

# Transport von gasförmigem Wasserstoff via Pipelines

Erörtert wird die Entwicklung der Nutzung von Wasserstoff als Energieträger aus regenerativen Quellen in Deutschland. Zum einen werden die bisherigen Forschungsergebnisse der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH zum Einfluss von reinem Druckwasserstoff auf die Werkstoffe der Stahlrohre von Mannesmann Line Pipe zusammengefasst. Entwickelt wurde hieraus ein Spezialrohr für den Transport von Wasserstoff („H<sub>2</sub> by Mannesmann“). Zum anderen werden die laufenden und zukünftig geplanten Untersuchungen im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Innovationsprojektes HYPOS zur Unterstützung des Aufbaus einer Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland vorgestellt.



**An der Tatsache**, dass der globalen und kontinuierlichen Erderwärmung etwas entgegengesetzt werden muss, besteht seit Jahren kein Zweifel mehr. Politik, Wirtschaft und auch jeder Energie-Endverbraucher haben die Zeichen der Zeit erkannt. Besondere Sensibilisierung in der Gesellschaft fand dieses Thema durch den Pariser Klimavertrag COP 21, welcher am 4. November 2016 in Kraft getreten ist und worin sich 196 Staaten völkerrechtlich darauf verständigt haben, dass die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst auf 1,5 °C, im Vergleich zur vorindustriellen Zeit beschränkt wird. Zwar lieferte dieses Abkommen im Nachgang vermehrt Diskussionsbedarf, bildet aber trotzdem eine Basis in der heutigen Zeit. Nicht erst aufgrund dessen haben auch Deutschland und die EU den Klimaschutz durch konkrete Ziele verstärkt in den Vordergrund der Betrachtung gerückt. Demgemäß wurden z. B. Pläne aufgestellt, welche die Treibhausgasemission seitens Deutschland im Vergleich zum Jahre 2005 im Jahr 2020 um 40 % reduzieren sollen (Klimaschutzplan 2050); im Jahr 2050 sogar um 80 bis 95 %. Die EU hat, daran angelehnt, ähnliche Ziele und weicht prozentual nur geringfügig von den Maßgaben Deutschlands ab [1]. Dies entspräche einer nahezu vollständigen Treibhausgasneutralität aller Sektoren. Erhebliche Anstrengungen werden zur Transformation der Energieversorgung notwendig, da ein Großteil der Treibhausgasemissionen energiebedingt ist.

In diesem Zusammenhang gewinnt Wasserstoff zunehmend an Bedeutung und es kommen für dessen Einsatz verschiedenste Anwendungsfelder in Betracht. Es ist u. a. möglich, mittels Power-to-Gas-Konzepten durch die Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyseure Strom zu speichern und eine Anpassung an die realen Verbrauchszyklen vorzunehmen. Dies sollte vortrefflich durch den Einsatz erneuerbarer Energien geschehen. Überdies erlangt Wasserstoff als „sauberer“ Energieträger im Sektor der Mobilität höchste Bedeutung.

Demnach werden die neuen Anwendungsfelder zwangsläufig zu einem Ausbau der Infrastruktur, gemäß heutigem Stand der Technik via Pipeline, führen. Hier bedarf es angemessener Auslastungen des verwendeten Leitungsrohrmaterials, um einen wirtschaftlichen Transport von Wasserstoff via Stahl-Pipeline darstellen zu können. Niederfeste Leitungsröhrigkeiten mit hohen Sicherheitsbeiwerten sind als Resultat auf ihre Verwendbar-

keit und Eignung für den Wasserstofftransport vielfältig untersucht, getestet und für den Einsatz freigegeben worden. Höherfeste Güten werden zwar derzeit für den Transport von Wasserstoff noch nicht in Regelwerken berücksichtigt, es ist allerdings davon auszugehen, dass der Nachweis der Eignung dies zeitnah ermöglichen wird.

