

Stahlrohre für nachhaltige Wasserstoffleitungen

Wasserstoff als Energieträger ist die einzige Möglichkeit, ausreichend viel Energie aus regenerativer Erzeugung zu speichern. Dabei ist der Transport von großen Mengen nur über Rohrleitungssysteme sinnvoll. Stahlrohre der neueren Generationen haben sich bereits beim Erdgastransport bewiesen. Aber auch für den Transport von Wasserstoff bieten sie hervorragende und vor allem sichere Lösungen. Zusätzlich kann Stahl auch beim Thema Nachhaltigkeit punkten, schließlich lässt sich kein anderer Werkstoff so unbegrenzt recyceln und in den Wertstoffzyklus zur erneuten Verwendung zurückführen. In diesem Artikel wird der aktuelle Stand der Untersuchungen im Bereich Wasserstoff an Stahlrohren, hergestellt nach dem Hochfrequenz-Induktions-(HFI-)Schweißverfahren, aufgezeigt.

Um die Freisetzung des Treibhausgases Kohlendioxid (CO₂) zu vermeiden und gleichzeitig nachhaltige und dauerhaft verfügbare Energie zu verwenden, kommen letztlich nur erneuerbare Quellen wie Sonne, Wind, Wellen usw. infrage, welche primär elektrischen Strom erzeugen. Es

ist jedoch davon auszugehen, dass zukünftig Brenn- bzw. Treibstoffe als Energieträger in schwer oder nicht zu elektrifizierenden Anwendungen zum Einsatz kommen werden. Beispiele hierfür sind der Bereich der industriellen Prozesswärme, die Stahlerzeugung oder die Ener-

giespeicherung im großen Stil. Da die volatilen regenerativen Quellen zur Stromerzeugung möglichst in Gänze verwendet werden sollen, müssen in Zeiten der Überproduktion große Energiemengen gespeichert werden, um in Zeiten des Unterangebotes („Dunkelflaute“) wieder zurück-

Abb. 1 – Verlegung einer Wasserstoff-Pipeline aus H2ready-Rohren



Mannesmann Line Pipe GmbH

gespeist werden zu können. Technisch und wirtschaftlich kommt dafür derzeit nur Wasserstoff (H_2) als Lösung infrage [1]. Somit wird der Transport von vor allem gasförmigem Wasserstoff über Rohrleitungen die einzige sinnvolle Lösung zur Deckung der Energieversorgung von Deutschland im großen Maßstab sein – wie auch schon beim Erdgas. Daher ist es sinnvoll und richtig, dass die Nutzbarkeit von Stahlrohren für den Transport von gasförmigem Wasserstoff im Fokus von Untersuchungen zur Ermöglichung der Energiewende liegt.

Die nachfolgenden Ausführungen behandeln die derzeit wichtigsten Versuche zur Charakterisierung des Materialverhaltens und Untersuchungen an modernen Mannesmann H2ready Leitungsrohrstählen der Mannesmann Line Pipe GmbH. Diese werden nach dem Hoch-Frequenz-Induktions-(HFI-)Schweißverfahren hergestellt und dabei ohne Schweißzusatzwerkstoff mit einer Längsnaht (HFI-Naht) versehen.

Charakterisierung von Rohrleitungsstählen unter dem Einfluss von Druckwasserstoffgas

Im Folgenden werden die am häufigsten durchgeführten Tests zur Beschreibung des Materialverhaltens in Wasserstoffatmosphäre vorgestellt und deren Bedeu-

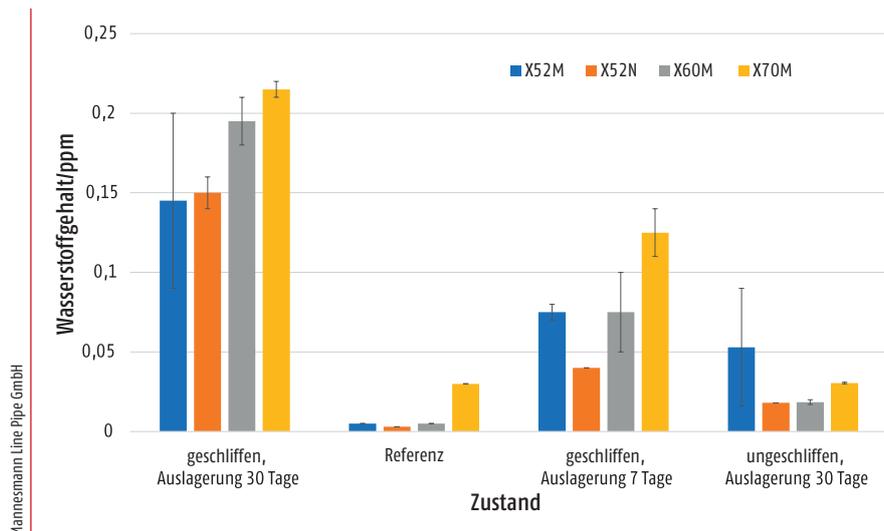


Abb. 2 – Einfluss von Oberflächenzustand und Auslagerungsdauer auf die Wasserstoffaufnahme

(SZMF). Nähere Einzelheiten zu den Versuchen und der Versuchsdurchführung sind der Literatur [4-9] zu entnehmen.

