Neue Stahlrohre von heute – der Bestand von morgen

Von Dr. Holger Brauer, Dr. Christoph Weil und Marcel Jost

Europa transformiert seine Energieversorgung: Erneuerbarer Strom wird zentral, reicht aber allein nicht. Wasserstoff soll zweiter Hauptenergieträger werden. Übergangsweise bleiben fossile Energien und CO_2-Transport nötig. Für sicheren Transport und Speicherung sind HFI-Stahlrohre entscheidend; dieser Fachbeitrag zeigt den Entwicklungsstand und erste Projekte.

Einleitung

In Europa ist eine Transformation der Energieversorgung beschlossen. Primärenergiequelle soll dabei Strom aus erneuerbaren Energien sein. Alle Vorhersagemodelle kommen zu der Erkenntnis, dass Strom als alleiniger Energieträger die Versorgungssicherheit nicht darstellen kann. Daher zielen alle Entwicklungen darauf ab, als zweiten Hauptenergieträger Wasserstoff zu nutzen. Dieser birgt gegenüber Strom den Vorteil größere Energiemengen für den Bedarfsfall, z. B. in unterirdischen Kavernen, speichern zu können. Die aktuellen Anstrengungen von Industrie und Politik befassen sich derzeit und seit Längerem mit diesen beiden Energieträgern. Bis zum nahezu vollständigen Abschluss der Energiewende müssen aber fossile Energiequellen weiterhin genutzt werden. Und auch das in industriell großen Mengen erzeugte Kohlendioxid CO_2 (z. B. Zementindustrie, Stahlherstellung, usw.) gilt es, vom Erzeuger zur weiteren Verwendung oder Speicherung zu transportieren, bis die langwierige Umstellung auf CO_2-freie Prozesse erfolgt ist.

Die mit Material aus deutscher Stahlherstellung produzierten Stahlrohre von Mannesmann Line Pipe, längsnahtgeschweißt nach dem Hoch-Frequenz-Induktions (HFI)-Verfahren, bieten dabei im Energiesektor vielfältige Einsatzmöglichkeiten und tragen so zum Gelingen der Transformation bei. Im Fachbeitrag wird der Entwicklungsstand von HFI-Stahlrohren im mittleren Abmessungsbereich für die genannten Lösungen im Transport – und Speicherbereich gegeben, zusammen mit einem kurzen Überblick über die aktuellen und geplanten Normen. Komplettiert wird das Thema durch eine Erläuterung der CO_2-freien Stahlproduktion am Beispiel der Salzgitter AG.

Das Stahlrohr der Zukunft – Dekarbonisierung in der Stahlherstellung

Die Stahlindustrie befindet sich in einem grundlegenden Transformationsprozess. Als Teil der Salzgitter AG gestalten wir diesen Wandel aktiv, um unsere Werkstoffe fit für eine klimaneutrale Zukunft zu machen. Ziel ist es, die

CO_2-Emissionen der Stahlherstellung dauerhaft und deutlich zu senken, ohne Kompromisse bei Qualität und Leistungsfähigkeit unserer Produkte einzugehen.

Traditionell erfolgt die Stahlerzeugung über die Hochofen-Konverter-Route. Dabei wird Eisenerz im Hochofen mit Koks reduziert, um Roheisen zu erzeugen, das anschließend im LD-Konverter zu Stahl veredelt wird. Dieses Verfahren ist technisch ausgereift, jedoch kohlenstoffbasiert und mit hohen CO_2-Emissionen verbunden – pro Tonne Rohstahl entstehen derzeit rund 1,8 bis 2,0 t CO_2.

Im Rahmen des Transformationsprogramms SALCOS® - Salzgitter Low CO_2 Steelmaking der Salzgitter AG führen wir unser Werkstoffportfolio schrittweise in eine neue Ära: Die Direktreduktion aus Basis von Wasserstoff. In der sogenannten DRI-Route (Direct Reduced Iron) wird das Eisenerz nicht mehr mit Koks, sondern mit Erdgas und perspektivisch mit grünem Wasserstoff reduziert. Das entstehende Eisen, der sogenannte Eisenschwamm, wird anschließend in einem Elektrolichtbogenofen (EAF) zu Rohstahl erschmolzen.

Mit Blick auf den CO_2-Fußabdruck markiert der Umstieg auf die DRI-EAF Route einen Quantensprung. Bei vollständiger Nutzung von grünem Wasserstoff und erneuerbarem Strom können die CO_2-Emissionen der transformierten Prozesse so um bis zu 95 % reduziert werden (Scope 1&2). Damit leistet der Werkstoff Stahl – und insbesondere das Stahlrohr – einen entscheidenden Beitrag zur klimaneutralen Transformation von Industrie und Infrastruktur. Gerade für künftige Anwendungen wie Wasserstofftransportleitungen, CO_2-Transportsysteme, Geothermie- oder Energiespeicherlösungen wird CO_2-armer Rohstahl zu einem zentralen Element der Energiewende.

Der Transformationspfad ist klar definiert: 2027 wird in Salzgitter die erste Direktreduktionsanlage und der erste Elektrolichtbogenofen in Betrieb gehen, womit die industrielle Produktion von grünem Stahl Realität wird. Parallel bereiten wir in unseren Rohrwerken die Umstellung auf CO_2 reduzierte Vormaterialien vor. So entsteht das Stahlrohr der Zukunft – technologisch führend, klimafreundlich und unverzichtbar für eine nachhaltige Infrastruktur.