Im Allgemeinen stellen optimale Lösungen für den Bedarf an neuen Gasleitungen niedrig legierte C-Mn-Werkstoffe dar, die beständig gegenüber Wasserstoffbeeinflusster Korrosion sind. So wurde noch bis Mitte der 1990er-Jahre Wasserstoff als Bestandteil des Stadtgases (Gemisch aus bis zu 50 Vol.-% Wasserstoff, Methan, Stickstoff und Kohlenmonoxid) erzeugt, transportiert, gespeichert und verteilt. Bis zur heutigen Zeit sind zwar etliche Entwicklungsschritte durchlaufen worden, jedoch wird sich gegenwärtig fortführend mit der Thematik einer Beimi-

hung der Anzahl von Brennstoffzellenfahrzeugen wird von der NOW auch der Ausbau des Wasserstoff-Tankstellennetzes unterstützt. Bei der Versorgung der ersten Wasserstoff-Tankstellen kommen aktuell und werden auch in der Zukunft zunächst mobile Transportkapazitäten zum Einsatz kommen (z. B. straßengebundene Trailer). Die Transporttechnologie ist hier seit Jahren Stand der Technik. Eine Übersicht über aktive und geplante Wasserstoff-Tankstellen kann z. B. der App „H2.Live“ entnommen werden. Beim weiteren Ausbau und größeren benötigten Mengen stellen jedoch Rohrleitungen die ökologischste und wirtschaftlichste Lösung dar. So errechnete Krieg in seiner Dissertation [2] allein für Deutschland, dass für das überregionale Transmissionsnetz eine gesamte Länge an Pipelines von 12.000 km und auf lokaler Ebene ein Distributionsnetz von 36.000 km Länge benötigt wird. Derzeit sind jedoch erst

---

## » Wasserstoff ist einer der Schlüsselfaktoren bei der Erreichung der Klimaziele nach COP 21. «

---

schung von Wasserstoff zu Erdgasen und dessen Auswirkung auf die Rohrleitungen inklusive Zubehör (Verdichter, Armaturen etc.) beschäftigt.

Ebenfalls bedingt dadurch, dass es mittlerweile erwiesen ist, dass Mobilität mit Batteriespeichern nicht die Technologie der Zukunft sein kann (Reichweite der Fahrzeuge, Betankungsdauer der Pkw, benötigte Energie für Schwerlastfahrzeuge sowie Schiffe, Flugzeuge, Züge, Rohstoffverfügbarkeit und -nutzung für große Mengen Batteriespeicher etc.), wird letztendlich wohl kein Weg an dem Medium Wasserstoff vorbeigehen.

### **Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur**

Den Haupttreiber beim Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland stellt der Mobilitätssektor dar. Die Umstellung auf alternative Energien wird von der EU, dem Bund und den Ländern vielfältig gefördert. Zentrale Stelle der Koordination im Bereich nachhaltiger Mobilität stellt die von der Bundesregierung betriebene NOW GmbH dar. Diese koordiniert und steuert u. a. das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) der Bundesregierung. Neben der Förderung und Erhö-

„zaghafte“ kleinlosige mobile europäische Lösungen verfügbar: Alstrom Zug Coradia iLint [3], Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid [4] etc. In fernöstlichen Ländern wie China, Japan und Südkorea hingegen ist die Wasserstoff-Technologie im Bereich der Mobilität deutlich weiter vorangeschritten. Dazu ein Beispiel: „Chinas Fabriken bauen tausende Brennstoffzellenbusse pro Jahr. Und in anderen Teilen der Welt (u. a. auch Deutschland) wird diskutiert, ob man ein Demonstrationsprojekt mit zehn Bussen durchführt oder ob nicht sogar sechs auch reichen“ [5]. Auch wenn in Deutschland teilweise noch die Wahrnehmung zum Thema Wasserstoff wie zitiert ist, zeichnet sich nun auch politisch eine steigende Dynamik ab. Wasserstoff wird eine Hauptfunktion als Energieträger der Zukunft vorausgesagt. In einer Wasserstoff-Studie von Shell wird beispielsweise als wichtiger Baustein im Szenario, bis 2050 die Klimaerwärmung auf maximal 2 °C zu begrenzen, angegeben, den Bestand an Brennstoffzellenfahrzeugen weltweit auf ca. 113 Mio. zu erweitern [6]. Dies würde einen Bedarf von rund 10 Mio. t Wasserstoff bedeuten. Derzeit wird weltweit bereits intensiv die Erarbeitung von Normen und Regelwerken

für die Verwendung von Wasserstoff als Energieträger und Distribution unterstützt. Tabelle 1 gibt einen (unvollständigen) Überblick.

Auch wird Wasserstoff als Energieträger oder Prozessgas für die Industrie zunehmend interessant – will auch diese ihren notwendigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten. So lassen sich beispielsweise bei der Roheisen- und Stahlerzeugung erhebliche Mengen Kohlendioxid durch die Verwendung von Wasserstoff einsparen. Bestes Beispiel liefert hier das Projekt SALCOS der Salzgitter AG [7].