Wasserstoffaufnahme

Zur Beurteilung, ob der Wasserstoff aus dem Druckgasmedium in die Rohrwand eindringen kann, dienen Versuche zur Bestimmung der Wasserstoffaufnahme. Hierzu werden Proben mit unterschiedlichem Oberflächen- und Wärmebehandlungszustand bei 100 bar in hundertprozentigem Wasserstoffgas bei Raumtem-

peraturen nicht bestimmt werden. Die maximal nachgewiesene Wasserstoffmenge fällt sehr gering aus.

(Quasi-)statische Belastung ohne Risse

Der Slow-Strain-Rate Zugversuch (SSRT-Versuch) nach NACE TM0198 und DIN EN ISO 7539-7 [10, 11] bietet die Möglichkeit, die Wirkung einer Wasserstoffatmosphäre auf die mechanischen Eigenschaften unter einer quasistatischen Beanspruchung zu überprüfen. Durch die Verwendung einer sehr geringen Dehngeschwindigkeit erhält

» Da die volatilen regenerativen Quellen zur Stromerzeugung möglichst in Gänze verwendet werden sollen, müssen in Zeiten der Überproduktion große Energiemengen gespeichert werden, um in Zeiten des Unterangebotes („Dunkelflaute“) wieder zurückgespeist werden zu können. «

ung kurz erläutert. Entsprechende Ergebnisse an Mannesmann H2ready Rohrwerkstoffen der Mannesmann Line Pipe geben dann einen Einblick in die Umsetzung der Versuche und erlauben eine thematische Einordnung in die Gestaltung des zukünftigen Wasserstofftransportnetzes. Die in den Untersuchungen eingesetzten Werkstoffe sind bis zur Festigkeitsklasse L290/X42 (nach ISO 3183 [2] bzw. API 5L [3]), normalisierend-gewalzt (N-Güte), ab der Gütestufe L415/X60 ist thermomechanisch-gewaltes Vormaterial zum Einsatz gekommen (TM-Güte). In der Klasse X52/L360 kann sowohl eine N- als auch eine TM-Güte verwendet werden. Durchgeführt werden die meisten der Versuche an der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH

peratur für unterschiedlich lange Zeiten (7 Tage, 30 Tage) ausgelagert. Untersucht werden zwei Materialien der Festigkeitsklasse L360/X52, ein normalisierend (N-Güte) und ein thermo-mechanisch (TM-Güte) gewalzter Werkstoff, sowie die Güten L415/X60 und L485/X70. Die Messergebnisse in Abbildung 2 zeigen, dass sowohl die Auslagerungszeit als auch der Oberflächenzustand die Menge an aufgenommenem Wasserstoff beeinflusst. Vor allem bei aktivierter Oberfläche kann ein erhöhter Wasserstoffgehalt im Werkstoff gegenüber der nicht aktivierten Oberfläche festgestellt werden. Mit steigender Beladungszeit nimmt auch der Wasserstoffgehalt zu. Ob nach den 30 Tagen Auslagerung eine Sättigung erreicht ist, kann aus den Ver-

der Wasserstoff die Möglichkeit in den Stahl einzudringen und zu kritischen Stellen im Gefüge zu diffundieren. Glatte Rundzugproben aus verschiedenen Festigkeitsklassen der Mannesmann H2ready Werkstoffe werden unter praxisrelevanten Bedingungen von 80 bar Prüfdruck in reinem, hundertprozentig gasförmigem Wasserstoff (Reinheitsgrad 6,0) getestet. Zusätzlich werden auch Versuche in einem Wasserstoff/Methan- (H_2/CH_4) bzw. Wasserstoff/Erdgas-Gemisch im Verhältnis 25/75 durchgeführt, um die Bedingungen bei einer Beimischung von Wasserstoff ins Erdgasnetz zu simulieren. Als Vergleich dienen Versuche in reiner Stickstoffatmosphäre (Reinheit 5,0) bei ebenfalls 80 bar. Ein Vergleich mit den Werten aus dem Standard-Zugver-