Stahlrohre für die Kohlendioxid-Infrastruktur

Der Transport und die Speicherung von Kohlendioxid (CO_2) im Rahmen von Carbon Capture and Storage (CCS) gelten als unverzichtbare Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität in modernen Volkswirtschaften. Insbesondere in emissionsintensiven Industriezweigen wie der Zementherstellung, der thermischen Verwertung von Reststoffen sowie der fossilen Energieerzeugung sind alternative Technologien zur vollständigen Dekarbonisierung nicht verfügbar [1, 2]. Die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Errichtung einer CO_2-Infrastruktur wurden durch die Novellierung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes (KSpG) durch das Bundeskabinett angestoßen [3].

Eigenschaften des CO_2-Stroms und Transportzustände

Der durch Abscheidung gewonnene CO_2-Strom stellt ein Stoffgemisch dar, dessen Zusammensetzung von der eingesetzten Gasaufbereitungstechnologie und der Herkunft des Prozessgases abhängt. Begleitstoffe wie Wasser, Sauerstoff, Stickoxide oder Schwefelverbindungen beeinflussen das Phasenverhalten und die Korrosionsneigung [1,3,4]. CO_2 kann in gasförmiger, flüssiger oder überkritischer Phase transportiert werden. Während der Transport in flüssiger Phase typischerweise per Schiff oder Bahn erfolgt, sind gasförmige Punkt-zu-Punkt-Leitungen nur für kurze Distanzen wirtschaftlich. Für großskalige CO_2-Netzwerke ist der Transport in überkritischer Phase – mit flüssigkeitsähnlichen Eigenschaften – technisch und ökonomisch bevorzugt [4].

Regelwerke und Werkstoffanforderungen

Die technische Auslegung von CO_2-Rohrleitungen kann z. B. auf dem Standard ISO 27913 erfolgen. Nationale Regelwerke sind, wie im Gas- und Wasserbereich üblich, durch den DVGW erarbeitet worden. Mit dem DVGW-Arbeitsblatt C 463 wurde eine spezifische Grundlage für Auslegung und Bau von CO_2-Leitungen geschaffen. Weitere Arbeitsblätter regeln die CO_2-Qualität (C 260), den Betrieb und die Instandhaltung (C 466) sowie Anlagen in Transportsystemen (C 491). Die Produktnorm für die einzusetzenden Rohre ist, wie aus dem Gasbereich bekannt, die ISO 3183.

Besonderheiten von CO_2 in Bezug auf Innenkorrosion

Im Gegensatz zu Erdgas ist CO_2 ein Medium, das unter bestimmten Bedingungen zu Innenkorrosion von Rohrleitungen aus üblichen Pipeline-Stählen führen kann. Elementar ist, CO_2 ausreichend zu trocknen. Tritt in der Rohrleitung eine freie Wasserphase auf, sind Korrosionsschäden wahrscheinlich. Je nach Zusammensetzung des CO_2-Stroms können darüber hinaus chemische Reaktionen zur Bildung aggressiver Säuren führen [1,3,4]. Zur Beherrschung dieser Risiken sind entweder Grenzwerte für Begleitstoffe und Wassergehalt festzulegen oder alternative Rohrkonzepte wie Clad-Rohre oder Innenbeschichtungen einzusetzen.

Mechanische Anforderungen und Versagensverhalten

Großversuche im Rahmen der Projekte SARCO2 und COOLTRANS haben gezeigt, dass CO_2-Leitungen im Ver-

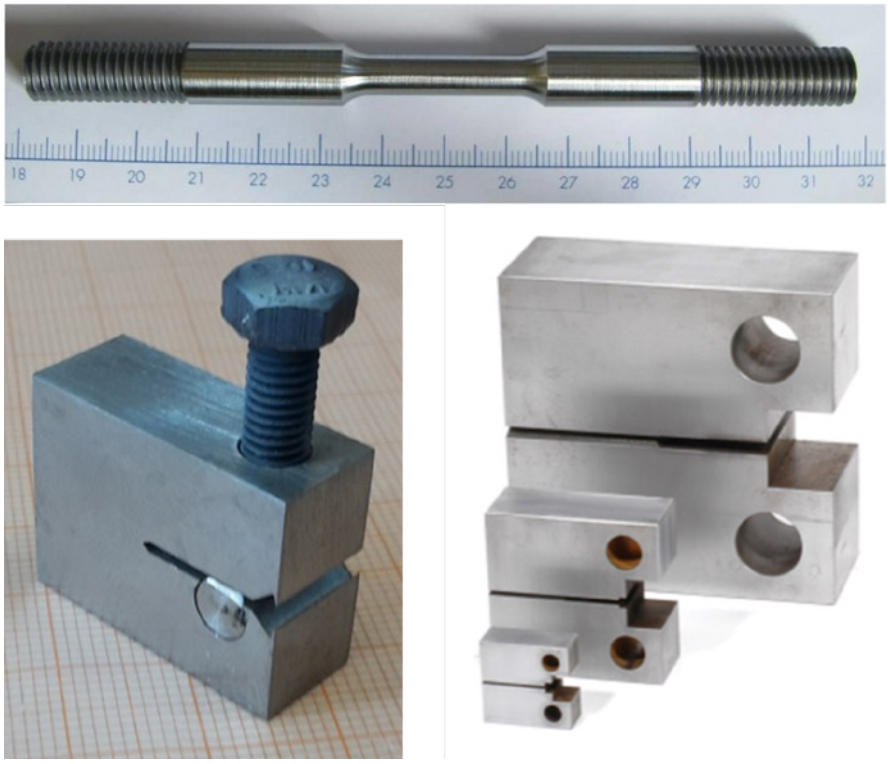


Bild 1: Proben für die Wasserstoffversuche: oben = SSRT-Versuch, unten links = K_{IH}, unten rechts = JR-Versuch K_{JIC}

