

Transport von gasförmigem Wasserstoff via Pipelines? Aber sicher! – „H₂ by Mannesmann“

Von Holger Brauer, Manuel Simm, Elke Wanzenberg und Marco Henel

Der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur bekommt gerade in Deutschland einen immer höheren Stellenwert. Neben der Identifizierung der Mobilität als einer der derzeit größten Produzenten des klimaschädlichen Kohlendioxids rückt auch die Industrie immer weiter in diesen Fokus. Zur dringend benötigten Umsetzung der vorgegebenen Klimaziele wird im Rahmen der Energiewende in Deutschland vor allem auf die Elektrifizierung des Straßen-, Schiff- und Bahnverkehrs gesetzt. Um größere Mengen an Energie für die elektrischen Antriebsmotoren wirkungsvoll speichern zu können, wird der Energieträger Wasserstoff favorisiert. Und auch bei der Speicherung großer Mengen an erneuerbar erzeugtem Strom führt zukünftig wohl kein Weg am Wasserstoffgas vorbei. Große Mengen Gas sicher zu transportieren, gelingt nur durch die Nutzung von Pipelines, wie die Erfahrungen mit Erdgas in den letzten Jahrzehnten gezeigt haben. Daher beschäftigt sich die Mannesmann Line Pipe GmbH (MLP) als einer der führenden Hersteller längsnaht-geschweißter Stahlrohre in Europa mit dem sicheren Transport von Druckwasserstoff. Ergebnisse von Korrosionsuntersuchungen an hoch-frequenz-induktions- (HFI-) geschweißten Rohren, werden vorgestellt. Dies bezieht auch Untersuchungen an der Rohrverbindungsnaht mit ein. Alle Versuche zeigten keine Erhöhung der Anfälligkeit gegenüber wasserstoff-beeinflusster Korrosion auf. Grundlage für den wertvollen Beitrag zum Gelingen der Wasserstoff-Energiewende bilden Rohre von MLP, die über den Einsatz modernster Werkstoffe und Herstellverfahren das Premium Wasserstoff-Transportrohr „H₂ by Mannesmann“ zur Verfügung stellen.

Stehen wir vor dem Wasserstoffzeitalter?

In Deutschland herrscht Energiekrise! Am 21. Dezember 2018 ist offiziell Schicht in der letzten Steinkohlezeche Deutschlands in Bottrop. Immer wieder steht der Braunkohletagebau unter heftigem Beschuss durch Bürger und Naturschutzbunde. Der Ausstieg aus der Kernenergie rückt unvermeidlich näher. Eine vollständige Abhängigkeit vom fossilen Brennstoff Erdgas aus Russland ist nicht erwünscht. Und nebenbei kämpft ganz Deutschland mit den (Alt-) Lasten der eigenen Energieträger. Neben den sozialen Komponenten wie Stellenabbau sind hier vor allem die Umweltschäden zu nennen. Die Verstromung der Steinkohle hat große Bereiche verrußt und das Klima massiv geschädigt. Mehrere Zehntausend Bergschadensmeldungen werden pro Jahr durch die Ruhrkohle AG bearbeitet. Große Mengen Wasser müssen im Ruhrgebiet aus oberflächennahen Absenkungen, entstanden durch den Abbau, dauerhaft abgepumpt werden. Damit sollen das Grundwasser und ganze Stadtteile geschützt werden. Beispielsweise läge der Hauptbahnhof in Essen ohne Einsatz von Pumpen 12 m tief unter Wasser [1]. Ganze Landstriche, Wälder und Städte wurden und werden durch den Tagebau vernichtet. Eine Endlagerung aller Brennstäbe aus den Kernreaktoren ist nicht abschließend geklärt.