Mannesmann Line Pipe GmbH

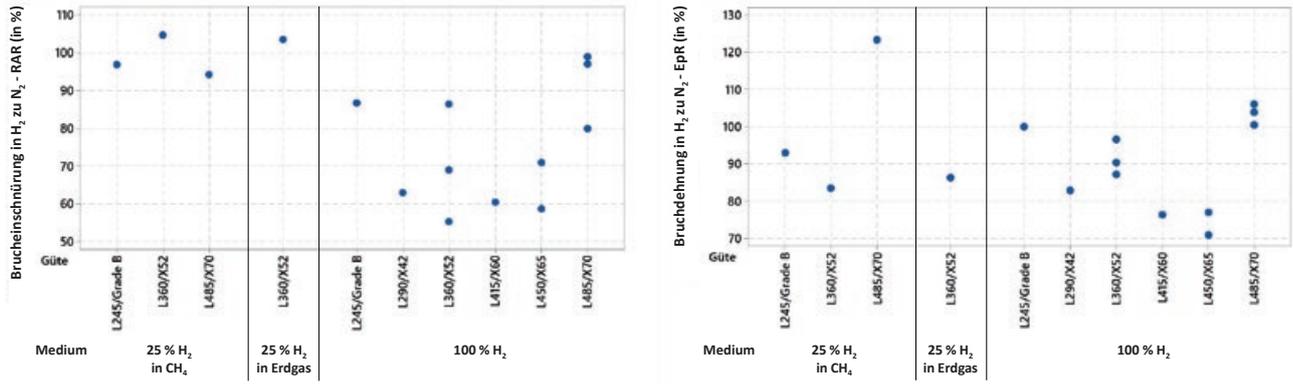


Abb. 3 – Einfluss des Wasserstoffs auf die Brucheinschnürung (links) und die relative plastische Dehnung (rechts) im Slow-Strain-Rate-Zugversuch am Grundwerkstoff (Verhältnis der Prüfungen in reinem Wasserstoffgas bzw. Wasserstoff/Methan-Gemischen zur Prüfung in inertem Referenzmedium)

Mannesmann Line Pipe GmbH

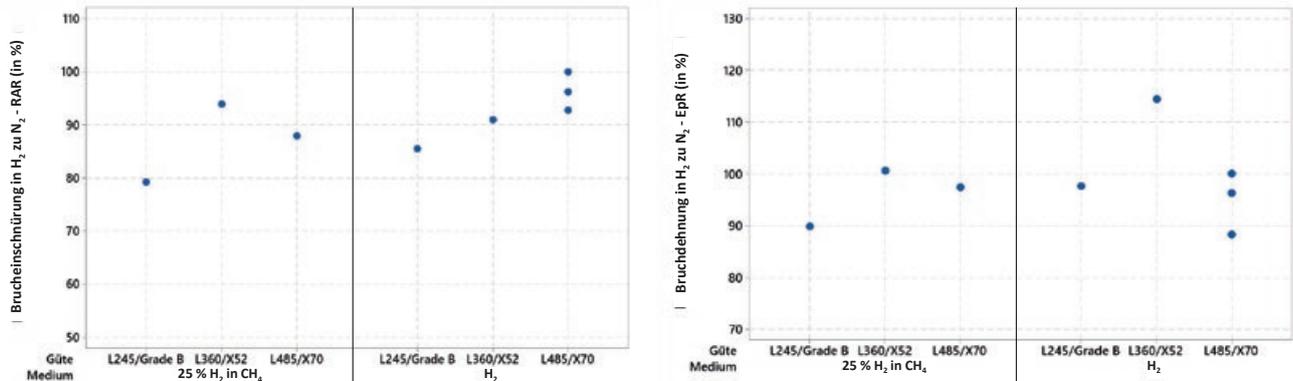


Abb. 4 – Einfluss des Wasserstoffs auf die Brucheinschnürung (links) und die relative plastische Dehnung (rechts) im Slow-Strain-Rate-Zugversuch an der HFI-Naht (Verhältnis der Prüfungen in reinem Wasserstoffgas bzw. Wasserstoff/Methan-Gemischen zur Prüfung in inertem Referenzmedium)