gleich zu Erdgasleitungen modifiziert ausgelegt werden müssen, um langlaufende Risse zu vermeiden [3-6]. Die Anforderungen an die Zähigkeit der Rohrstähle steigen deutlich: DVGW C 463 fordert einen Mittelwert von 250 J im Kerbschlagbiegeversuch (Charpy-V) für den Grundwerkstoff. Zudem sind Drop Weight Tear Tests (DWT) ab DN 300 verpflichtend. Mannesmann Line Pipe GmbH hat auf diese Anforderungen reagiert und mit seinen Mannesmann CO2ready®-Rohren den CO_2-Lieferstandard entsprechend angepasst, um die geforderten mechanischen Eigenschaften über das relevante Abmessungsspektrum sicherzustellen.

Thermodynamische Effekte in Betrieb und Druckentlastung

Bei Transport von CO_2 in gasförmigem Zustand muss bei der Auslegung ein im Vergleich zum Erdgas deutlich größerer Joule-Thompson-Effekt berücksichtigt werden [3]. Ein weiterer Aspekt betrifft das Verhalten von CO_2 bei Druckentlastung. Die dabei auftretende Phasenumwandlung führt zu einem signifikanten Temperaturabfall, der in Längsrichtung der Leitung hohe Spannungen erzeugen kann. Während die Längsnähte durch geringe Umfangsspannungen weniger betroffen sind, müssen die betrieblichen Vorgaben zur Befüllung und Entleerung sowie die Anforderungen an Bandverbindungsnähte entsprechend angepasst werden [4].

Fazit

Der Transport von CO_2 stellt im Vergleich zu Erdgas höhere Anforderungen an die mechanisch-technologischen Eigenschaften von Leitungsrohrstählen. Bessere Zähigkeitskennwerte müssen bei höheren Wanddicken sicher erreicht werden. Mannesmann Line Pipe GmbH stellt sich dieser Herausforderung zusammen mit seinen Partnern.

Stahlrohre für die Wasserstoffinfrastruktur

Im Bereich der Übertragungs- und Anschlussleitungen für den Transport von gasförmigem Wasserstoff in höheren Druckbereichen werden überwiegend Stahlrohre zum Einsatz kommen. Entweder sollen bereits existierende Leitungen aus dem Erdgasbetrieb umgestellt, oder neue Leitungen verlegt werden. Um einen sicheren Leitungsbetrieb gewährleisten zu können, muss unter anderem der Einfluss von Wasserstoff auf die Eigenschaften der verwendeten Stähle bekannt sein. Hier ist zu berücksichtigen, dass der Wasserstoff nicht nur bei Ungänzen auf der Rohroberfläche wirken, sondern auch atomar in den Stahlwerkstoff eindringen kann. Auf der Stahloberfläche existiert unter Anwesenheit von Sauerstoff eine Oxidschicht, die sich auch nach einem Aufreißen oder einer Entfernung sofort neu bildet. Untersuchungen haben gezeigt, dass trotz intakter Schicht der Wasserstoff in den Stahl gelangt. Die Oxidschicht verlangsamt den Prozess stark, kann aber die Aufnahme nicht gänzlich unterbinden. Somit verlängert die Anwesenheit von Sauerstoff im Medium zwar die Zeit, bis unterkritische Risse wachsen, aber er verhindert den Rissfortschritt nicht [7-10]. Daher werden entsprechende Versuche durchgeführt, um zu ermitteln, wie groß der Einfluss im Einzelfall ist. Unterschiedliche Untersuchungen konnten nachweisen, dass auch bereits bei sehr kleinen Wasserstoffanteilen im transportierten Medium (< 1 %), und auch bei sehr niedrigen Drücken (< 1 bar) bereits negative Auswirkungen auf die Duktilität und Bruchzähigkeit besonders an neugebildeten oder vorhandenen Ungänzen wie Risse oder Kerben auftreten [11-13].
Entsprechend sind die Anforderungen in den aktuellen Regelwerken mit aufgenommen worden. Diese werden auf Basis von weltweiten Untersuchungen weiterhin aktualisiert.

Wesentliche Regelwerke für Stahlrohre im Bereich des Transportes von Wasserstoff sind die ASME B31.12, ASME B31.8, DIN 1594, DIN EN 10216 und 10217, DVGW G 463, DVGW G 464, ÖVGW QS-H404/1, ÖVGW H E200. Speziell in Deutschland gibt der TÜV Süd entsprechende Anforderungen in seinem Standard P003 „Werkstoffbeständigkeit gegenüber Druckwasserstoff“ vor, um Rohre für die Verwendung unter Wasserstoffeinfluss zu verwenden [14]. Die entsprechende Qualifizierung der HFI-längsnahtgeschweißten Stahlrohre von Mannesmann Line Pipe GmbH ist auch Basis für die Aufnahme dieser in die Datenbank „VerifHy“ des DVGW. Diese soll die Umstellung von bereits existierenden Erdgasleitungen, aber auch den Neubau von Leitungen vereinfachen, indem zuverlässige Informationen zur H_2-Eignung der Leitungskomponenten abgerufen werden können [15].