Die Errichtung und der Betrieb von Wasserstoff-Netzen ist grundsätzlich Stand der Technik und entsprechend im Grundsatz der Verordnung über Rohrfernleitungsanlagen (Rohrfernleitungsverordnung) normativ geregelt [8]. Auch im europäischen Bereich existieren erste Empfehlungen, wie z. B. die EIGA-Richtlinie IGC Doc 121/14 (EIGA = European Industrial Gases Association). Weltweit sind an verschiedener Stelle Wasserstoff-Leitungen aus niederfesten Werkstoffen seit Jahrzehnten im Einsatz. So betreibt beispielsweise AirLiquide seit 1966 ein etwa 290 km langes Wasserstoff-Leitungsnetz (Betriebsdruck 65 bis 100 bar) in Frankreich/Belgien/Niederlande [9].

In Deutschland sei hier exemplarisch eine H<sub>2</sub>-Leitung im Ruhrgebiet (NRW) von BOC Gases (Hüls AG) mit einer Länge von 215 km und einem Betriebsdruck von

25 bar sowie einem Leitungsdurchmesser von 168 bis 273 mm genannt. Diese wird seit 1938 sicher betrieben. In Ostdeutschland existiert im Industriegebiet Leuna-Bitterfeld-Wolfen eine Leitung der Linde AG, Länge 100 km, Betriebsdruck 20 bar (Abb. 1).

Um diese Leitungen fokussieren sich in Deutschland auch Aktivitäten rund um das Thema Wasserstoff. In NRW ist z. B. das Netzwerk Brennstoffzelle, Wasserstoff und Elektromobilität der Energie-Agentur.NRW aktiv. Die Ziele des Netzwerks sind im Einzelnen [11]:

- Weiterentwicklung der Technologien in den Bereichen Brennstoffzelle, Wasserstoff und Elektromobilität
- Festigung NRW als international anerkannter Standort für Elektromobilität, Brennstoffzellen und Wasserstoff
- Markteinführung von Anwendungen in den Bereichen Brennstoffzelle, Wasserstoff und Elektromobilität
- Nutzung von nachhaltig erzeugtem Wasserstoff in Energie und Verkehr
- Integration erneuerbarer Energien in den Verkehrssektor

Im Osten Deutschlands verfolgt das Wasserstoff-Netzwerk Hydrogen Power Storage & Solutions e. V. (kurz HYPOS) die Erschließung der Potenziale einer notwendigen grünen Wasserstoffwirtschaft zur kosteneffizienten Umsetzung der Klima- und Umweltschutzziele mit globalen Marktchancen. Zum einen wird dazu inten-

siv am Aufbau des Netzwerks zur Herausbildung von Wissen und Kompetenzen bei Unternehmen und Forschungseinrichtungen gearbeitet. Zum anderen treibt die durch das Zwanzig20-Programm des BMBF geförderte Initiative die Technologieentwicklung von der Wasserstoff-Herstellung bis zur -Verwertung in verschiedenen F&E-Vorhaben an.

Basierend auf dem Ansatz, die in dieser Kombination in Deutschland einmalig vorkommenden regionalspezifischen Merkmale des mitteldeutschen Chemiedreiecks zu nutzen, besitzt die bestehende Wasserstoff- und Erdgasinfrastruktur eine Schlüsselrolle in der HYPOS-Strategie. Im Rahmen HYPOS findet sich auch der Aspekt der Beimischung von Wasserstoff in die existierenden Erdgasnetze und den sich daraus ergebenden Fragestellungen zur Materialverträglichkeit, die im HYPOS-Projekt „H<sub>2</sub>-PIMS“ untersucht werden, wieder.

Das Projekt umfasst die Entwicklung eines Pipeline Integrity Management Systems (PIMS) zum Betrieb von Erdgasleitungen mit wasserstoffreichen Gasen. Neben der Entwicklung des PIMS-Moduls wird eine Roadmap sowie ein Handlungsleitfaden zur Umnutzung bestehender Transportleitungen erarbeitet. Im Fokus stehen dabei die Qualifikation der Leitungen für 10 Vol.-% Wasserstoff sowie die vollständige Umwidmung auf einen Betrieb 100 % Wasserstoff. Die Entwicklung des PIMS-Moduls erfolgt auf einer umfangreichen

