteil dieser Energiequelle ist z. B. die Verringerung der CO₂-Emission im Vergleich zur Verbrennung von Dieselmotoren. Bei der Nutzung der Erdgastechnologie wird so gut wie kein Ruß, Feinstaub oder Schwefeloxide freigesetzt, und sogar der lokale Ausstoß von Stickoxiden wird um 80 bis 90 % reduziert, ohne eine nennenswerte Einbuße in der mobilen Reichweite [2]. Zusätzlich ergibt sich eine bessere Energieeffizienz entlang der Wertschöpfungskette gegenüber Öl-basierten Technologien, und mit der Nutzung von erneuerbar erzeugtem Methan kann der Carbon Footprint weiter verbessert werden [3].

Bisher werden mehr als 90 % des Erdgases als Gas über Rohrleitungen zu Stromerzeugern, Industrie und Haushalten transportiert. Zur Erhöhung der Transporteffizienz kann Erdgas durch Abkühlung auf -162 °C zu Liquefied Natural Gas (LNG) verflüssigt werden, was sein Volumen um den Faktor 600 reduziert. Im letzten Jahrzehnt erzielte der LNG-Bereich die höchste Wachstumsrate im Energiesektor, und der Bedarf steigt weiter. Die Technologie als solche ist seit

langem bekannt und allgemein hin akzeptiert und etabliert als umweltfreundliche Energiequelle der „nächsten Generation“. Einer der Hauptvorteile ist einerseits, dass es einfach von „isolierten“ und/oder abgelegenen Förderstätten eingesammelt und genauso gut auch zu entsprechenden „Inselbedarfstätten“ transportiert werden kann. Andererseits ist ein Transport größerer Mengen über Rohrleitungen ebenfalls möglich. Das Erdgas kann aus fossilen Quellen gewonnen, oder mittels erneuerbaren Energien z. B. über Power-to-Gas und Re-Methanisierung erzeugt werden. In den letzten Jahren ist der Markt für LNG doppelt so stark gewachsen wie für Rohrleitungsgas [3]. Wird der weltweit zurzeit fortschreitende Kapazitätsanstieg der Verflüssigung von Erdgas (derzeit 390 Mrd. m³/Jahr) hochgerechnet, so ist mit einer fast Verdoppelung in den nächsten zehn Jahren zu rechnen [z. B. 4]. Die größte Menge an LNG wird für den Export verwendet werden, da die Entdeckung neuer Speichervorkommen beispielsweise in Afrika (Tansania und Mosambik) Potentiale von geschätzten 4.000 Mrd. m³ versprechen. Der Hauptabsatzmarkt ist und wird aus heutiger Sicht wohl auch Asien bleiben. Die Nutzung von LNG ist mittlerweile als sichere Energiequelle anerkannt, da es als Gas nur innerhalb enger Grenzen entzündlich und entflammbar ist. Weiterhin hat die Industrie, zusammen mit der Regierung und den Behörden, von Anfang an erfolgreich die höchsten Sicherheitsstandards eingeführt. Und die Beispiele aus den USA, China und den Niederlanden beweisen die Eignung von LNG als

Treibstoff im Mobilitätssektor. Beispielsweise werden in China seit der Einführung von LNG-betriebenen LKWs im Jahre 2009 mittlerweile mehr als 200.000 Kraftfahrzeuge mit LNG als Treibstoff verwendet. In den USA unterstützen die preislichen Vorteile im Vergleich zum Diesel das Marktwachstum von LNG. Auch in den Niederlanden gibt es von Politik und Industrie gemeinsame Anstrengungen LNG als Energieträger für Kraftfahrzeuge großflächig auszubreiten. Aber ebenfalls in anderen Ländern wie Spanien, Großbritannien und Norwegen stehen kleine LNG-Lösungen für den Markt zur Verfügung [3].

HFI-geschweißte Rohre

Herkömmliche niedriglegierte ferritisch-perlitische Leitungsröhre kommen für den Transport von LNG nicht in Frage, da diese eine nicht ausreichende Zähigkeit bei den entsprechenden tiefen Einsatztemperaturen aufweisen. Gleichzeitig verbieten die hohen Kosten und die Verfügbarkeit einen Einsatz von reinen hochzähen austenitischen Edelstählen für große Leitungslängen. SALZGITTER MANNESMANN LINE PIPE GmbH (MLP) hat daher ein alternatives Materialkonzept eingesetzt, das die Produktion von längsnahtgeschweißten Rohren nach dem Hoch-Frequenz-Induktions- (HFI-) Verfahren und den Einsatz bei den geforderten tiefen Temperaturen ermöglicht. Dieses Schweißverfahren ohne die Notwendigkeit eines Schweiß-Zusatzwerkstoffes ist eine bewährte und anerkannte Methode, auch für immer weiter steigende Projektanforderungen an die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Rohres aufgrund von erschwerten Einsatzbedingungen oder einer beschleunigten Zunahme des Sicherheitsbewusstseins.