Die im Nachfolgenden kurz beschriebenen Untersuchungen zu den Materialeigenschaften unter Einfluss von Druckwasserstoff zählen zu den relevanten Prüfungen für einen sicheren Betrieb von Stahlrohren für den Transport und die Speicherung von Wasserstoff. Verwendung finden die ermittelten Kennwerte und Nachweise beim Design einer Wasserstoffleitung bzw. bei der Überprüfung der Restlebensdauer.

Tabelle 1: Spannungsintensität K_{IH} in 100 % Wasserstoff nach 1.000 Stunden, ermittelt an Mannesmann H2ready® Rohrgüten

Stahlgüte	Testdruck in bar	$K_{IH,erreicht}$ in MPa√m		
		Grundwerkstoff	HFI-Naht	Wärmeeinflusszone
X42N/L290N	100	62 - 65	59 - 62	58 - 59
X52N/L360N	100	57 - 64	58 - 61	57 - 61
	180	58 - 59	59 - 60	58 - 59
X52M/L360M	100	58 - 61	57 - 59	57 - 61
	180	55 - 56	58 - 59	58 - 58
X60M/L415M	100	57 - 63	58 - 72	58 - 60
		85 - 86		
X65M/L450M	100	58 - 63	58 - 59	58 - 60
X70M/L485M	100	62 - 64	58 - 60	58 - 59

Slow-Strain-Rate-Tensile Versuche

Bei den langsamen Zugversuchen wird ein Vergleich des Werkstoffverhaltens bei gleichen Belastungsgeschwindigkeiten zwischen einer inerten Referenzatmosphäre (z. B. Stickstoff) und einer Wasserstoffdruckgas-Atmosphäre (z. B. 100 % H_2) an einer Zugprobe angestellt (*Bild 1*, oben). In den Untersuchungen an HFI-Rohren der Güten zeigt sich im Verhältnis der Werte zwischen inerter und Wasserstoffatmosphäre, dass die Zugfestigkeit durch den Wasserstoff nicht beeinflusst wird. Die Duktilität (Brucheinschnürung und Bruchdehnung) wird in den meisten Fällen verringert. Diese Verringerung beträgt jedoch in keinem Fall mehr als 50 %. Dabei ist keine Abhängigkeit von der Werkstoffgüte (L245/Grade B bis L458/X70), dem Mediendruck (80 bar, 100 bar, 180 bar) und der Prüfgeschwindigkeit (10^{-6} 1/s bzw. 10^{-5} 1/s) zu erkennen [16-18].

Spannungsintensität K_{IH}

In der ASME B31.12 wird eine einmalige Qualifizierung pro Güte für den Einsatz als Wasserstoffrohr gefordert. Hierbei ist Spannungsintensität K_{IH} nach der ASTM E1681 an drei Schmelzen, mit je drei Proben aus Grundwerkstoff, HFI-Längsnaht und Wärmeeinflusszone der HFI-Naht zu bestimmen. Gefordert ist das Erreichen eines Mindestwertes von 55 MPa√m. Verwendet werden hier aus der Bruchmechanik bekannte Compact Tension (CT-) Proben (Bild 1, unten links). Diese werden nach Erzeugung eines Ermüdungsanrisses einer konstanten Verformung, und damit Aufweitung des Anrisses, ausgesetzt. Nach einer Auslagerung für 1.000 Stunden in einer 100 %igen Wasserstoffatmosphäre bei z. B. 100 bar Druck wird beurteilt, um welchen Betrag der Riss gewachsen ist. Aus dieser Information wird dann der tatsächliche Wert für K_{IH} ermittelt. Alle untersuchten HFI-Rohre von Mannesmann Line Pipe erfüllen die Mindestanforderung. Höhere Werte sind möglich und wurden exemplarisch auch in Versuchen nachgewiesen (*Tabelle 1*).

Spannungsintensität K_{JIC}

Die Bestimmung der Spannungsintensität K_{IH} kann nur den linear-elastischen Anteil einer Materialbelastung berücksichtigen. Abhilfe schafft hier die Bestimmung der Spannungsintensität K_{JIC} gemäß der Durchführung des JR-Versuchs nach ASTM E1820. Bei diesem statischen Bruchmechanikversuch wird auf die Probe (Bild 1, unten rechts) eine ansteigende Belastung aufgebracht. Diese ist dehnungsgeregelt (wegkontrolliert), d. h. es wird eine bestimmte Zunahme der Kerböffnung pro Zeiteinheit vorgegeben. Aus der aufgebrachten Kraft und der Rissöffnung kann letztlich eine Spannungsintensität ermittelt werden. Die Spannungsintensität K_{JIC} gibt dabei beispielsweise den Wert an, bei dem ein Rissfortschritt von 0,2 mm aufge-

Tabelle 2: Ergebnisse der JR-Versuche in 100 % Wasserstoff bei 100 bar an Mannesmann H2ready®-Rohrgüten