Tabelle 1 – Übersicht relevanter Wasserstoff-Regelwerke

Regelwerk	Ausgabe	Inhalt
DIN EN ISO 17268	2017-03	Gasförmiger Wasserstoff – Anschlussvorrichtungen für die Betankung von Landfahrzeugen
ISO/TS 15869	2009-02	Gasförmiger Wasserstoff und Wasserstoffgemische – Kraftstofftanks für Landfahrzeuge
ISO/DIS 22734	2018-02	Wasserstoffherzeuger auf der Grundlage der Elektrolyse von Wasser – Industrielle, gewerbliche und häusliche Anwendungen
BS DD ISO/TS 20100	2009-11	Gaseous hydrogen – Fuelling stations
ISO/DIS 14687	2018-06	Beschaffenheit von Wasserstoff als Kraftstoff – Spezifizierung des Produkts
BS ISO 15399	12/3025963 DC, 2012-08-30	Gaseous hydrogen. Cylinders and tubes for stationary storage
ISO 13984	1999-03	Flüssigwasserstoff – Schnittstelle für die Betankung von Landfahrzeugen
ISO 13985	2006-11	Flüssigwasserstoff – Kraftstofftanks für Landfahrzeuge
ISO/TR 15916	2015-12	Basic considerations for the safety of hydrogen systems
ISO 16110	2007-03	Wasserstoffherzeuger auf der Grundlage von Brennstoffspaltungsverfahren – Teil 1: Sicherheit
ISO 16111	2018-08	Transportable gas storage devices – Hydrogen absorbed in reversible metal hydrides
VdTÜV Merkblatt 514		Anforderungen an Wasserstofftankstellen; Druckgase 514
DVGW G 260	2013-03	Gasbeschaffenheit
DVGW G 262	2011-09	Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung
EIGA IGC Doc 121/14		HYDROGEN PIPELINE SYSTEMS

Dr. Brauer, Simm, Dr. Wanzenberg, Henel

Qualifizierung relevanter Kenndaten (z. B. Zugversuche, Kerbschlagversuche, Rissausbreitung) von Bestandswerkstoffen aus dem fast 7.000 km langen Transportnetz der ONTRAS bei unterschiedlichen Erdgas-Wasserstoff-Gemischen und Druckbedingungen sowie Vergleichsversuchen an fabrikneuen Rohrwerkstoffen. Diese Werkstoffuntersuchungen werden umfassend am Grundmaterial und an den Schweißnähten durchgeführt. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden weiterhin Instandhaltungsstrategien und Sicherheitskonzepte für Erdgastransportleitungen für den Transport von Wasserstoff und wasserstoffhaltigen Gasen entwickelt. Zeitgleich können daraus neue Standards bzw. eine Erweiterung von bestehenden Regelwerken für den Betrieb von umgewidmeten Erdgastransportleitungen abgeleitet werden. Das Projektende ist zum 31. Dezember 2019 datiert. Aber auch außerhalb Europas existieren eine Vielzahl an Wasserstoffleitungen, z. B. in den USA (Houston, Texas: Länge 232 km, Betriebsdruck 58 bar, Durchmesser 114 bis 220 mm, Start 1969) und Kanada, Alberta: Länge 22 km)

Für die Speicherung von Wasserstoff kommen neben der Verwendung von Tanks oder Röhrenspeichern auch Kavernen infrage. Derzeit sind z. B. in UK und in den USA verschiedene Kavernen in Betrieb [9]:

- Teeside (UK): SABIC Petrochemicals,  $3 \times 70.000 \text{ m}^3$ , 45 bar, 25 GWh, in Betrieb seit ca. 30 Jahren
- Clemens Dome, Lake Jackson, Texas (USA): Conoco Philips,  $580.000 \text{ m}^3$ , 70 bis 135 bar, 92 GWh, Start 1986
- Moss Bluff Salt Dome, Liberty County, Texas (USA): Praxair,  $566.000 \text{ m}^3$ , 76 bis 134 bar, 80 GWh, Start 2007

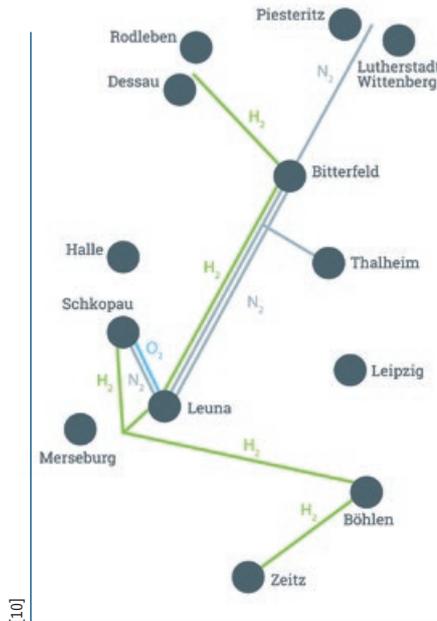


Abb. 1 – Wasserstoff-Leitungsnetz der Linde AG in Ostdeutschland

mit einer Abnahme der Duktilität einher. Daher kommt dem Wissen über die tatsächliche Wirkung auf den eingesetzten Werkstoff zur Bewertung möglicher Risiken beim Transport von Wasserstoff eine besondere Bedeutung zu.