Mannesmann Line Pipe GmbH

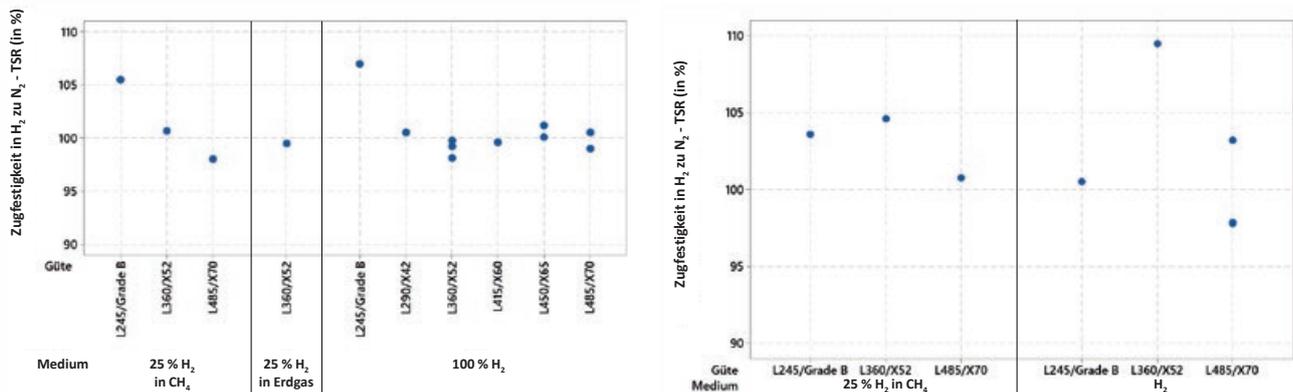


Abb. 5 – Zugfestigkeitskennwerte des Grundwerkstoffs (links) und an der HFI-Naht (rechts) im Slow-Strain-Rate-Zugversuch in reinem Wasserstoffgas bzw. Wasserstoff-Methan-Gemischen im Verhältnis zur Prüfung in Stickstoff als inertes Referenzmedium

such ist aufgrund des unterschiedlichen Prüfaufbaus bzw. Bestimmung der Kennwerte nicht zulässig bzw. sinnvoll.

Zur Bewertung des Wasserstoffs auf die Duktilität werden relative Werte verwendet. Diese errechnen sich aus dem Verhältnis der Prüfung in reiner Wasserstoffatmosphäre bzw. einem Wasserstoff/Methan(Erdgas)-Gemisch zu den Werten

der Prüfung im Referenzmedium Stickstoff. RAR (reduction of area ratio) beschreibt die Brucheinschnürung und EPR (plastic elongation at fracture ratio) die relative plastische Dehnung der Proben nach dem Zerreißen. Ebenso gibt der Wert TSR (tensile strength ratio) das Verhältnis der Zugfestigkeiten zwischen den beiden Versuchsbedingungen wieder.

Die im SSRT-Versuch ermittelten Kennwerte sind in den Abbildungen 3 bis 5 dargestellt. Insgesamt wurden 45 Versuche an Längsproben aus dem Grundwerkstoff und 22 Versuche an Querproben aus der HFI-Längsnaht durchgeführt. Bei den meisten der Werte handelt es sich um Mittelwerte aus zwei oder drei Proben aus einem Rohr. Für die Kennwerte Brucheinschnürung RAR

und relative plastische Dehnung EPR lässt sich der bekannte überwiegend negative Einfluss des Wasserstoffs erkennen. Im Grundwerkstoff liegen die Werte von EPR stets über 70 %, bei den Proben aus der HFI-Naht liegt der kleinste Mittelwert bei 88 %. Auch bei der relativen Brucherscheinung RAR wird bei fast allen Versuchen in Wasserstoffatmosphäre ein geringerer Wert als in Stickstoff gefunden. Ein negativer Einfluss des Wasserstoffs auf die Zugfestigkeiten wird in allen Versuchen nicht beobachtet. Die Reduzierung der Duktilität beeinflusst die Rohrleitungsintegrität nicht, da im normalen Betriebszustand die Auslastung des Rohrleitungsmaterials deutlich unterhalb der Streckgrenze und damit im elastischen Bereich liegt.

Belastung bei vorhandenen Rissen

Im Slow-Strain-Rate-Zugversuch wird das Vorhandensein von möglichen Anrissen im Werkstoff nicht berücksichtigt, welche das Werkstoffverhalten unter Wasserstoffeinfluss zum Teil negativ beeinflussen kann. In vielen Fällen wird für die Auslegung von Rohrleitungen hinsichtlich ihrer Wasserstofftauglichkeit auf die amerikanische Norm ASME B31.12 [12] zurückgegriffen. Diese sieht nach PL - 3.7.1 die Verwendung zweier unterschiedlicher Ansätze vor. Während Option A eine „Prescriptive“

Tabelle 1 – K_{IH} -Ergebnisse

Güte	Test Position	$K_{IH, erreicht}$ in MPa \sqrt{m}
X42N	Grundwerkstoff	62 – 65
X52N	Grundwerkstoff	58 – 64
X60M	Grundwerkstoff	62 – 63
X60M	Grundwerkstoff	85 – 86
X65M	Grundwerkstoff	63 – 64
X70M	Grundwerkstoff	62 – 64
X60M	HFI-Naht	63 – 72

Mannesmann Line Pipe GmbH

Prüfung des Schwellenwertes für den Spannungsintensitätsfaktor (K_{IH})