Stahlgüte	K_{JIC} ($K_{J0,2mm}$) in MPa√m	
	Grundwerkstoff	HFI-Naht
X52N/L360N	102 - 110	122 - 143
X60M/L415M	111 - 114	107 - 112
X70M/L485M	107 - 119	136 - 138

treten ist. Es wird demnach eine Aussage möglich, ab welcher Spannungsintensität ein bestehender Riss unter einer monotonen Belastung wächst. Dies bedeutet, dass keine zyklische Belastung durch beispielsweise Druckschwankungen erforderlich ist, sondern eine einzige Krafteinleitung ausreicht, um Risswachstum herbeizuführen. Diese einzelne Krafteinleitung kann auch die Belastungsphase eines Druckzyklus sein. Im Gegensatz zum Versuch zur Bestimmung des K_{IH}-Wertes, bei dem nur abgeprüft wird, ob von einer Probe mit Anriss eine bestimmte Belastung ohne Versagen dauerhaft ertragen wird, ist der K_{JIC}-Wert im Sinne der Festigkeit fast eine Analogie zur Streckgrenze und damit ein Werkstoffkennwert. Somit gibt dieser eine genauere Beschreibung des Materialverhaltens unter einer anliegenden Belastung (durch den Innendruck im Rohr) und eventuell vorhandenen Rissen wieder als der K_{IH}-Wert. Eingang gefunden hat die Bestimmung des K_{JIC}-Wertes bereits in die DVGW G 463.

Aus dem Portfolio der HFI-Rohre von Mannesmann Line Pipe für den Transport von Wasserstoff wurden bisher die in *Tabelle 2* aufgeführten Güten im JR-Versuch bei 100 bar in 100 % Wasserstoff geprüft. Mit Werten von über 100 MPa√m zeigen alle Güten etwa doppelt so hohe Werte wie die Vorgabe von 55 MPa√m aus der ASME B31.12. Für das Leitungsdesign ist dies aus dem Grunde interessant, da davon ausgegangen werden kann, dass die Bruchzähigkeit und die Kerbschlagzähigkeit des Werkstoffs miteinander korrelieren (können). So wird in [19] gefunden, dass mit erhöhter Kerbschlagarbeit auch die Spannungsintensität steigt, und damit das Auftreten von langlaufenden duktilen Rissen besser unterbunden werden kann.

Rissfortschrittversuche da/dN

Die Durchführung von Rissfortschrittversuchen da/dN unter zyklischer Belastung erfolgt nach ASTM E647. Hierbei wird ermittelt, mit welcher Geschwindigkeit sich vorhandene Risse in Abhängigkeit von der zyklischen Belastung ausbreiten. Diverse Untersuchungen zeigen, dass der Rissfortschritt in Wasserstoffdruckgas-Atmosphäre bereits bei sehr niedrigen Wasserstoffgehalten gegenüber der Ausbreitung an Luft zum Teil um den Faktor 10-20 schneller abläuft [20,21]. Dies hat massive (negative) Auswirkungen auf die zu erwartende Lebensdauer der Rohrleitung. Auf Basis von Versuchen an vielen unterschiedlichsten Leitungsrohrstählen empfiehlt die ASME B31.12 eine konservative Master-Design-Kurve, die zur Auslegung von Leitungen genutzt werden soll. Ebenso ist im Rahmen des SyWeStH2-Projektes aus Versuchen an Stählen von existierenden Leitungen in Deutschland eine Mindestforderung entwickelt worden. Diese hat bereits Eingang in die nationalen Regelwerke wie DVGW G 463/464 gefunden.

Versuche in 100 % Druckwasserstoff zeigen, dass die Mannesmann H2ready®-Güten einen langsameren Rissfortschritt aufweisen, als die jeweiligen konservativen Master-Design-Kurven annehmen [17]. Somit können höhere Lastzyklen erreicht, der Leitungsdruck erhöht und/oder die Rohrwanddicke reduziert werden.

Kabelschutz-Rohre

Auch im Bereich des Ausbaus der Stromnetzinfrastruktur spielen Stahlrohre eine wichtige Rolle. Um die Akzeptanz in der Bevölkerung zu steigern, werden große Ausbauprojekte wie Südlink in erdverlegter Variante ausgeführt. Um das Stromkabel austauschen zu können, wird es in ein Schutzrohrsystem verlegt. Für unkritische Bauabschnitte wird hierzu ein PE-Rohr verwendet. Hierbei ist zu beachten, dass der Eingriff in die Landschaft sich von der Verlegung eines Leitungsrohres deutlich unterscheidet. Bis zu sechs Stränge werden parallel verlegt. Zudem muss ggf. ein umfangreicher Bodenaustausch vorgenommen werden, um die im Betrieb der Leitung entstehende Wärme abzuleiten. Abschnitte, in denen beispielsweise Straßen, Flüsse oder besonders geschützte Gebiete gekreuzt werden müssen, können nicht in offener Bauweise ausgeführt werden.