Damit atomarer Wasserstoff in das Metallgitter eindringen kann, bedarf es einer aktiven Metalloberfläche, an der die Wasserstoffmoleküle ( $\text{H}_2$ ) zu Wasserstoffatomen ( $\text{H}$ ) dissoziieren können, sodass eine Durchtrittsreaktion des Wasserstoffatoms und eine anschließende Absorption im Metallgitter ermöglicht werden. Ein geringer Teil der Wasserstoffatome dringt in das Metallgitter ein. Der Rest recombiniert wieder zu Wasserstoffmolekülen. Damit eine aktive Metalloberflä-

korrosion maßgeblich. In zahlreichen, in der Literatur beschriebenen Untersuchungen werden Slow-Strain-Rate-Tensile-Tests verwendet, um die Anfälligkeit des Materials gegenüber Wasserstoff-beeinflussster Korrosion zu beschreiben. In diesen Zugversuchen mit sehr geringer Dehnrates unter Druckwasserstoff ist bei niederfesten Werkstoffgütern, aber auch an höherfesten Leitungsrohrgütern wie API 5L X80 [12] bei statischer Belastung kein Einfluss des Druckwasserstoffs auf die Festigkeit gefunden worden. Es wurde jedoch von einem deutlichen Einfluss des Wasserstoffs auf die Duktilität berichtet, und hier vor allem von einer Abnahme der Bruchzähigkeit und Brucheinschnürung und einer Zunahme des Spröbruchanteils [13–19]. Zusätzlich zeigten höherfeste Leitungsrohrgütern zum Teil einen Rückgang der Bruchdehnung mit abnehmender Dehnrates [20].

Bereiche mit Oberflächenunregelmäßigkeiten, wie z. B. Kerben, Risse oder sonstige Oberflächenfehler mit hohem Kerbfaktor, sind besonders gefährdet, da an diesen Stellen eine lokal auftretende plastische Verformung durch Spannungsüberhöhung auftreten kann, selbst wenn die Gesamtverformung noch im elastischen Bereich liegt [16]. Dies ist vor allem unter langsamer zyklischer Belastung zu beachten.

### Verhalten neuer Rohrleitungswerkstoffe

Bisherige Pipelines zum Transport von Wasserstoff wurden stets aus niederfesten Leitungsrohrgütern bis maximal Güte L360 (API 5L X52) gefertigt. Dies ist auch die höchste Güte, die gemäß der ELGA-Richtlinie IGC Doc 121/14 für reine Druckwasserstoffleitungen zugelassen ist.

## » Beim Test des hochfrequent-induktiv geschweißten Rohrmaterials wurde kein signifikanter Einfluss des Wasserstoffes auf die maximale Zugspannung und somit auf die Festigkeit des Werkstoffes festgestellt. «

### Auswirkungen von Wasserstoff auf das Werkstoffverhalten

Beim Transport von Wasserstoff durch Rohrleitungen besteht die Möglichkeit, dass atomarer Wasserstoff in den Werkstoff der Rohrleitung eindringt. Durch Diffusion des Wasserstoffs kann sich dieser im Metallgitter anreichern, was zu einer Wasserstoff-beeinflusssten Korrosion des Materials führen kann. Dies geht oftmals

che ohne passivierende (Oxid)-Schicht vorliegt, sind in der Regel Verformungen im plastischen Bereich notwendig.