Nach ASME B31.12 muss das Rohrmaterial einer einwirkenden Spannungsintensität von 55 MPa \sqrt{m} standhalten können. Das wird in einer umfangreichen Prüfung des Werkstoffs auf K_{IH} erreicht. Einwirkende Spannungsintensitäten unterhalb von 55 MPa \sqrt{m} auf die Rohrleitung sind folglich zulässige Belastungen. Die B31.12 referenziert ASME BPVC Sec. VIII Div. 3 [13], nach welcher die K_{IH} -Prüfung durchgeführt werden soll. ASME BPVC Sec. VIII Div. 3 beschreibt die Randbedingungen für eine Prüfung in Druckwasserstoff und gibt je nach Prüfmethode weitere Bedingungen für die Berechnung von K_{IH} vor. Die Versuchsführung selbst und Kennwertermittlung soll nach ASTM E1681 [14] erfolgen.

Bolzen drückt, aufgespannt. Der Belastungsprozess findet in einer Handschuhbox mit Inertgas statt, um die Bildung von Oxiden auf der Oberfläche vor dem Riss zu verhindern, die die Wasserstoffaufnahme während der Prüfung hemmen könnten. Die Probekörper werden dann in eine Hochdruckprüfkammer gelegt. Die Prüfkammer wird evakuiert, um Spuren von Sauerstoff und Feuchtigkeit zu beseitigen. Die Probekörper werden 1.000 Stunden lang bei Raumtemperatur der zuvor festgelegten Verschiebung ausgesetzt. Nach der Prüfung wird die Länge der Ermüdungsrisse gemessen und mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) potenzielles Risswachstum aufgrund von Wasserstoffaufnahme ermittelt. Der K_{IH} -Wert wird dann auf der Grundlage der Verschiebung und der tatsächlichen Risslänge berechnet.

Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Es lässt sich erkennen, dass alle geprüften Güten die Forderung nach dem Mindestwert von 55 MPa \sqrt{m} mehr als erfüllen. Dies gilt auch für den exemplarischen Probensatz aus der HFI-Naht. Am Beispiel des X60M ist bewusst eine deutlich höhere Spannungsintensität aufgebracht. Auch hier ist keine Schädigung der Probe erkennbar. Somit könnte in einer späteren Lebensdauerberechnung diese höhere Belastung als Ab-

» Es zeigt sich, dass alle getesteten Werkstoffe im Rahmen der untersuchten Versuchsbedingungen für den Einsatz als Wasserstofftransportrohr geeignet sind und die Anforderungen der Regelwerke mehr als nur erfüllen. «

Design Methode verwendet, nutzt Option B eine Methode, die den Rohrwerkstoff „Performance“ basiert berücksichtigt. Der hauptsächliche Unterschied beider Ansätze liegt in der Nachweisführung der notwendigen Materialeigenschaften und dem zulässigen Innendruck. Option A verlangt eine Prüfung der Werkstoffzähigkeit nach Charpy. In diesem Fall ist der zulässige Innendruck stark reduziert. Option B verlangt hingegen die Führung des Nachweises für den Schwellenwert der einwirkenden Spannungsintensität in Wasserstoff K_{IH} sowie eine Lebensdaueranalyse basierend auf dem Rissfortschrittsverhalten in Wasserstoff. Wenngleich Option B eine aufwendigere Herangehensweise verfolgt, lässt diese Option dennoch einen höheren Designdruck und folglich eine optimierte wirtschaftliche Nutzung der Rohrleitung zu.

Die Spannungsintensität K_{IH} wird entweder mit der „constant displacement“ oder der „constant load“ Methode ermittelt [8]. In der vorliegenden Untersuchung wird die Methode „constant displacement“ an Proben aus dem Grundwerkstoff und der HFI-Naht verwendet. Für die Messung wird generell ein Satz von drei Proben je Position verwendet (Abb. 6). Die Prüfungen werden in reinem Wasserstoffgas bei 100 bar durchgeführt. Bei der Probenvorbereitung wird eine Probe vorerst maschinell gekerbt und anschließend mittels zyklischer Belastung ein Anriss eingebracht, um einen konservativen Spannungszustand für die Prüfung zu erreichen. Um die notwendige Verschiebung zu nutzen, wird eine im Versuch konstant bleibende Belastung mittels einer Schraube, die gegen einen abgeflachten

bruchkriterium verwendet werden, was wiederum zu einer größeren berechneten Lastwechselzahl führen wird. Weitere Versuche mit verschiedenen Werkstoffen bzw. Güten laufen, die sich auf die HFI-Naht und die Wärmeeinflusszone fokussieren. Ebenfalls werden die H2ready Rohrleitungsstähle in ergänzenden Versuchen einer vollständigen Qualifizierung gemäß ASME B31.12 unterzogen, die diese Prüfungen an drei unterschiedlichen Schmelzen eines Werkstoffes fordert.