Mehr als ein Drittel der weltweiten jährlichen Rohrproduktion von niedrig-legierten Stählen erfolgt längsnahtgeschweißt über das elektrische Hoch-Frequenz Widerstandspressschweißverfahren (HF-ERW). Die Ursache hierfür liegt in der hohen Schweißgeschwindigkeit und der gleichmäßigen Genauigkeit von Durchmesser, Wanddicke und Geradheit der Rohre. Eine detaillierte Beschreibung des Produktionsablaufes von HFI-geschweißten Rohren ist beispielsweise in [5] gegeben. Bei MLP reichen die verfügbaren Stahlgüten für HFI-Leitungsröhre bis API 5L – X80M [6] und Casingrohre bis API 5 CT – N80/L80/P110 [7], mit Außendurchmessern von bis zu 24“ (610 mm) und Rohrwanddicken bis 1“ (25,4 mm).

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des X8Ni9 gemäß DIN EN 10028-4 (in wt.-%)

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



Bild 1: Rohrproduktion mittels HFI-Schweißprozess

Produktion von Tieftemperatur-Rohren

MLP hat eine für den Transport von LNG optimierte Güte eines warmgewalzten Bandes in engster Zusammenarbeit mit seinem Vormateriallieferanten Salzgitter Mannesmann Flachstahl GmbH entwickelt. Das Material erfüllt die Standards ASTM A333 [8] und DIN EN 10028-4 [9], mit einer chemischen Zusammensetzung gemäß X8Ni9 (1.5662) (Tabelle 1). Dieser Typ eines 9-%igen Nickelstahls ist bereits aus der Herstellung von Dickwandblechen für LNG-Tanks [z. B. 10, 11] und SAW-Rohren zur Verwendung als Tieftemperatur-Transportleitung



Bild 2: Induktionsspulen für die Austenitisierung



Bild 3: Rohr während des Anlassens

bekannt [12]. Das Warmbreitband wurde in der Abmessung 5,0 x 1.410 mm hergestellt, und anschließend zu HFI-geschweißten Röhren mit einem Außendurchmesser von 219,1 mm und einer Wanddicke von 5,0 mm (**Bild 1**) verarbeitet. Um die gewünschten mechanisch-technologischen Eigenschaften zu erreichen, folgte anschließend eine Vergütung über induktive Erwärmung. Bei dieser wird die ferritisch-perlitische Struktur zunächst während der Austenitisierung bei 930 °C (**Bild 2**) in Austenit umgewandelt. Anschließend 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. Dies hat auch den Vorteil, dass deutlich weniger Eigenspannungen während des Härteprozesses eingebracht werden, die sich negativ auf die geometrischen Eigenschaften auswirken können. Da durch die Gefügeumwandlung in Martensit ein hohes Maß an Versprödung erzeugt wird, erfolgt als abschließen-

der Wärmebehandlungsschritt eine ebenfalls induktive Anlassbehandlung bei 620 °C (**Bild 3**) mit nachfolgender Luftabkühlung. Dies bewirkt gegenüber dem martensitischen Zustand eine moderate Verringerung der Festigkeit bei gleichzeitig deutlich gesteigener Zähigkeit. Ein Beispiel der so erzielten Gefügestruktur von angelassenem Martensit/Bainit zeigt **Bild 4** für den Grundwerkstoff und **Bild 5** für den HFI-Schweißnahtbereich.

Nach der Wärmebehandlung erfüllten die Werte im Zugversuch die spezifizierten Vorgaben (**Tabelle 2**). Die Zähigkeit in Kerbschlagbiegeversuchen mit Charpy-Proben bei -80 °C, -100 °C und -196 °C sind in **Bild 6** gezeigt. Ein signifikanter Unterschied zwischen den in Längs- und Querrichtung orientierten Proben im Grundwerkstoff ist nicht zu erkennen. Auch bei -196 °C liegen die Werte noch weit über dem unteren Grenzwert von 40 J im Grundmaterial. In der HFI-Naht liegen die Werte niedriger als im Grundwerkstoff, aber immer noch über dem Mindestwert. Da die Röhre alle Vorgaben erfüllten, konnten diese in einem Prototypprojekt eingesetzt werden.