Nicht alle gewählten Trassen können mit einem Kunststoffrohr ausgeführt werden, da die Kräfte beim Einzug je nach Bohrungslänge zu groß sind. Aktuell wird zur Lösung dieses Problems ein Stahlrohr in grabenloser Verlegung installiert, um in dieses ein Kunststoffrohr einzuziehen. Das Kunststoffrohr dient ausschließlich dazu, den Reibungswiderstand beim Verlegen des Kabels in das installierte Leerrohrsystem zu beherrschen, da dieser bekannt ist. Die Verwendung eines Kunststoffrohres als eine Art Liner führt zu höheren Kosten und zu ungünstigen Verhältnissen bezüglich der Wärmeleitung im Betrieb. Um auf das Kunststoffrohr verzichten zu können, führen die Unternehmen TransnetBW und Ramonat an von Mannesmann Line Pipe beigestellten Rohren Einzugsversuche durch, um den Reibungswiderstand an Stahlrohren der entsprechenden Abmessung zu bestimmen. Hierbei wird auf dem Testgelände von Ramonat eine

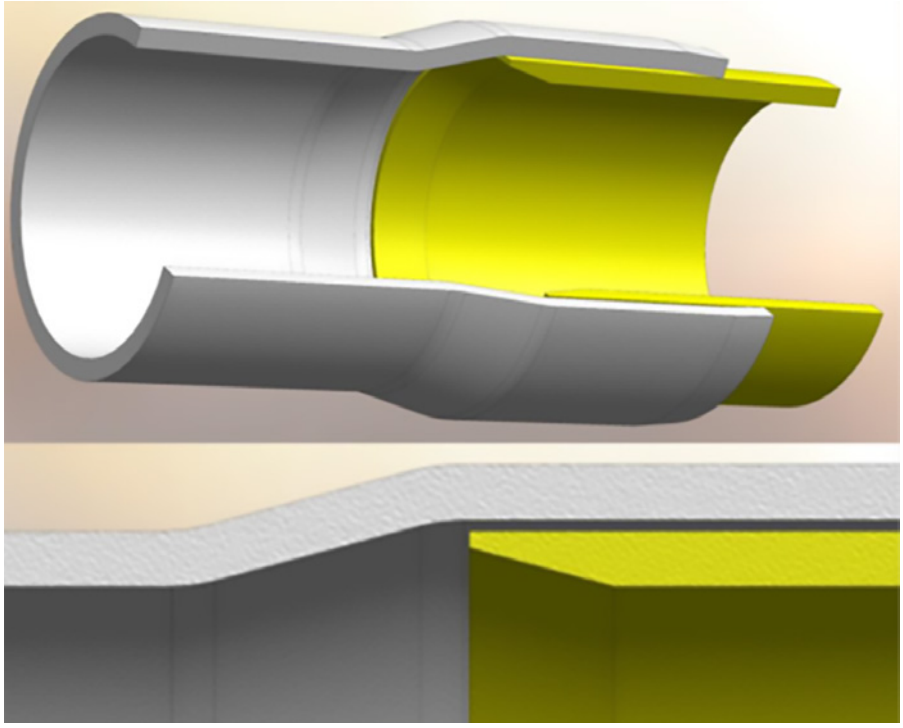


Bild 2: Design der Einsteck-Schweißmuffe (ESM) von Mannesmann Line Pipe für Kabelschutzrohre aus Stahl

200 m lange Teststrecke mit mehreren Bögen errichtet, in die ein Hochspannungskabel eingezogen wird. Durch Messung der dabei entstehenden Kräfte können Rückschlüsse über den Reibungskoeffizienten des Kabels an der Rohrinnenwand der Stahlrohre gezogen werden. Zur Rohrverbindung wird in diesem Großversuch eine von Mannesmann Line Pipe angebotene, auf die Anwendung angepasste Steckmuffenverbindung eingesetzt (*Bild 2*). Diese Ausführung stellt sicher, dass das Kabel nicht an überstehenden Schweißwurzeln beschädigt wird.
Im Ergebnis entsteht ein im Großversuch validiertes System zur sicheren und kosteneffizienten Verlegung von anspruchsvollen Grabenlos-Abschnitten in erdverlegten Höchstspannungssystemen.

Fazit und Ausblick

Zusammenfassend bilden die betrachteten HFI-geschweißten Stahlrohre von Mannesmann Line Pipe ein robustes Fundament der modernen Rohrtechnologie für anspruchsvolle Transport- und Speicheranwendungen im Kontext der Energiewende. In den Bereichen Wasserstoff- und CO_2-Transport bedürfen die medienbedingten Anforderungen besonderer Beachtung. Die Vielzahl durchgeführter Untersuchungen zur Materialcharakterisierung liefert eine fundierte Wissensbasis, auf deren Grundlage Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Anwendungsgrenzen für eine sichere und effiziente Energieinfrastruktur bewertet werden können.
Zukünftige Optimierungen fokussieren sich auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften unserer Rohre und der verwendeten Materialien, wobei die Priorität auf der Qualität der Rohrwerkstoffe sowie auf der Senkung des CO_2-Fußabdrucks der eingesetzten Stähle liegt. Insgesamt soll die Weiterentwicklung der Rohrtechnologien eine höhere Belastbarkeit, längere Lebensdauer und geringere ökologische Auswirkungen ermöglichen, ohne die Schlüsselaspekte der mechanisch-technologischen Eignung zu vernachlässigen. CO_2-arme Fertigungsrouten des Vormaterials ermöglichen darüber hinaus eine erhebliche Senkung des CO_2-Fußabdrucks von Pipelineprojekten.