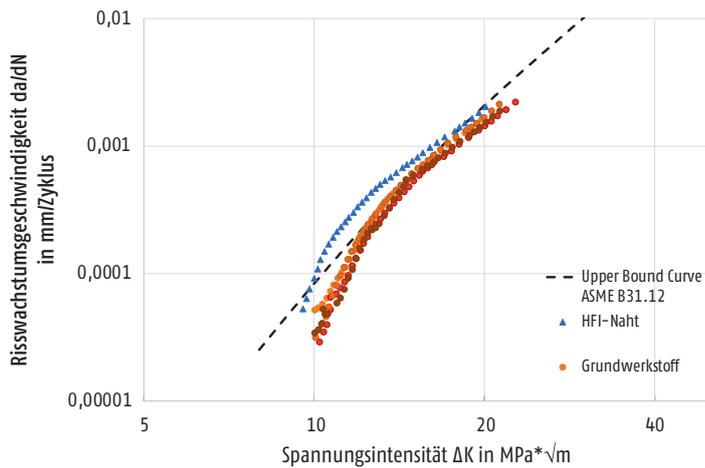
Rissfortschrittsverhalten

Eine Wasserstoff-Transportleitung erfährt im Laufe ihrer Verwendung eine zyklische Belastung in Umfangsrichtung des Rohres durch Veränderungen des Innendruckes. Hierbei kann es vor allem bei vorhandenen Anrissen, ausgelöst z. B. an Ungängen



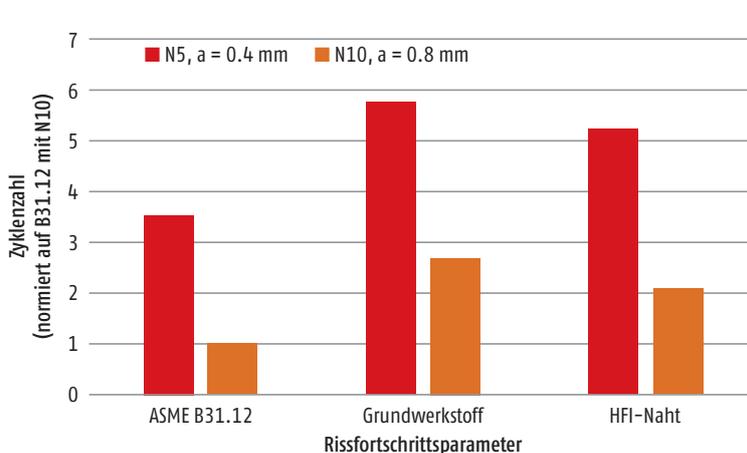
SZMF Duisburg

Abb. 6 – Proben für den K_{IH} -Versuch



Mannesmann Line Pipe GmbH

Abb. 7 – Risswachstumsgeschwindigkeit da/dN pro Zyklus in Abhängigkeit des Spannungsintensitätsfaktors ΔK für den Mannesmann H2ready-Werkstoff X60M



Mannesmann Line Pipe GmbH

Abb. 8 – Einfluss der Anfangsfehlertiefe, Risswachstumskurven und Lage der Probe auf die Lebensdauer (Werte normiert auf Fehlerntiefe 0,8 mm und upper bound curve aus der ASME B31.12)

wie äußeren Kerben oder Einschlüssen im Materialinneren, zu einer fortschreitenden Materialschädigung kommen. Durch die zyklische Beanspruchung hat die Rohrleitung daher prinzipiell eine begrenzte Lebensdauer. Unter dem Einfluss von Wasserstoffdruckgas kommt es bei den typischen Leitungsrohrstählen ab einer Mindestbelastung des Materials zu einem beschleunigten Risswachstum. Hier werden im Vergleich zu einer Belastung in Luft um den Faktor 10 bis 20 höhere Risswachstumsraten gefunden. Die ASME B31.12 basiert auf Untersuchungen, in denen keine Abhängigkeit von der Werkstofffestigkeit des Materials gefunden werden konnte [15]. Daher sind Rohrleitungsstähle in diesem Regelwerk bis X70 einsetzbar. Da das Risswachstumsverhalten von verschiedenen Faktoren abhängt, bietet sich eine fall-spezifische Untersuchung an.