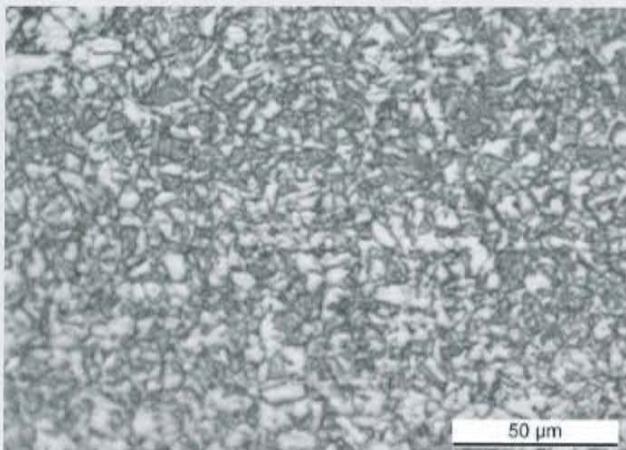


Bild 4: Mikrostruktur des Grundwerkstoffs nach der Vergütung

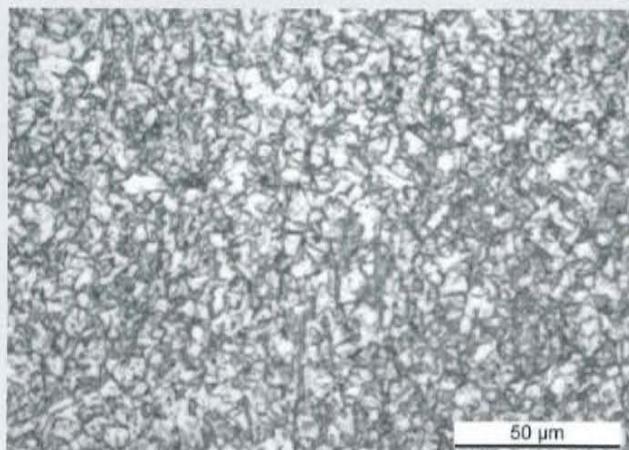


Bild 5: Mikrostruktur des HFI-Schweißnahtbereichs nach der Vergütung

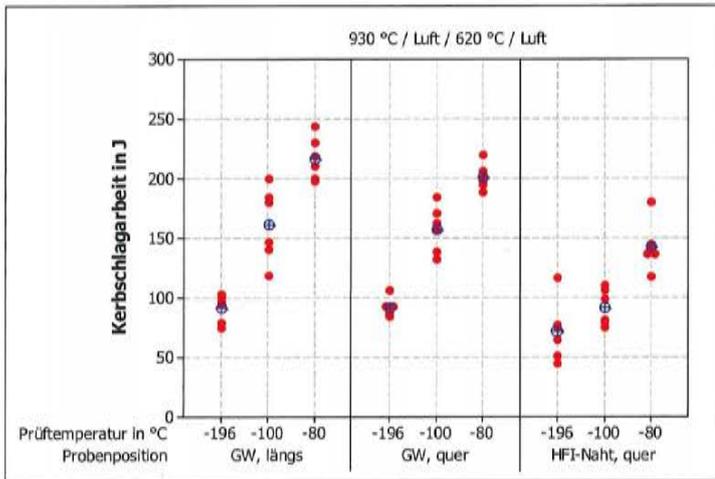


Tabelle 2: Beispielhafte Eigenschaften im Zugversuch im vergüteten Zustand

Probenposition	R _{10,2} in MPa	R _m in MPa	A5 in %
Vorgabe	≥ 490	640-840	≥ 18
Grundwerkstoff, quer	574	751	21,8
Grundwerkstoff, längs	603	740	24,2
HFI-Naht, quer		776	

Bild 6: Kerbschlagarbeiten (Charpy V-Kerb, Vollproben) nach der Vergütung als Funktion der Prüf­temperatur und Probenposition (GW = Grundwerkstoff)

Spezielles Mehrfach-Rohr-System für die Beförderung von LNG

Das FW-KAMMER-PIPE ist ein von der FW-FERNWÄRME-TECHNIK GmbH entwickeltes Mehrfachrohr-System für den sicheren Untergrundtransport von LNG, Rohöl und umweltschädlichen Flüssigkeiten.

Ein dreifaches Kammer-Rohrsystem für den Transport von Flüssigkeiten im Bereich kryogener Temperaturen sollte folgende Eigenschaften aufweisen:

- » Vermeidung von thermischen Brücken und geringstem Wärmeübertrag in die Flüssigkeit
- » Weitestgehender Ausgleich der kalteinduzierten Verkürzungen
- » Passiver Schutz gegen Korrosion des äußeren Rohres im Erdreich

- » Im Falle einer Leckage des inneren oder äußeren Rohres: Aufrechterhaltung des Betriebes während der Reparatur
 - » Permanentes Vakuum (über 30 Jahre) in der Zwischenkammer
 - » Kostensenkung durch den Einsatz eines Feinkornbaustahls für das Außenrohr
- Pilotversuche zur Herstellung, Montage und Betrieb eines Dreifachsystems wurden im Rahmen eines EFRE-geförderten Projektes durchgeführt [13].