Für viele kommt da der Umstieg in die alternativen Energiequellen wie Sonne und Wind gerade recht. Dass es auch hier umwelttechnische Herausforderung gibt, die zu lösen sind, liegt in der Natur der Sache. Aber noch einige weitere knifflige Fragestellungen sind mit großem Engagement zu bearbeiten. Etwa die Stabilität der deutschen und europäi-

schen Stromnetze bei Differenzen zwischen volatilem Stromangebot und Nachfrage. Was passiert, wenn im Dunkeln kein Wind weht und viel Strom benötigt wird, oder wenn an einem strahlenden Sommertag eine frische Brise weht, aber niemand Strom abnimmt? Und wie kommt der Strom der großen Windparks in der Nordsee eigentlich in den Süden Deutschlands, wenn dort die Sonne nicht scheint? Der Ausbau der Stromautobahnen mittels erdverlegten Hochspannungs-Gleichstromkabeln (550 kV) innerhalb des geplanten zeitlichen Rahmens, wie von der Bundesregierung angeordnet und im Netzentwicklungsplan 2030 (Version 2019) vom Bund dargelegt, wird in der Öffentlichkeit und von Experten als kritisch angesehen. Hier spielen Aspekte wie die derzeit erst noch in der Erprobung und Qualifizierung befindlichen Kabelsysteme für 550 kV, zu große Eingriffe in die Natur bei der Verlegung, oder Diskussionen zu grundsätzlichen Trassenverläufen eine Rolle.

Ein wichtiger Baustein um viele der offenen Fragen zu beantworten oder sich diesen erst gar nicht stellen zu müssen, kann hier das Power-to-Gas-Konzept liefern. Hierbei wird der über regenerative Quellen erzeugte Strom mittels Elektrolyse in reinen Wasserstoff umgewandelt. Dieser kann dann rückverstromt oder direkt als Energieträger z. B. in Brennstoffzellen verwendet werden. Gerade die Mobilitätsbranche kann in Deutschland ein großer Treiber des „sauberen“ Energieträgers werden. Die Umstellung auf alternative Energien wird von der EU, dem Bund und den Ländern vielfältig gefördert. Zentrale Stellen der Koordination im Bereich nachhaltiger Mobilität sind die von der Bundesregierung betriebene NOW GmbH und das Nationale

Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) der Bundesregierung. Hierbei geht es vornehmlich um die Erhöhung der Anzahl von Brennstoffzellenfahrzeugen aller Art (Pkw, Lkw, Bahn, Schiff) und der Wasserstoff-Tankstellen. Aber ebenfalls für die Industrie wird Wasserstoff als Energieträger oder Prozessgas zunehmend interessant. So lassen sich bei der Verwendung von Wasserstoff zur Erreichung der Klimaziele etwa bei der Roheisen- und Stahlerzeugung erhebliche Mengen Kohlendioxid einsparen (Beispiel siehe das Projekt SALCOS der Salzgitter AG [2]).

Durch die Erzeugung von Wasserstoff kann dann auch gleich eine Anpassung an die realen Verbrauchszyklen im Stromnetz vorgenommen werden. Dies löst sowohl die Speicherung von großen Mengen an Überschussstrom, als auch die Verfügbarkeit von Reserven bei einer Nachfrage die größer als das aktuelle Angebot im Stromnetz ist. Beim Transport großer Mengen an Wasserstoff kann auf die bewährte Technologie der Gas-Pipeline als ökologischste und wirtschaftlichste Lösung zurückgegriffen werden, angepasst natürlich auf das Medium Wasserstoff. So sind schon jetzt z. B. in der EIGA Richtlinie IGC Doc 121/14 [3] niederfeste Leitungsröhrgehüten mit hohen Sicherheitsbeiwerten beim Betrieb zum Ausbau der Infrastruktur zugelassen. Dies basiert auf den guten Erfahrungen der letzten Jahrzehnte mit bereits existierenden Wasserstoff-Leitungen beispielsweise in Deutschland, Europa oder Nordamerika. Einige Beispiele sind in [4-6] genannt. In Deutschland ist der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur Gegenstand von vielfältigen Aktivitäten. So ist beispielsweise in NRW das Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität der EnergieAgentur.NRW aktiv [7]. Im Osten Deutschlands erschließt das Wasserstoff-Netzwerk Hydrogen Power Storage & Solutions e.V. (kurz HYPOS) die Potenziale einer notwendigen Grünen Wasserstoffwirtschaft zur kosteneffizienten Umsetzung der Klima- und Umweltschutzziele mit globalen Marktchancen [5].