Literatur

[1] Neupert, M.; Hilgenstock, A.: CO_2-Transport in Leitungen – nach welchen Regeln? gwf Gas+Energie, 3/2022, S. 44-47

[2] VDZ: Anforderungen an eine CO2-Infrastruktur in Deutschland – Voraussetzungen für eine Klimaneutralität in den Sektoren Zement, Kalk und Abfallverbrennung. Düsseldorf, 2024

[3] Pressemitteilung BMWE: Bundesregierung ebnet den Weg für CO2 Speicherung und -Nutzung (CCS und CCU). https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/speicherung-von-kohlendioxid-2376946 (Abruf am 08.10.2025)

[4] DGMK e.V.: Ganzer et al., Wissenschaftliche Studie zum nationalen und internationalen technischen Stand der Speicherung und des Pipeline-Transports von CO_2. Forschungsbericht, Hamburg (2025), ISBN 978-3-947716-68-5

[5] Di Biagio, M., Spinelli, C. M., Brauer, H., Kassel, C., et al., Requirements for safe and reliable CO2 transportation pipeline (SARCO2): final report, Europäische Kommission, Generaldi-rektion Forschung und Innovation, Publications Office, 2017, https://data.europa.eu/doi/10.2777/205449

[6] Barnett, J.; Cooper, R.: The COOLTRANS Research Programme – Learning for the Design of CO2 Pipelines. IPC 2014 - International Pipeline Conference 2014, Calgary, Kanada, 29.09.-03.10.2014 (Proc. Conf., IPC2014-33370)

[7] Wheeler, R.W.; San Marchi, C.; Ronevich, J.: Subcritical Crack Growth in High-pressure Hydrogen and Hydrogen With Oxygen Impurity. International Conference on Fracture June 2023 (SAND2023-05153C)

[8] Marchi, C.S.; Ronevich, J.A.; Schroeder, B.; Davis, B.C.: Hydrogen Pressure Cycling of Subscale Pipes to Simulate Full-Scale Testing of Transmission Pipelines. IPC 2024

- International Pipeline Conference 2024, Calgary, Kanada, 23.-27.09.2024 (Proc. Conf., IPC2024-134173)

[9] Höhler, S.; Wanzenberg, E.; Brauer, H.; Kalwa, C.; Muthmann, E.; Ratke, D.; Völling, A.: Wasserstoffleitungen – Anforderungen und relevante Prüfungen für Stahlrohre. Oldenburger Rohrleitungsforum 2023 (Proc. Conf.)

[10] Brauer, H.: Die H2ready Pipeline - die wirtschaftlichste Stromleitung, der beste Stromspeicher. Oldenburger Rohrleitungsforum 2022, S. 238 - 256 (Proc. Conf.)

[11] Steiner, M.; Marewski, U.; Silcher, H.: DVGW-Projekt SyWeSt H2: Stichprobenhafte Überprüfung von Stahlwerkstoffen für Gasleitungen und Anlagen zur Bewertung auf Wasserstofftauglichkeit. Abschlussbericht Januar 2023, DVGW-Forschungsprojekt G 20200

[12] Briottet, L.; Ez-Zaki, H.: Influence of Hydrogen and Oxygen Impurity Content in a Natural Gas / Hydrogen Blend on the Toughness of an API X70 Steel. Pressure Vessels & Piping Conference 2018, Technical Paper Publication: PVP2018-84658

[13] Kuo, C.H.; Newbury, B.; Baker, D.; Li, C.; Nissley, N.; Noecker II, F.; Hoyt, D.; Jo Jun, H.; Thirumalai, N.: Investigation of Fracture Toughness Behavior for Carbon Steel Line Pipes Under Hydrogen and CO2 Environment. IPC 2024 - International Pipeline Conference 2024, Calgary, Kanada, 23.-27.09.2024 (Proc. Conf., IPC2024-122829)

[14] TÜV Süd: H2-Readiness Zertifizierung für Werkstoffe, Komponenten und Kraftwerke. https://www.tuvsud.com/de-de/branchen/energie/erneuerbare-energien/brennstoffzellen-wasserstoffzellen/h2-ready, Abruf 30.09.2025

[15] DVGW: verifHy - die Datenbank zu Wasserstoff. https://www.verifhy.de/, Abruf 30.09.2025

[16] Brauer, H.; Golisch, G.: Längsnahtgeschweißte HFI-Stahlrohre für Wasserstoffanwendungen. 3R, 08-09 (2023), S. 41-47

[17] Brauer, H.; Golisch, G.; Wackenhut, G.: High-frequency-induction welded steel pipes for the future hydrogen gas grid. IPC2024 - International Pipeline Conference 2024, Calgary, Kana-da, 23.09.-27.09.2024 (Proc. Conf.) (IPC 2024-133433)

[18] Brauer, H.: Stahlrohre – Stahlrohre als Bindeglied für Infrastruktur und Wasserstoff. Fachtagung Wasserstoff des TÜV SÜD, 7.-8. Mai 2025, München

[19] Xu, S.; Tyson, W. R.: Toughness properties and ECA of current electric welded pipe seam welds. CanmetMATERIALS, Report, CMAT-2020-WF 51907294. https://doi.org/10.4095/328213

[20] Briottet, L., Moro, I., Lemoine, P.: Quantifying the hydrogen embrittlement of pipeline steels for safety considerations. International Journal of Hydrogen Energy 37 (2012), 22, S. 17616/23