Technische Grundlagen des Dreifach-Rohrsystems

Das FW-KAMMER-ROHR besteht aus einem inneren Rohr mit durchgehender Wärmedämmung, einem Kammerpipe und einem einhüllenden Rohr (**Bild 7**). In der Kammer wird

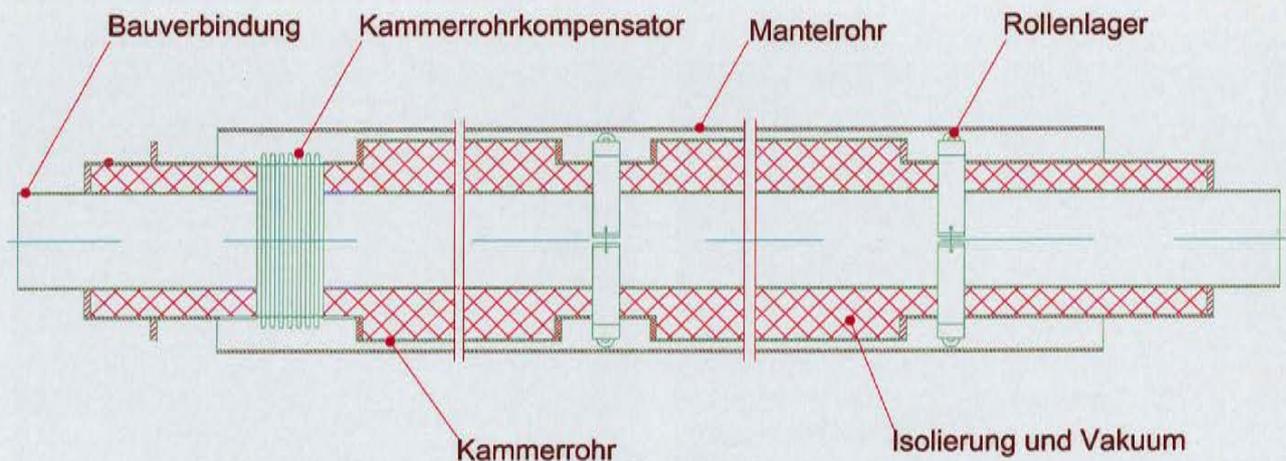


Bild 7: Aufbau eines FW-KAMMER-ROHRS

ein dauerhaftes Vakuum erzeugt, das innere Rohr ist mit einer qualitativ hochwertigen kältebeständigen Isolierung gedämmt.

Für das innere Rohr wurden Rohre der MLP aus dem Material X8Ni9 verwendet. Das Kammerrohr ist aus dem Werkstoff 1.4301/1.4307 gefertigt, das Außenrohr aus einem herkömmlichen Material der Güte P355NL, mit einer äußeren Korrosionsbeschichtung aus Polyethylen.

Das FW-KAMMER-ROHR hat auf Grund des im Betrieb entstehenden Temperaturprofils und der unterschiedlichen Materialien für das Innenrohr (Temperaturen von -196 °C), das Kammerrohr (-17 °C bis 5 °C) und das äußere Hüllrohr (3 bis 8 °C) unterschiedliche Längenänderungen (**Bild 8, Bild 9**). Würde das FW-KAMMER-PIPE aus demselben Material hergestellt werden, so wäre der Unterschied der Kontraktion während des Betriebes zwischen Kammerrohr und Innenrohr sehr hoch. Dies könnte zu großen internen Spannungen im Rohrmaterial führen, die unter Umständen sogar die maximal zulässige Design-Spannung überschreitet. Vorteil des X8Ni9 auf der einen Seite ist die Anwendbarkeit bei tiefen Temperaturen wie -196 °C, sowie die höhere Festigkeit gegenüber herkömmlichem Edelstahl. Auf der anderen Seite zeigt der X8Ni9 eine geringere Längenänderung aufgrund seines geringeren Ausdehnungskoeffizienten im Vergleich zu einem Material wie dem 1.4301 / 1.4307.

Versuchsleitung des Dreifachsystems zum Transport von LNG

Die Versuchsrohrleitung in Dreifachrohr-Ausführung für den Transport von LNG hat eine Gesamtlänge von 48,5 m. In **Tabelle 3** sind die Abmessungen und Werkstoffe der verwendeten Rohre aufgeführt.