Auswirkungen von Wasserstoff auf das Werkstoffverhalten

Für die Einschätzung möglicher Risiken beim Einsatz von Wasserstoff ist es wichtig, dessen Wirkung auf die eingesetzten Werkstoffe der Rohrleitungen zu kennen. Atomarer Wasserstoff kann in den Werkstoff eindringen, durch die Gitterstruktur diffundieren und zu einer Anreicherung von Wasserstoff im Metallgitter führen. Wasserstoff-beeinflusste Korrosion des Materials kann die Folge sein und äußert sich oftmals in einer Abnahme der Duktilität.

Voraussetzung, um in den Werkstoff einzudringen, ist das Vorliegen von Wasserstoff in atomarem Zustand. Beim Einwirken von gasförmigem (Druck-)Wasserstoff müssen die Wasserstoffmoleküle an der Metalloberfläche dissoziieren, um eine Durchtrittsreaktion des Wasserstoffatoms und die anschließende Absorption im Metallgitter zu ermöglichen. Nur ein geringer Teil des Wasserstoffes dringt in das Metallgitter ein. Ein Großteil des atomaren Wasserstoffes an der Metalloberfläche rekombiniert wieder zu

Wasserstoffmolekülen. Voraussetzung für das Eindringen von Wasserstoff in den Werkstoff, insbesondere beim Einwirken von gasförmigem Wasserstoff, ist eine aktive saubere Metalloberfläche. Hierfür sind in der Regel Verformungen im plastischen Bereich notwendig.

Die Beständigkeit von Stählen gegenüber wasserstoffbeeinflusster Korrosion wird u. a. durch Werkstoffparameter wie Festigkeit, Mikrostruktur und das Vorhandensein von mikrostrukturellen Inhomogenitäten (Wasserstoff-Fallen) beeinflusst. Zu den Auswirkungen von Wasserstoff-beeinflusster Korrosion auf den Werkstoff gibt es in der Literatur zahlreiche Untersuchungen. Ein Großteil bezieht sich auf Slow Strain-Rate Tensile Tests, d. h. Zugversuche mit niedriger Dehnrate unter Druckwasserstoff. Vor allem bei niederfesten Werkstoffgütern, aber auch an höherfesten Leitungsröhrgehüten wie API 5L X80 [8], ist bei statischer Belastung kein Einfluss von Druckwasserstoff auf die Festigkeit in Zugversuchen bekannt. Ein deutlicher negativer Einfluss durch das Einwirken von Wasserstoff wird allerdings auf die Duktilität beobachtet und äußert sich in einer Abnahme der Bruchzähigkeit und Brucheinschnürung und einer Zunahme des Spröbruchanteils [9-15]. Bei höherfesten Leitungsröhrgehüten wurde ein deutlicher Rückgang der Bruchdehnung mit abnehmender Dehnrate gemessen [16].

Bei der Erzeugung einer Rissausbreitung unter zyklischer Belastung sind Bereiche hoher Spannungskonzentration, wie z. B. Kerben, Risse, Oberflächenfehler (hoher Kerbfaktor) besonders gefährdet, da es hier zu einer lokal auftretenden plastischen Verformung kommen kann, obwohl die Gesamtverformung im elastischen Bereich liegt [12]. Dies gilt in ähnlicher Weise für Bereiche geringerer Härte, die gegenüber dem Auftreten einer plastisch-zyklischen Beanspruchung anfällig sind [11].