Die mechanischen Eigenschaften, Mikrostruktur und Menge der mikrostrukturellen Inhomogenitäten (Wasserstoff-Fallen) beeinflussen die Beständigkeit der niedriglegierten Rohrleistungsstähle gegenüber Wasserstoff-beeinflussster

Gleichzeitig werden die meisten existierenden Wasserstoffleitungen bei geringen Auslastungen, bezogen auf die Materialstreckgrenze, und damit hohen Sicherheitsfaktoren betrieben. Bei einer großflächigen Erstellung von Rohrleitungsnetzen für Wasserstoff stünde die Möglichkeit des Einsatzes höherfester Gütern zur Verfügung. Hierdurch könnte durch eine Wanddickenreduzierung, und damit Ver-

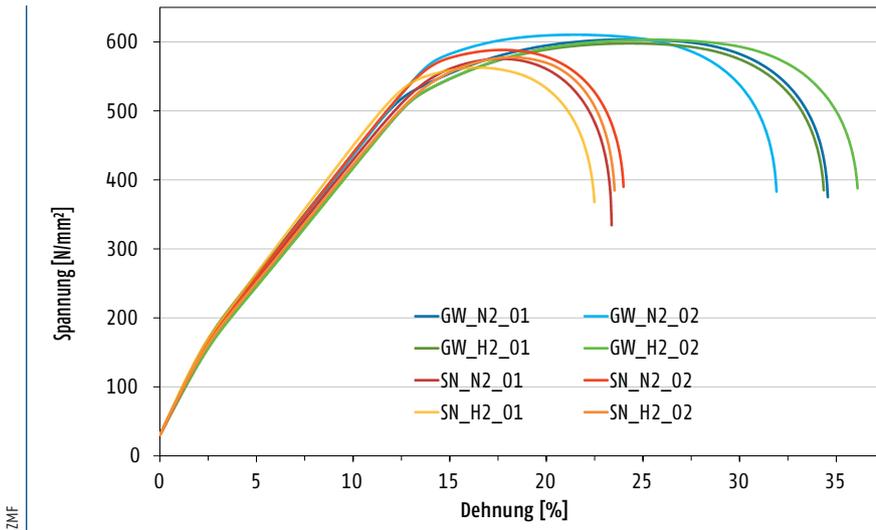


Abb. 2 – Spannungs-Dehnungskurve der Grundwerkstoffproben (GW) sowie der Schweißnahtproben (SN) bei einer Dehnrates von  $2,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

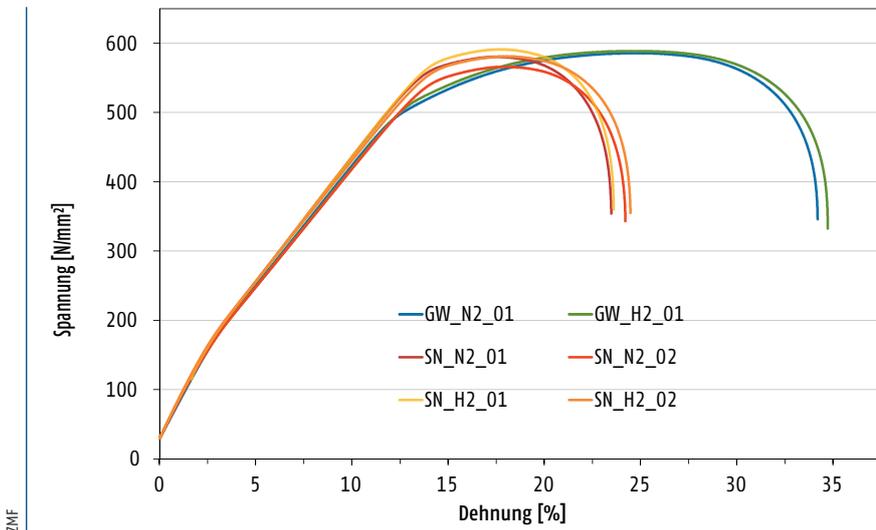


Abb. 3 – Spannungs-Dehnungskurve der Grundwerkstoffproben (GW) sowie der Schweißnahtproben (SN) bei einer Dehnrates von  $2,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