Um das Risswachstumsverhalten zu untersuchen kann ein Rissfortschrittsversuch unter zyklischer Belastung durchgeführt werden [16]. Dabei wird die Risswachstumsgeschwindigkeit da/dN pro Zyklus in Abhängigkeit des Spannungsintensitätsfaktors ΔK bestimmt. In Abbildung 7 ist ein Beispiel anhand des Mannesmann H2ready-Werkstoffs X60M gezeigt. Neben den vier Kurven aus dem Grundwerkstoff und den Daten einer Probe der HFI-Naht ist die in der ASME B31.12 gegebene konservative Kurve zusätzlich mit eingetragen. Diese kann als konservative Beschreibung des Materialverhaltens beim Pipelinedesign verwendet werden, sollte das wahre Werkstoffverhalten nicht bekannt sein.

Die bruchmechanische Berechnung der kritischen Lebensdauer im Rahmen des Leitungsdesigns ist in der ASME B31.12 bzw. in ASME BPVC Sec VIII Div 3 KD-412 angegeben. Als Beispiel für diese Berechnung eines Leitungsrohres auf Basis des oben gezeigten Beispiels des Mannesmann H2ready-Werkstoffs X60M wird ein Rohraußendurchmesser von 406,4 mm, eine Rohrwanddicke von 8,0 mm und als Leitungsdruck 95 bar angenommen. Die Berechnungen werden mit den Lastwechseln entsprechend eines Ratios von $R = 0,5$ durchgeführt. Eine weitere Einflussgröße ist die angenommene Rissgröße zu Berechnungsbeginn. Im hier gezeigten Beispiel wird auf das Testkriterium der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung bei der Rohrherstellung zurückgegriffen. Dabei wird die Detektionsgrenze für Ungenzen im Material anhand von künstlich eingebrachten Fehlern kalibriert. Für Leitungsrohre üblich ist hier das Kriterium U3, mit

einer Tiefe des Fehlers von 10 % der Rohrwanddicke (N10) [17]. Als Vergleich wird das für Mannesmann H2ready-Rohre gedachte schärfere Kriterium U2 verwendet, bei dem der Testfehler eine Tiefe von 5 % der Wanddicke aufweist (N5). Nach BS7910 Annex M6.2 wird in der Lebensdauerberechnung eine halb elliptische Fehlergeometrie angenommen. Dadurch ergeben sich bei den Fehlertiefen a von 0,8 bzw. 0,4 mm Fehlerlängen $2c$ von 60 % bzw. 30 % der Rohrwanddicke. Als Abbruchkriterium der Berechnung wird die Spannungsintensität von 55 MPa \sqrt{m} verwendet.

Die Lebensdauerergebnisse sind in Abbildung 8 in Abhängigkeit der Anfangsfehlertiefe, der verwendeten Risswachstumskurve und der Entnahmeposition der Probe gezeigt. Dabei sind die Werte zum besseren Vergleich auf den Basis-Berechnungsfall mit einer Fehlertiefe von 0,8 mm und der Hüllkurve aus der ASME B31.12 normiert. Es lässt sich erkennen, dass diese Kombination der Eingangsgrößen der konservativste Fall ist. Werden die wahren Werkstoffeigenschaften im Rissfortschrittsversuch des X60M verwendet, so ergeben sich um etwa 2- bis 2,5-fach höhere Werte bis zum Erreichen der kritischen Zyklenzahlen. Eine Berücksichtigung der geringeren Anfangsfehlertiefe von 0,4 mm wirkt sich noch deutlich positiver aus. So zeigen sich um 2- bis 3,5-mal höhere Zyklenzahlen. Somit können gegenüber dem konservativen Szenario im Basisfall mehr als 5-fache Zyklenzahlen erreicht werden. Dies ermöglicht, beim Leitungsdesign eine Überdimensionierung zu vermeiden oder auch die Sicherheit bzw. Sicherheitsreserven zu erhöhen. Grundsätzlich werden als effektivste Parameter zur Erhöhung der Lebenserwartung bzw. der Sicherheit der Rohrleitung die Vermeidung einer Wasserstoffadsorption in den Werkstoff, eine Reduzierung der Anfangsfehlergröße, die Verbesserung des Rissfortschrittverhaltens und eine Verringerung der Auslastung identifiziert. Weitere Berechnungsbeispiele und Werkstoffe finden sich in der Literatur [8].

Zusammenfassung und Ausblick

Die Mannesmann Line Pipe GmbH beschäftigt sich derzeit intensiv mit der Untersuchung ihrer H2ready-Werkstoffe, die für alle typischen Leitungsrohrgüten und für alle infrage kommenden Abmessungen aus dem Produktportfolio für den Transport des gasförmigen Energieträgers Wasserstoff zur Verfügung stehen. Hier wurden nun die meisten der in letzter Zeit

durchgeführten Untersuchungen vorgestellt und kurz diskutiert. Hierzu gehören Versuche zur Wasserstoffaufnahme, quasistatische Versuche im langsamen Zugversuch, Materialcharakterisierungen hinsichtlich des Werkstoffwiderstands gegen Rissausbreitung bei statischer Belastung (Spannungsintensität K_{IH}) und der Risswachstumsgeschwindigkeit unter zyklischer Beanspruchung. Es zeigt sich, dass alle der getesteten Werkstoffe im Rahmen der untersuchten Versuchsbedingungen für den Einsatz als Wasserstofftransportrohr geeignet sind und die Anforderungen der Regelwerke mehr als nur erfüllen. Dabei wurden alle Untersuchungen in reinem Wasserstoffgas oder einem Erdgas-Wasserstoff-Gemisch bei Drücken durchgeführt, die für das Hochdrucknetz relevant sind.