Verhalten neuer Rohrleitungswerkstoffe

Beim Einsatz von Rohrleitung zum Transport von Wasserstoff wurden stets Werkstofffestigkeiten bis zur maximalen Güte L360 (API 5L X52) betrachtet oder zum Einsatz gebracht. So beschränkt auch die EIGA IGC Doc 121/14 im Bereich der niedriglegierten Güten die Festigkeitsklasse auf maximal X52. Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und für einen ressourcenschonenden Einsatz von Rohstoffen bietet sich die Erhöhung der Rohrfestigkeit und damit die Möglichkeit der Wanddickenreduzierung an. Dies bedeutet eine Verringerung der eingesetzten Stahlmenge und somit auch einen reduzierten Energiebedarf bei der Herstellung. Die Auswirkung von Wasserstoff auf höhere Werkstoffgüten unter realen Einsatzbedingungen am Endprodukt (Rohr) sind aber bisher kaum untersucht. Hierzu hat die Mannesmann Line Pipe GmbH (MLP) mit Hilfe der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF) Untersuchungen an der Güte X70 durchgeführt, um höherfeste Güten hinsichtlich ihrer Beständigkeit gegenüber wasserstoff-beeinflusster Korrosion und damit ihrer Eignung für den Wasserstofftransport zu bewerten. Untersucht wurde hochfrequent-induktiv (HFI) geschweißtes Rohrmaterial der MLP. Es wurden Slow Strain-Rate Tensile Tests an Rundzugproben aus dem Grund-

werkstoff sowie aus der HFI-Schweißnaht unter praxisrelevanten Bedingungen von 80 bar Wasserstoff und 80 bar Stickstoff als Referenzmedium durchgeführt. Die Proben wurden bei verschiedenen Dehnraten unter einsinniger Belastung bis zum Bruch geprüft.

Weder im Grundwerkstoff noch im Schweißnahtbereich wurde ein signifikanter Einfluss des Wasserstoffes auf den Verlauf der Zugkurven oder auf die maximale Zugspannung und somit auf die Festigkeit des Werkstoffes festgestellt. Brucheinschnürung und plastische Dehnung der untersuchten Proben als Kennwerte der Duktilität zeigten eine hohe Beständigkeit des Materials gegenüber wasserstoff-beeinflusster Korrosion. Die fraktografische Bewertung der Bruchflächen nach dem Zerreißen der Zugproben in Stickstoff und Wasserstoff zeigte einen duktilen Bruchverlauf ohne Anzeichen eines Sprödbruchs. Eine erhöhte Anfälligkeit des Schweißnahtbereiches gegenüber wasserstoff-beeinflusster Korrosion konnte nicht festgestellt werden. Die Untersuchungen und Ergebnisse im Detail sind in [17] und [18] dargestellt.

Neben dem Verhalten des Rohres sind im nächsten Schritt auch die Rohrverbindungsnahte untersucht worden. Diese werden üblicherweise nach dem Verfahren des Metallschutzgasschweißens (GMAW) hergestellt. So erzeugte Rohrverbindungsnahte sind ebenfalls Bestandteil von Untersuchungen unter dem Einfluss von reinem Wasserstoff.

Für die Herstellung der Rundnaht wurde von der MLP Rohrleitungsmaterial der Güte X70 mit der Abmessung 508 x 9,525 mm zur Verfügung gestellt. Die Rundnaht wurde im Schweißlabor der SZMF nach dem Verfahren des Metallschutzgasschweißens (GMAW) hergestellt. Ein Makroschliffbild der Schweißnahtverbindung ist in **Bild 1** dargestellt. Analog zu den oben beschriebenen Untersuchungen an Grundwerkstoff und HFI-Längsnaht wurden auch an dem Rundnahtmaterial Slow Strain-Rate Tensile Tests in 80 bar Wasserstoff und 80 bar Stickstoff als Referenzmedium durchgeführt. Die Proben wurden unter einsinniger Belastung bis zum Bruch bei einer Dehnrade von $2,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ geprüft. Neben den Standardrundzugproben wurden zur Prüfung der Rundnaht auch Vollwandproben ohne Abarbeitung der Schweißnaht verwendet, um den Einfluss einer möglichen Kerbwirkung zu beurteilen (siehe **Bild 2**). Die an den Rundzugproben ermittelten Spannungs-Dehnungskurven sind in **Bild 3** dargestellt. Die Proben in Stickstoff und Wasserstoff zeigen einen vergleichbaren Kurven-