Ein Teil der Versuchsleitung des FW-KAMMER-ROHRS wurde außerhalb der Versuchshalle eingerdet. Der andere Teil befand sich oberirdisch innerhalb der Halle. Alle wichtigen Standardbauteile, wie z. B. Lager, Festpunkte, Endverschlüsse, die für Stahlmantelrohrleitungen verwendet werden, waren in der Versuchsleitung in Baueinheiten integriert. Der exakte Aufbauplan der Leitung ist in (**Bild 10**) dargestellt. Die Befüllung der Leitung wurde über einen Speicherbehälter realisiert, der wiederum durch einen LN2-LKW nachgefüllt

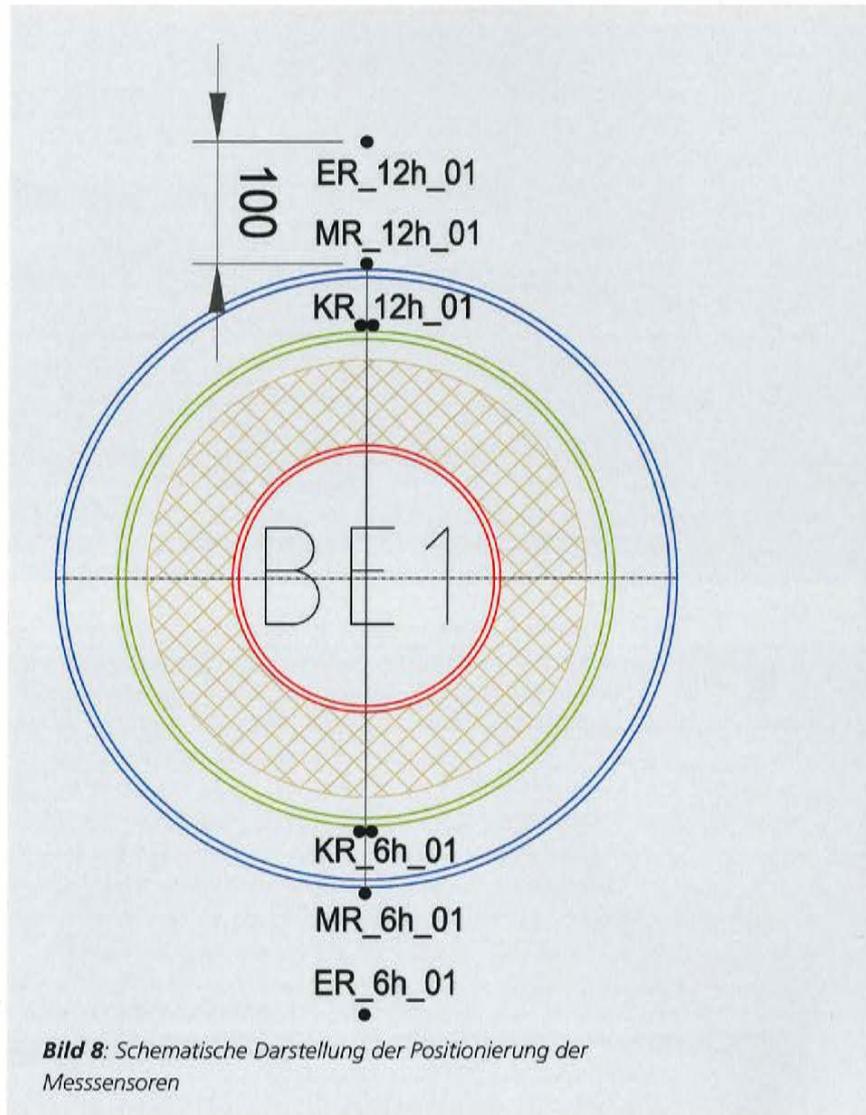


Bild 8: Schematische Darstellung der Positionierung der Messsensoren

werden konnte.