Die Wissensbasis wird laufend durch neue Untersuchungen erweitert bzw. vervollständigt. So laufen derzeit u. a. auch Betrachtungen zur Wirkung von „Verunreinigungen“ des Gases, wie beispielsweise leichte Sauerstoffgehalte H_2S aus der Speicherung des Wasserstoffgases in einer Salzkaverne, die vollständige Materialqualifizierung laut der Regelwerke sowie eine Weiterentwicklung von Versuchstechniken und einer Evaluierung von neuen Versuchen, die eine noch bessere Bewertung des Materialverhaltens für die Einsatzbedingung erlauben.

Literatur

- [1] Tangermann, S.: Windgas für die Energiewende. Vortrag auf dem 7. Deutschen Wasserstoff Congress 2016, 05.07.2016, Berlin.
- [2] DIN EN ISO 3183: 2018-09 „Petroleum and natural gas industries – Steel pipe for pipeline transportation systems“.
- [3] API Specification 5L, 46th edition (2018-04): Specification for Line Pipe.
- [4] Tröger, M.; Bosch, C.; Wiart, J.-N.; Meuser, H.; Knoop, F.M.; Brauer, H.; Schröder, J.: Investigations on Hydrogen assisted cracking of Welded High-Strength Pipes in Gaseous Hydrogen. Second International Conference on Metals & Hydrogen (SteelyHydrogen 2014), Gent (Belgium), May 5–7th.
- [5] Tröger, M.; Bosch, C.; Brauer, H.: Untersuchungen zur Beständigkeit hochfester HFI-geschweißter Rohre für den Wasserstofftransport. Oldenburger Rohrleitungsforum 2014, S. 233/43 (Proc. Conf.).
- [6] Brauer, H.; Simm, M.; Wanzenberg, E.; Henel, M.: Transport von gasförmigem Wasserstoff via Pipelines? Aber sicher! – H2 by Mannesmann. 3R 10/11 (2018), S. 63/7.

[7] Brauer, H.; Simm, M.; Wanzenberg, E.; Henel, M.: Rohre für den Transport von gasförmigem Wasserstoff – Hy by Mannesmann. Oldenburger Rohrleitungsforum 2019, S. 240/51 (Proc. Conf.).

[8] Golisch, G.; Kalwa, C.; Brauer, H.: Wirkung von Wasserstoffgas auf Stahlrohre – eine bruchmechanische Betrachtung. 3R 10-11 (2021), Vulkan Verlag, Essen.

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

[10] NACE TM0198: Slow Strain Rate Test Method for Screening Corrosion-Resistant Alloys for Stress Corrosion Cracking in Sour Oilfield Service.

[11] DIN EN ISO 7539-7: Korrosion von Metallen und Legierungen – Prüfung der Spannungsrissskorrosion – Teil 7: Prüfung mit langsamer Dehngeschwindigkeit.

[12] ASME B31.12 (2019), „ASME B31.12-2019 Hydrogen Piping and Pipelines“. The American Society for Mechanical engineers, New York, USA.

[13] ASME BPVC (2019), „ASME BPVC Section VIII Division 3 (2019) Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels“. The American Society for Mechanical engineers, New York, USA.

[14] ASTM E 1681: 2013 – Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials.

[15] Slifka, A. J.; Drexler, E. S.; Stalheim, D. G.; Amaro, R. L.; Lauria, D. S.; Stevenson, A. E.; Hayden, L. E.: The Effect of Microstructure on the Hydrogen-Assisted Fatigue of Pipeline Steels. ASME Paper No. PVP2013-97217, 2013.

[16] ASTM E 647: 2015 – Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.

[17] DIN EN ISO 10893-11: 2011-04 „Non-destructive testing of steel tubes – Part 11: Automated ultrasonic testing of the weld seam of welded steel tubes for the detection of longitudinal and/or transverse imperfections“.

Autoren

Dr. Holger Brauer
Dr. Georg Golisch (SZMF)
Mannesmann Line Pipe GmbH
Kissinger Weg
59067 Hamm
Tel.: +49 (0) 2381 420-447
holger.brauer@mannesmann.com
www.mannesmann-linepipe.com