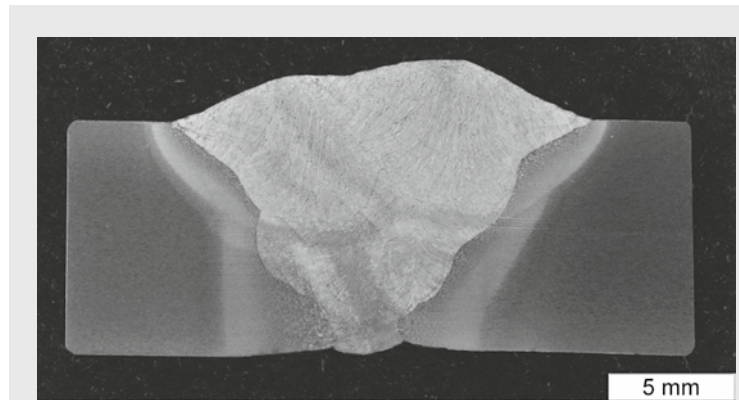


Bild 1: Makroaufnahme der GMAW-Rundnaht

verlauf. Ein signifikanter Einfluss des Wasserstoffes auf den Verlauf der Zugkurven konnte nicht festgestellt werden. Zur Bewertung der Duktilität wurden die Brucheinschnürung und die plastische Dehnung ermittelt sowie die Bruchflächen der Proben fraktografisch bewertet. Die relative Brucheinschnürung Z_{rel} wird aus dem Verhältnis der Brucheinschnürungen der Proben nach dem Zerreißen in Wasserstoff Z_{H_2} und in Stickstoff Z_{N_2} bestimmt, die relative plastische Dehnung E_{PR} aus dem Verhältnis der plastischen Dehnung der Proben nach dem Zerreißen in Wasserstoff E_{PH_2} und in Stickstoff E_{PN_2} .

$$Z_{rel} = \frac{Z_{H_2}}{Z_{N_2}} \cdot 100 \% \quad E_{PR} = \frac{E_{PH_2}}{E_{PN_2}} \cdot 100 \%$$

Die berechneten Zähigkeitswerte E_{PR} und Z_{rel} sowie die maximalen Spannungen σ_{max} der Proben in den zwei Medien sind in **Tabelle 1** zusammengefasst. Eine relative plastische Dehnung von 96,5 % und eine relative Brucheinschnürung von 91,7 % verweisen auf eine hohe Beständigkeit der Proben gegenüber wasserstoff-beeinflusster Korrosion unter den

Tabelle 1: Ergebnisse der Slow Strain-Rate Tensile Tests an den Rundzugproben der GMAW-Rundnaht

Material	σ_{max} [N/mm ²]		E_{PR} [%]	Z_{rel} [%]
	N ₂	H ₂		
X70-Rundnaht	659,9	693,6	96,5	91,7



Bild 2: Rundzugprobe a) und Vollwandprobe b) für den Slow Strain-Rate Tensile Test