Projektumsetzung

Für die Entwicklung des FW-KAMMER-ROHRS bis zur Eignung zur Serienproduktion ist ein Nachweis der Eignung eines jeden Herstellungsschrittes und des regulären Betriebes notwendig. Daher wurde die Leitung nach den

Tabelle 3: Rohrabmessungen und Daten der Prototyp-Versuchsleitung

	Nenndurchmesser	Durchmesser	Wanddicke	Material	Beschichtung
Innenrohr IR	DN 200	219,1 mm	5 mm	X8Ni9	-
Distanzrohr DR	DN 300	323,9 mm	5 mm	1.4301	-
Kammer-Rohr KR	DN 400	406,4 mm	6,3 mm	1.4307	-
Hüllrohr MR	DN 500	508 mm	6,3 mm	P355NL2	PE-N-n
	DN 600	610 mm	8 mm	P355NL2	PE-N-n

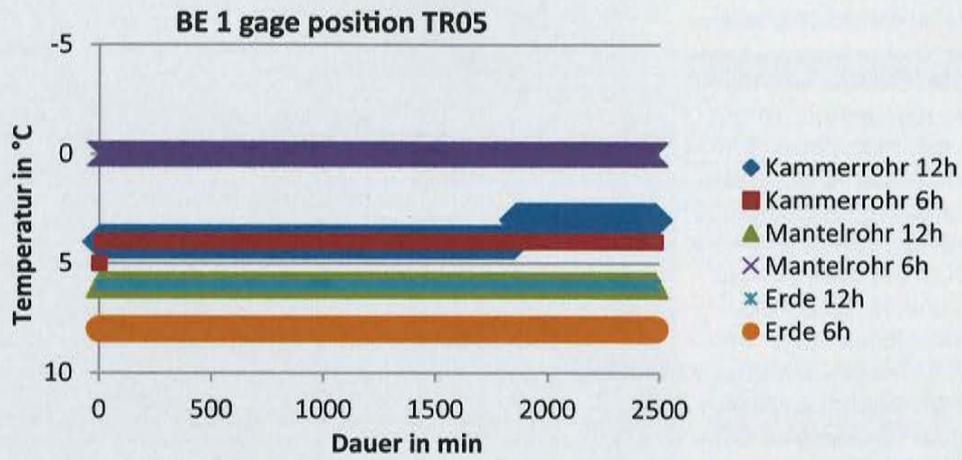


Bild 9: Beispielmessung für den Temperaturverlauf

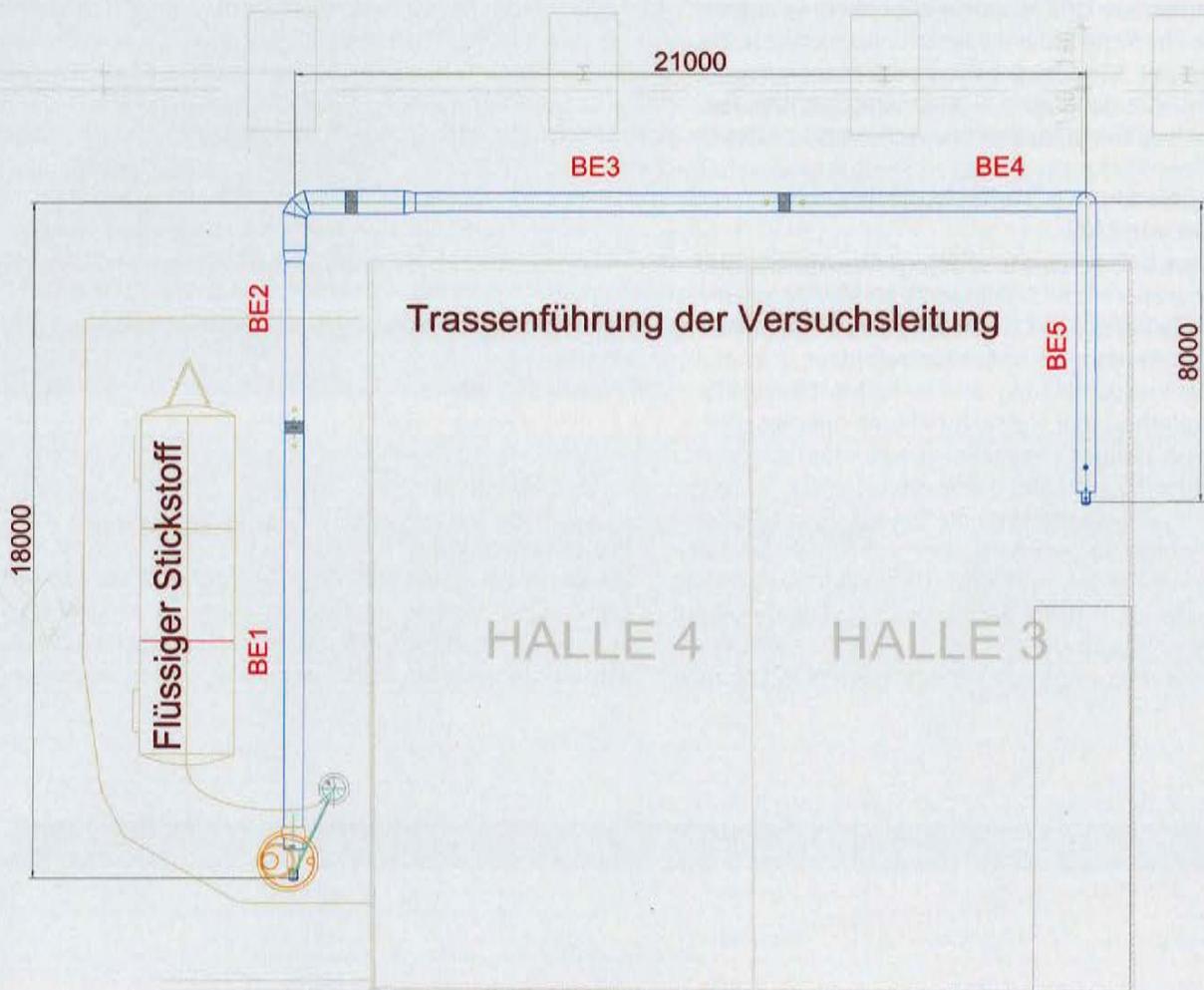


Bild 10: Aufbauplan der Versuchsleitung



Bild 11: Baueinheiten der Versuchsleitung mit integrierten Temperatursensoren

Vorgaben und auf dem Gelände der FW-FERNWÄRME-TECHNIK GmbH aufgebaut. Die Versuchsleitung besteht aus vorgefertigten Baueinheiten (**Bild 11**).

Nach der Herstellung, Trocknung, Evakuierung und dem Verschließen der Isolierkammer der Baueinheiten, fand die Verlegung in den Rohrgraben statt (**Bild 12**). Über den Befüllungstank wurde ein gleichmäßiger LN₂-Level im Innenrohr der Versuchsleitung sichergestellt. Über 100 Temperatursensoren wurden über die gesamte Länge der Lei-

tung angebracht: an der Kammer, dem Außenrohr, dem Erdreich in der Nähe der Bögen, den Befestigungspunkten, den Auflagern und den geraden Bereichen der Leitung.