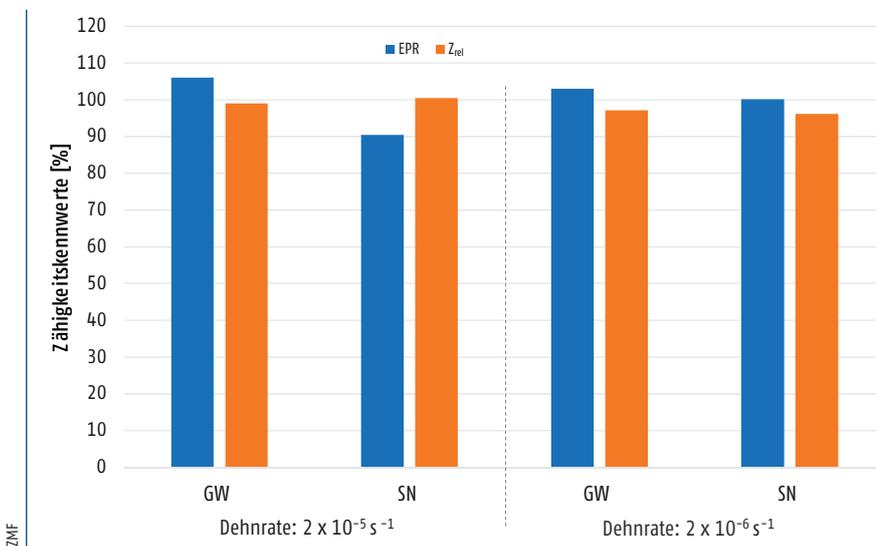


Abb. 4 – Relative Brucheinschnürung und relative plastische Dehnung, ermittelt an Grundwerkstoff (GW) und HFI-Schweißnähten (SN) Slow-Strain-Rate-Tensile-Tests unter Wasserstoff mit zwei verschiedenen Dehnrates

ringerung der eingesetzten Stahlmenge und reduziertem Energiebedarf bei der Herstellung, oder eine Erhöhung des Leitungsdruckes ein wirtschaftlicherer und ressourcenschonender Betrieb der Leitung erreicht werden. Ob diese höheren Werkstoffgüten ebenfalls den hohen Ansprüchen an die Leitungssicherheit gegenüber Wasserstoff-beeinflusseter Korrosion genügen, hat Mannesmann Line Pipe mithilfe der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH an der Güte X70 untersucht. Die Untersuchungen und Ergebnisse im Detail sind in [21] dargestellt.

Verwendet wurde hochfrequent-induktiv geschweißtes Rohrmaterial der Salzgitter Mannesmann Line Pipe mit einer Abmessung von 610 mm x 17,9 mm und ferritisch-perlitischer Mikrostruktur. Es wurden Slow-Strain-Rate-Tensile-Tests an Rundzugproben aus dem Grundwerkstoff sowie der HFI-Schweißnaht unter praxisrelevanten Bedingungen von 80 bar Wasserstoff sowie 80 bar Stickstoff als Referenzmedium durchgeführt. Die Proben wurden unter einsinniger Belastung bis zum Bruch bei Dehnrates von  $2,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  und  $2,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  geprüft. Die ermittelten Zugkurven sind in Abbildung 2 & 3 zu sehen und zeigen weder im Grundwerkstoff noch im Schweißnahtbereich einen signifikanten Einfluss des Wasserstoffes auf den Verlauf der Kurven. Es wurde kein signifikanter Einfluss des Wasserstoffes auf die maximale Zugspannung und somit auf die Festigkeit des Werkstoffes festgestellt.

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  $E_{PN_2}$ :

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

Die ermittelten Werte für die Brucheinschnürung und die plastische Dehnung sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Werte über 90 % weisen auf eine hohe Beständigkeit des Materials gegenüber Wasserstoff-beeinflusseter Korrosion hin. Die fraktografische Bewertung der Bruchflächen nach dem Zerreißen der Zugproben in Stickstoff und Wasserstoff zeigt einen

duktilen Bruchverlauf ohne Anzeichen eines Sprödbruchs. Eine erhöhte Anfälligkeit des Schweißnahtbereiches gegenüber Wasserstoff-beeinflusseter Korrosion konnte nicht festgestellt werden.

Neben dem Verhalten des Rohres sind im nächsten Schritt auch die Rohrverbindungsnahte unter dem Einfluss von reinem Wasserstoff in vergleichenden Untersuchungen getestet worden. Diese werden üblicherweise nach dem Verfahren des Metallschutzgasschweißens (GMAW) hergestellt. Auch bei den so erzeugten Rundnähten zeigte sich keine verstärkte Korrosionsanfälligkeit unter dem Einfluss des Wasserstoffs. Die detaillierten Ergebnisse sind in [22] vorgestellt.