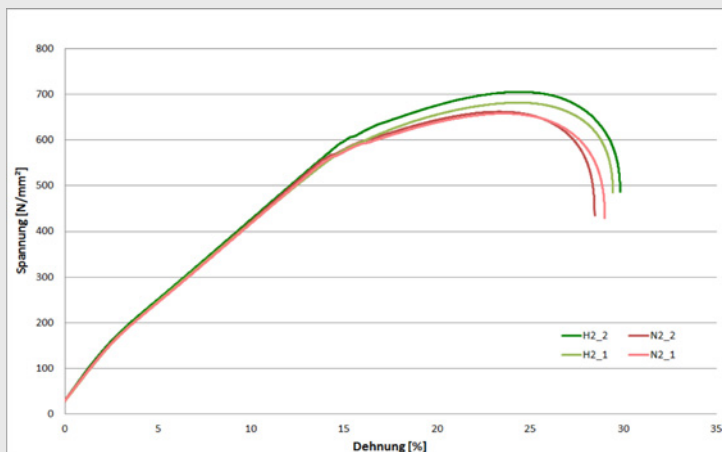


Bild 3: Spannungs-Dehnungskurven der Rundzugproben



Bild 4: Vollwandprobe nach SSRT, in Stickstoff getestet

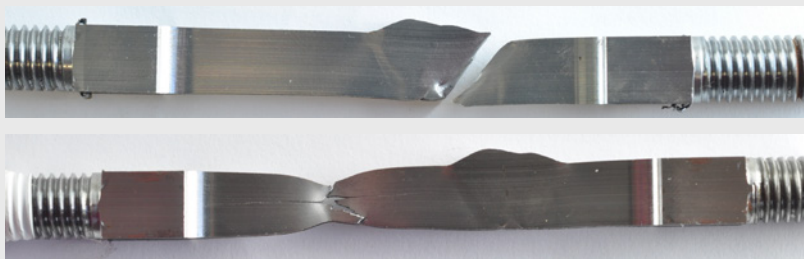


Bild 5: Vollwandproben nach SSRT, in Druckwasserstoff getestet

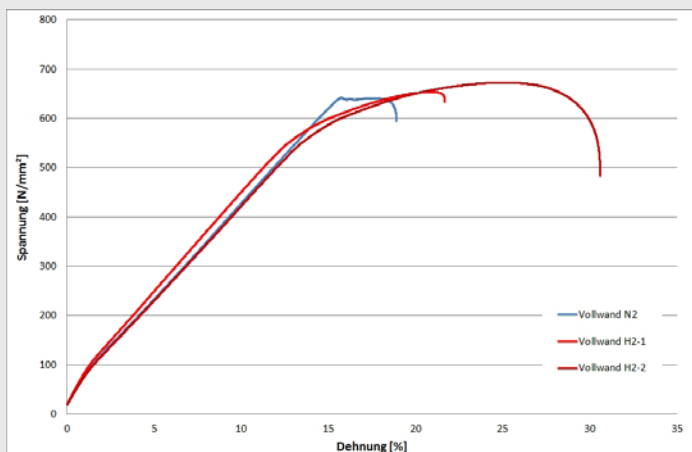


Bild 6: Spannungs-Dehnungskurven der Vollwandproben

getesteten Bedingungen. Die fraktografische Bewertung der Bruchflächen nach dem Zerreißen der Zugproben in Stickstoff und Wasserstoff zeigte einen duktilen Bruchverlauf ohne Anzeichen eines Sprödbruchs.

Um die Lage des Bruchs zur Schweißnaht zu dokumentieren, wurden die Proben nach dem Test gebeizt. Alle getesteten Proben sind im Grundwerkstoff gebrochen. Eine erhöhte Anfälligkeit der Rundnaht für wasserstoffbeeinflusste Korrosion konnte in diesen Untersuchungen also nicht festgestellt werden.

Allerdings wurde sowohl bei einer in Druckwasserstoff als auch bei einer in Stickstoff getesteten Vollwandprobe eine eindeutige Kerbwirkung festgestellt. Diese Proben sind in der Wärmeeinflusszone gebrochen (**Bild 4** und **Bild 5**). Die Spannungs-Dehnungskurven der Vollwandproben (**Bild 6**) zeigen ein deutlich verändertes Bruchverhalten aufgrund der Kerbwirkung. Ein signifikanter Einfluss des Wasserstoffes auf den Verlauf der Zugkurven konnte aber nicht festgestellt werden. Aufgrund der veränderten Probengeometrie konnten Brucheinschnürung und plastische Dehnung als Kennwerte der Duktilität nicht ermittelt werden.