Die gemessenen Temperaturdaten wurden für die Auswertung und Kontrolle der Temperaturprofile mittels Messwertaufnehmern digital über den Versuchszeitraum kontinuierlich erfasst. Zusätzlich zu den einzelnen Thermoelementen wurde ein spezielles Kabel zur Temperaturüberwachung auf dem Außenrohr entlang der Leitung angebracht. Die Tieftemperaturversuche mit flüssigem Stickstoff bei -196 °C liefen über mehrere Wochen.



Bild 12: Montage der Versuchsleitung

Projektergebnisse

Das FW-KAMMER-PIPE als Dreifach-Rohrsystem für den Transport von LNG, Öl und umweltschädlichen Flüssigkeiten ist serienreif. Alle Versuche zeigten, dass die Temperatur des Außenrohres an keiner Stelle der Versuchsleitung in einen kritischen Bereich abgesunken ist, in dem eine Schädigung eintreten könnte. Die Leckererkennung über Sensorkabel war ebenfalls erfolgreich. Auch im Falle einer Leckage kann das FW-KAMMER-PIPE weiter betrieben werden. Alle Standardbauteile die in Stahlmantelrohrleitungen verwendet werden – Führungslager, Gleitlagerplatten, Festpunkte Mantelrohrerweiterungen, axiale Kompensatoren, Rohrbögen – können ebenfalls in dem Dreifachrohr-System mit entsprechenden Modifikationen Verwendung finden. Distanzelemente im Lagerbereich aus industriellem Kunststoff für Tieftemperaturanwendungen versprechen eine weitere Verbesserung der Dämmungseigenschaften und führen damit zu einer Verringerung des Wärmeeintrages in die Rohrleitung. Das Evakuieren des Ringraumes zwischen den Rohren reduziert den Wärmeübergang zusätzlich. Als bevorzugtes Dämmmaterial kommt ein Aerogel in Frage. Die Verwendung des Tieftemperaturwerkstoffes X8Ni9 der SALZGITTER MANNESMANN LINE PIPE für das Innenrohr führte zu einer Optimierung des Dehnungskonzeptes und zu geringeren Durchmessern des Außenrohres.