[21] Slifka, A.J.; Drexler, E.S.; Amaro, R.L.; Hayden, L.E.; Stalheim, D.G.; Lauria, D.S.; Hrabe, N.W.: Fatigue Measurement of Pipeline Steels for the Application of Transporting Gaseous Hydrogen. ASME J. Pressure Vessel Technol. 140 (2018) 1, p. 021403-1/13

SCHLAGWÖRTER: HFI-Rohre, Wasserstofftransport, CO2-Transport, Kabelschutzrohr Stahl

AUTOREN

Dr. **Holger Brauer**
Mannesmann Line Pipe GmbH, Hamm
Tel. +49 2381 420-447
holger.brauer@mannesmann.com

Dr. **Christoph Weil**
Mannesmann Line Pipe GmbH, Siegen
Tel. +49 271 691-125
christoph.weil@mannesmann.com

Marcel Jost
Salzgitter Flachstahl GmbH, Salzgitter
Tel. +49 5341 21-2412
Jost.M@salzgitter-ag.de

IHR KONTAKT ZUR REDAKTION

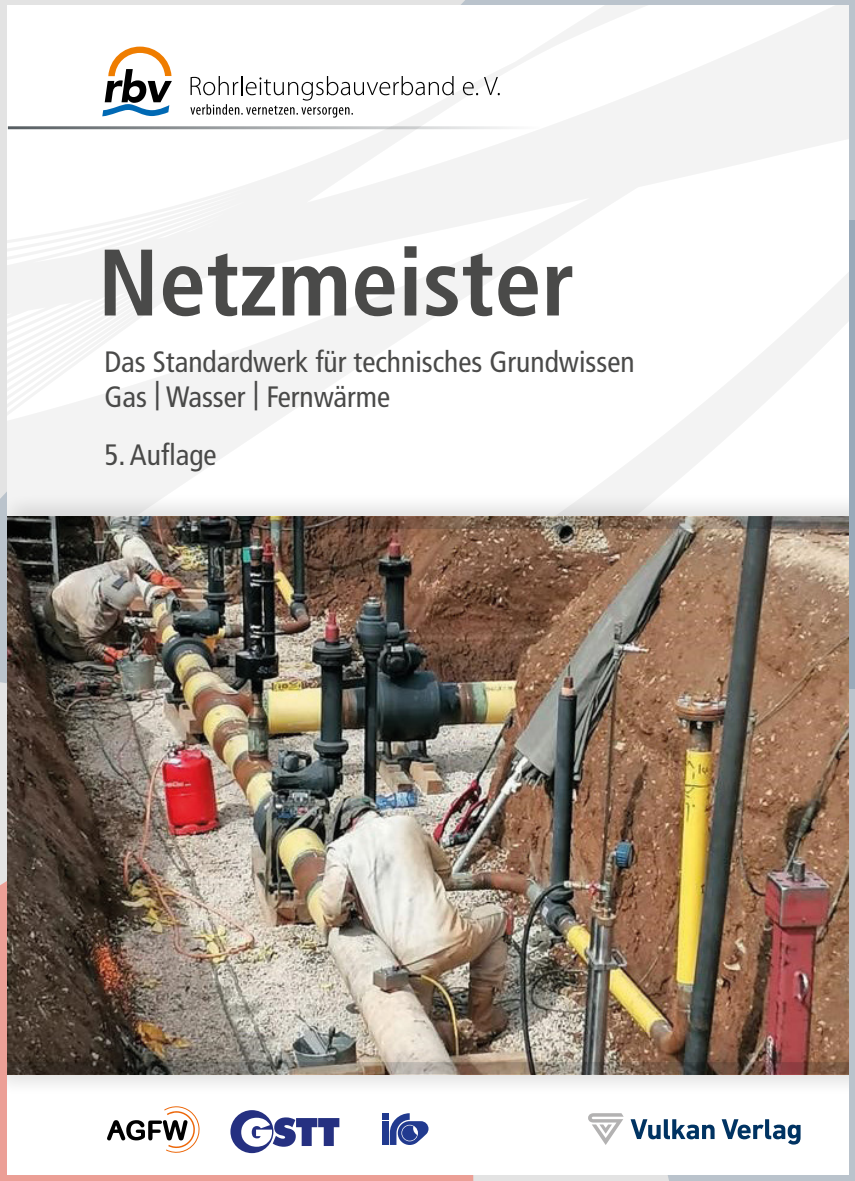
Redaktionsleitung
Kathrin Mundt
Telefon +49 201 8 20 02-27
k.mundt@vulkan-verlag.de

Redaktion
Marie Zech
Telefon +49 201 8 20 02-38
m.zech@vulkan-verlag.de

Redaktion
Annamaria Weinert
Telefon +49 201 8 20 02-63
a.weinert@vulkan-verlag.de

STANDARDWERK
DER ROHRLEITUNGSBAUER

BUCH TIPP



Ihr Mehrwert:

- Wissenspool für Fortschrittmacher
- Ausblick auf die Umstellung der Energieinfrastruktur
- Detailliert und praxisorientiert dargestellt

Hrsg.: Rohrleitungsbauverband e.V.
Angaben: 5. Auflage 2023 I Umfang: 1.048 Seiten
Hardcover: ISBN: 978-3-8027-3521-9 I Artikel-Nr.: 35219
eBook: ISBN: 978-3-8027-3522-6 I Artikel-Nr.: 35226
Preis: 109,00 €

Hier direkt bestellen:
www.vulkan-shop.de

Vulkan Verlag