Zu beachten ist hier, dass es sich bei den vorgestellten Ergebnissen um exemplarische Untersuchungen einer einzelnen Rundnaht aus einer Laborschweißung handelt. Da die Beständigkeit gegenüber wasserstoffbeeinflusster Korrosion abhängig vom verwendeten Rohrmaterial und vom Schweißverfahren zur Erstellung der Rundnaht sein kann, sollten zukünftige Untersuchungen an weiteren Rundnähten im Einzelfall durchgeführt werden. So lässt sich eine gute Beständigkeit sicher verifizieren.

Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund des Ziels einer deutlichen Reduzierung der Kohlendioxid-Erzeugung durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern, erlangt der Energieträger Wasserstoff zunehmend einen immer höheren Stellenwert. Gerade die Speicherung von überschüssiger Energie aus regenerativen Quellen ist hier Haupttreiber. Damit verbunden ist der Einsatz bei der Rückverstromung oder der direkten Nutzung als Prozessgas. Beim Thema Wasserstoff kommt vor allem dem sicheren Transport und der Speicherung großer Mengen Gas besondere Bedeutung zu. Speziell für den Transport von reinem Druckwasserstoff entwickelte Stahlrohre für Pipelines der Mannesmann Line Pipe GmbH liefern hierzu einen

wertvollen Beitrag („H₂ by Mannesmann“). Über den Einsatz modernster Werkstoffe und Herstellverfahren sowohl im Bereich der Stahl- und Vormaterialherstellung als auch in der HFI-Rohrproduktion wird dem Wasserstoffangriff wirkungsvoll begegnet. So konnten Untersuchungen der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH eindrucksvoll nachweisen, dass auch Rohre höherer Festigkeitsklassen von MLP unter Druckwasserstoffbelastung auch bei der Herstellung einer feldüblichen Rundnaht keine verstärkte Anfälligkeit gegen wasserstoff-beeinflusste Korrosion zeigten. Weitere Untersuchungen zum Einfluss von Wasserstoff-Mischgasen stehen derzeit im Vordergrund. Diese werden u. a. im HYPOS-Projekt „Pipeline Integrity Management zur Weiternutzung der bestehenden Erdgasinfrastruktur für Wasserstoff“ (H2-PIMS) durchgeführt. Erste Ergebnisse werden auf dem Oldenburger Rohrleitungsforum 2019 vorgestellt.

Literatur

[1] <https://www.handelsblatt.com/technik/das-technologie-update/energie/glueck-auf-und-pumpen-fuer-immer-die-kohlezeit-geht-zu-ende/10013344.html?ticket=ST-8236099-NJjpihVNYkuTo47olyNU-ap2> (13.09.2018)

[2] <http://salcos.salzgitter-ag.com>

[3] EIGA (European Industrial Gases Association) Richtlinie IGC Doc 121/14 "HYDROGEN PIPELINE SYSTEMS"

[4] Ausfelder, F.; Beilmann, C.; Bertau, M.; Bräuninger, S.; Heinzl, A.; Hoer, R.; Koch, W.; Mahlendorf, F.; Metzethin, A.; Peuckert, M.; Plass, L.; Räuchle, K.; Reuter, M.; Schaub, G.; Schiebahn, S.; Schwab, E.; Schüth, F.; Stolten, D.; G, Gisa.; Ziegahn, K.-F: Energy Storage as Part of a Secure Energy Supply. ChemBioEng Reviews 4 (2017), 3, S. 144-210