Zusammenfassung

SALZGITTER MANNESMANN LINE PIPE hat zusammen mit seinem Vormateriallieferanten der Salzgitter Mannesmann Flachstahl eine optimierte Güte eines Warmbreitbandes für den Transport von LNG auf Basis des Materials X8Ni9 entwickelt. Dieses wurde weiterverarbeitet zu HFI-geschweißten Rohren mit einem Außendurchmesser von 219,1 mm und einer Wanddicke von 5,0 mm. Aber auch alle anderen Abmessungen im Fertigungsbereich der MLP (4½" bis 24") sind aus X8Ni9 herstellbar. Nach dem HFI-Prozess erfolgte eine Vergütungsbehandlung, wodurch die exzellenten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften im Tieftemperaturbereich von -196 °C im Rahmen der vorgegebenen Spezifikationen eingestellt werden konnten. So wurde eine Streckgrenze von über 550 MPa in Querrichtung und um die 600 MPa in Längsrichtung bei einer Zähigkeit von über 80 J im Kerbschlagbiegeversuch bei -196 °C erreicht.

Die Akzeptanz des Materials MLPX8Ni9 für HFI-geschweißte Rohre für Tieftemperaturanwendungen wurde durch eine Stahlmantelrohr-Versuchsleitung überprüft. Die FW-FERNWÄRME-TECHNIK in Celle nutzte diese X8Ni9-Rohre von MLP für die Herstellung und den Betrieb eines Dreifachrohr-Systems, dem sogenannten „FW-KAMMER ROHR“, für den Transport von LNG. Während der Versuche wurde diese Versuchsleitung mit einer Länge von 48,5 m mit flüssigem Stickstoff auf eine Temperatur von -196 °C abgekühlt. Es konnte gezeigt werden, dass der Ersatz von Edelstahlrohren durch HFI-geschweißte Rohre aus X8Ni9 nicht nur möglich, sondern in Bezug auf Aspekte wie vorteilhafte technische Eigenschaften, Verhalten, Verfügbarkeit und Kosten auch sinnvoll ist.

Literatur

- [1] Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. 28.09.2010 - https://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (01.0.2016)
- [2] Albus, R.; Krause, H.; Graf, F.; Gröschl, F.: Neues DVGW-Forschungsprojekt „Potenzialanalyse LNG“ gestartet. energie, wasser-praxis, 11 (2015), S. 23
- [3] Gerstein, D.: Small-Scale-LNG - Perspektiven für Deutschland. energie, wasser-praxis, 11 (2015), S. 12/6
- [4] Finlayson, C.: Global LNG Update. Howard Weil Energy Conference (2014)
- [5] Brauer, H.; Marewski, U.; Zimmermann, B.: Development of HFIW line pipe for offshore applications. 4th International Pipeline Technology Conference, Ostend, Belgium, May 9-13, 2004, Vol. 4, S. 1573/93 (Proc. Conf.)
- [6] API 5L "Specification for Line Pipe" Committee on Standardization of Tubular Goods, American Petroleum Institute, 42nd Edition
- [7] API 5CT "Specification for Casing and Tubing", American Petroleum Institute, 4th Edition, November 1992
- [8] ASTM A 333/A 333M:2015: Standard Specification for Seamless and Welded Steel Pipe for Low-Temperature Service and Other Applications with Required Notch Toughness
- [9] DIN EN 10028-4:2014-12 „Flat products made of steels for pressure purposes - Part 4: Nickel alloy steels with specified low temperature properties“, German version

- [10] 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)
- [11] Nickel Alloyed Plates - Steel Grades for Cryogenic Applications. Technical brochure 2013 Ilsenburger Grobblech GmbH, www.ilsenburger-grobblech.de
- [12] Freeman, R.; Langford, S.: Analysis Points To Pipe Alloy For Safe And More Economical LNG Transport. Pipeline & Gas Journal 11 (2008) 235, S. 66ff
- [13] FW-FERNWÄRME-TECHNIK GmbH, Celle, EFRE Projekt 80136748, „Produktreife Entwicklung eines Dreifachrohrsystems für den unterirdischen Transport von LNG und Rohöl / umweltgefährdende Produkte

SCHLAGWORTE: F&E, Tieftemperatur-Rohrleitung, LNG

AUTOREN



Dr.-Ing. **HOLGER BRAUER**
Salzgitter Mannesmann Line Pipe GmbH,
Hamm
Tel. +49 2381 420-447
holger.brauer@smlp.eu



Dipl.-Ing. **MANFRED VEIT**
Salzgitter Mannesmann Line Pipe GmbH,
Hamm
manfred.veit@smlp.eu



VOLKWART HARDERS
FW-Fernwärme-Technik GmbH, Celle
+49 5141 888 88-0
info@fw-gmbh.de



LUTZ GRUBE
FW-Fernwärme-Technik GmbH, Celle
+49 5141 888 88-0
info@fw-gmbh.de



FRANK MEYER
FW-Fernwärme-Technik GmbH, Celle
+49 5141 888 88-0
info@fw-gmbh.de