### Zusammenfassung und Ausblick

Weltweit, und besonders in Deutschland, gewinnt der Energieträger Wasserstoff aufgrund der Klimaziele und Energiewende immer größere Bedeutung. Vor allem der sichere Transport ausreichender Mengen steht dabei im Vordergrund. Jüngste Untersuchungen an Stahlrohren auch höherer Festigkeitsklassen von Mannesmann Line Pipe zeigen eindeutig auf, dass diese einen entsprechenden wertvollen Beitrag liefern. Dies wurde erreicht durch den Einsatz modernster Werkstoffe und Herstellverfahren sowohl im Bereich der Stahl- und Vormaterialherstellung als auch in der HFI-Rohrproduktion. In all diesen Bausteinen wurde besonderes Augenmerk auf die spätere Anwendung als Wasserstoff-Transportrohr gelegt. Hieraus resultierte die Erzeugung des Wasserstoff-Rohres „H2 by Mannesmann“.

In den nächsten Schritten stehen Untersuchungen zur Eignung von üblichen Rohrverbindungsnahten unter reinem Wasserstoff sowie von HFI-Rohren von Mannesmann Line Pipe für den Einsatz im Bereich der Mischgase im Vordergrund. Diese Untersuchungen werden u. a. im 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] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Klimaschutz in Zahlen: Klimaschutzziele Deutschland und EU (2017-07).  
[2] Krieg, D.: Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff. Dissertation an der RWTH Aachen, 2012.

[3] ALSTOM: Erfolgreiche erste Testfahrt von Alstoms Wasserstoffzug Coradia iLint bei 80 km/h (2017-03).

[4] Mercedes-Benz: Weltpremiere des Mercedes-Benz Citaro FuelCell-Hybrid (2009-06).

[5] Wenger Engineering: Sind „Fuel Cells“ „Fool's Cells“? Ein Positionspapier (2018-02).

[6] Shell Wasserstoff-Studie: Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>, [www.shell.de/wasserstoffstudie](http://www.shell.de/wasserstoffstudie), 2017.

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

[8] Verordnung über Rohrfernleitungsanlagen (Rohrfernleitungsverordnung), September 2008.

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

[10] [www.hypos-eastgermany.de/das-innovationsprojekt/potenziale-der-hypos-region](http://www.hypos-eastgermany.de/das-innovationsprojekt/potenziale-der-hypos-region).

[11] Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff, Elektromobilität der EnergieAgentur.NRW: [www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle/brennstoffzelle-wasserstoff-elektromobilitaet/ziele\\_des\\_netzwerks\\_brennstoffzelle\\_und\\_wasserstoff\\_nrw](http://www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle/brennstoffzelle-wasserstoff-elektromobilitaet/ziele_des_netzwerks_brennstoffzelle_und_wasserstoff_nrw) (27.08.2018).

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

[13] Gräfen, H.; Pöpperling, R.; Schlecker, H.; Schlerkman, H.; Schwenk, W.: Zur Frage der Schädigung von Hochdruckleitungen durch Wasserstoff und wasserstoffhaltige Gasgemische. *Gas Erdgas gwv*, 130, (1989) 1, S. 16–21.

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

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

[16] 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*.

[17] 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.

[18] Gialone, 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.

[19] 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.

[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. 17616–17623.

[21] Tröger, M.; Bosch, C.; Brauer, H.: Untersuchungen zur Beständigkeit hochfester HFI-geschweißter Rohre für den Wasserstofftransport. *bbr* 3 (2014), S. 40–45.

[22] Brauer, H.; Simm, M.; Wanzenberg, E.; Henel, M.: Transport von gasförmigem Wasserstoff via Pipelines? Aber sicher! „H<sub>2</sub> by Mannesmann“. *3R*, Ausgabe 10-11 (2018).

### Autoren

Dr. Holger Brauer  
Manuel Simm  
Mannesmann Line Pipe GmbH  
In der Steinwiese 31  
57074 Siegen  
Tel.: 02381 420-447, 0271 691-246  
[holger.brauer@mannesmann.com](mailto:holger.brauer@mannesmann.com)  
[manuel.simm@mannesmann.com](mailto:manuel.simm@mannesmann.com)  
[www.mannesmann-linepipe.com](http://www.mannesmann-linepipe.com)

Dr. Elke Wanzenberg  
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH  
Ehinger Str. 200  
47259 Duisburg  
Tel.: 0203 999-3172  
[e.wanzenberg@du.szmf.de](mailto:e.wanzenberg@du.szmf.de)  
[www.szmf.de](http://www.szmf.de)

Marco Henel  
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH  
Karl-Heine-Str. 109/111  
04229 Leipzig  
Tel.: 0341 245-124  
[marco.henel@dbi-gruppe.de](mailto:marco.henel@dbi-gruppe.de)  
[www.dbi-gruppe.de](http://www.dbi-gruppe.de)