[5] <http://www.hypos-eastgermany.de/en/the-innovation-project/potentials-of-the-hypos-region/> (29.08.2018)

[6] Brauer, H.; Simm, M.; Wanzenberg, E.; Henel, M.: Wasserstoff: Energieträger der Zukunft – Transport von gasförmigem Wasserstoff via Pipelines. bbr Oktober 2018

[7] http://www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle/brennstoffzelle-wasserstoff-elektromobilitaet/ziele_des_netzwerks_brennstoffzelle_und_wasserstoff_nrw (27.08.2018) Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität der EnergieAgentur.NRW

[8] API Specification 5L, 46th edition (2018-04): Specification for Line Pipe

[9] Gräfen, H.; Pöpperling, R.; Schlecker, H.; Schlerkmann, H.; Schwenk, W.: Zur Frage der Schädigung von Hochdruckleitungen durch Wasserstoff und wasserstoffhaltige Gasgemische. gwf Gas Erdgas (1989) Nr. 1, S. 16-21

[10] Savakis, S.: Dissertation RWTH Aachen, (1985)

[11] Gräfen, H.; Pöpperling, R.; Schlecker, H.; Schlerkmann, H.; Schwenk, W.: CERT-Untersuchungen an Leitungsrohrstählen über eine Korrosionsgefährdung durch wasserstoffhaltige Gase bei hohen Drücken. Werkstoffe und Korrosion, 39, (1988), S. 517

[12] Kußmaul, K; Deimel, P.; Sattler, E.; Fischer, H.: Einfluss von Wasserstoff auf ausgewählte Werkstoffe für den Einsatz bei Transport und Speicherung von Wasserstoff. In: Wasserstoff als Energieträger: SFB 270 Universität Stuttgart, Abschlussbericht 1998

[13] Schmitt, G.; Savakis, S.: Untersuchungen zur Schädigung höherfester niedriglegierter Stähle durch Druckwasserstoff bei statischer und dynamischer Beanspruchung. Werkstoffe und Korrosion, 42, (1991), S. 605-619

[14] Cialone, H.J.; Holbrook, J. H.: Sensitivity of Steels to Degradation in Gaseous Hydrogen. In: Hydrogen Embrittlement: Prevention and Control, ASTM STP962, L. Raymond (Ed.), Philadelphia, (1982), S. 134-152

[15] Xu, K.; Rana, M.: Tensile and Fracture Properties of Carbon and Low Alloy Steels in High Pressure Hydrogen. In: Effects of Hydrogen on Materials. Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference, B. Somerday, P. Sofronis, R. Jones (Ed.), (2009), S. 349-356

[16] Briottet, L; Moro, I; Lemoine, P.: Quantifying the hydrogen embrittlement of pipeline steels for safety considerations. International Journal of Hydrogen Energy, 37, 22, (2012), S. 17616-17623

[17] Tröger, M.; Bosch, C.; Brauer, H.: Untersuchungen zur Beständigkeit hochfester HFI-geschweißter Rohre für den Wasserstofftransport. bbr (2014) Nr. 3, S. 40/5

[18] Brauer, H.; Simm, M.; Wanzenberg, E.; Henel, M.: Wasserstoff: Energieträger der Zukunft – Transport von gasförmigem Wasserstoff via Pipelines. bbr (2018) Nr. 11

SCHLAGWÖRTER: Gasförmiger Wasserstoff, Transport, Wasserstoff-Transportrohr, H₂

AUTOREN



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



MANUEL SIMM
 Mannesmann Line Pipe GmbH, Siegen
 Tel. +49 271 691 246
 manuel.simm@mannesmann.com



Dr. **ELKE WANZENBERG**
 Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH,
 Duisburg
 Tel. +49 203 999 3172
 e.wanzenberg@du.szmf.de
 www.szmf.de



MARCO HENEL
 DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig
 Tel. +49 341 245 124
 marco.henel@dbi-gruppe.de
 www.dbi-gruppe.de