

Energiewende mit Wasserstoffrohren „H2Ready“ und Umstellung existierender Erdgasnetze

Von Holger Brauer, Manuel Simm, Elke Wanzenberg, Marco Henel und Otto Jan Huising

Reiner Wasserstoff wird bei der Umstellung der Primärenergieversorgung auf regenerative Energiequellen einer der Hauptenergieträger sein. Für den Transport von großen Mengen Wasserstoffgas stellen Rohrleitungen die ökonomischste und ökologischste Lösung dar. Da auf dem Weg in die wasserstoffbasierte Zukunft auch Wasserstoff/ Methan-Gemische zum Einsatz kommen werden, befassen sich laufende und zukünftige Untersuchungen und Betrachtungen nicht nur mit reinem Wasserstoffgas, sondern auch mit diesen Gasgemischen. Im Bereich des Transports von Wasserstoff steht darüber hinaus sowohl eine Optimierung moderner Leitungsrohr-Stahlwerkstoffe für Neuinstallationen als auch eine Umstellung und Weiterverwendung von bereits existierenden Leitungsnetzen im Fokus. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zunächst die Entwicklung des Energiesektors dargestellt. Dabei stehen Mengenbetrachtungen im Vordergrund. Anschließend werden der Stand und die derzeitigen Tätigkeiten im Bereich der notwendigen Regelwerksanpassungen kurz wiedergegeben. Diese basieren auf technischen Qualifizierungsuntersuchungen und Weiterentwicklungen. Die wesentlichen Versuche, deren Hintergrund und exemplarische Ergebnisse werden vorgestellt. Erste daraus abgeleitete Maßnahmen bei der Herstellung längsnahtgeschweißter Stahlrohre von Mannesmann Line Pipe GmbH nach dem hoch-frequenz-induktions-Verfahren (HFI), führten zu angepassten Rohren für den Transport von Wasserstoffgas. Das Potential von kostengünstigen und sicheren neuen Leitungsrohren wird aufgezeigt. Aspekte der Weiterverwendung bereits existierender Gasleitungen und deren Umstellung auf Wasserstoff sind ebenfalls Inhalt des Papers. Dabei wird auf die aktuellen Arbeiten zur Erstellung einer Umstellungsroadmap eingegangen. Weiterhin berichtet der niederländische Netzbetreiber N.V. Nederlandse Gasunie von seinen praktischen Erfahrungen bei der Umnutzung einer Erdgasleitung auf den Wasserstofftransport.

Einleitung

„Beim Pariser Klimavertrag COP 21, der am 04.11.2016 in Kraft getreten ist, haben sich 196 Staaten völkerrechtlich darauf verständigt, dass die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst auf 1,5 °C, im Vergleich zur vorindustriellen Zeit beschränkt wird.“ [1] Im Zuge des Klimagipfels im September 2019 haben sich viele Staaten zu zusätzlichen Anstrengungen verpflichtet, hierunter etwa ein Drittel von 193 Mitgliedern der Vereinten Nationen, die versprochen bis 2050 klimaneutral zu werden, darunter Deutschland und die Niederlande. Weiterhin schlossen sich 102 Städte, 10 Regionen und sogar 93 Konzerne diesem Ziel an. Außerdem trat Russland dem Klimaschutzabkommen von Paris offiziell bei. Ihren Beitrag zum Kampf gegen die Erderwärmung ab 2020 zu erhöhen versprochen weitere 70 Länder. Welche Maßnahmen ergriffen werden bleibt abzuwarten. Konkreter wird es möglicherweise auf der 25. Weltklimakonferenz (COP25) Anfang Dezember 2019 in Santiago.

Einer der notwendigen Schritte ist der Ausstieg aus der Kohleverstromung. Dieser ist in Deutschland für 2038 geplant, in den Niederlanden sogar schon in 2030. Zudem steigen die Niederlande kurzfristig aus der Produktion

von Gas aus. Hier spielen auch Sicherheitsgründe eine Rolle: die Produktionen des größten Gasfeldes lösen Erdbeben in den Niederlanden aus. Sollen die erneuerbaren Energien die Stromversorgung übernehmen, so muss ein Augenmerk auf die Stabilität des Stromnetzes gelegt werden. Denn Wind und Sonne als Hauptlieferant der Energie stehen nicht ständig in gleicher Menge zur Verfügung. Eine Abschätzung gibt [2]. Hier wird für Deutschland für das Jahr 2050 prognostiziert, dass an 5.000 Stunden im Jahr ein Überangebot an erzeugter Primärenergie vorliegen wird. In Summe beläuft sich dieses auf etwa 80 TWh. Demgegenüber steht eine Unterdeckung der benötigten Energie von ca. 300 Stunden (etwa 3,3 TWh). Eine Möglichkeit, um diese Volatilität abzufangen, bietet der Wasserstoff als Zwischenspeicher für überschüssige Energie. Alle anderen Energiespeichertechnologien können die benötigte Speichermenge und -dauer technisch und wirtschaftlich nicht vorhalten [3]. Wasserstoff kann dann in Zeiten eines Unterangebots an Primärenergie zur Auffüllung der Versorgungslücke genutzt werden. Zusätzlich bietet Wasserstoff die Möglichkeit, auch den Wärmemarkt als Gas zu bedienen. Aber auch industrielle Anwendungen wie beispielsweise die CO₂-neutrale Stahl-

herstellung weisen einen hohen Bedarf nach großen Mengen Wasserstoff auf.

In jedem Falle wird es in Zukunft notwendig werden, Wasserstoff in großen Mengen zum Verbraucher zu transportieren. Hierzu bieten Pipelines die ökologischste und wirtschaftlichste Lösung [4]. Daher stehen derzeit an vielen Stellen Stahlrohrleitungen im Fokus der Betrachtungen. So wurden und werden verschiedenste wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt, um die Materialtauglichkeit beim Transport und der Speicherung von Wasserstoff nachzuweisen. Ziel der derzeitigen Netzbetreiber ist es, möglichst die bereits verlegten und derzeit verwendeten Erdgasnetze für den Wasserstofftransport zu nutzen. Aufgrund der geringeren Energiedichte („Energieinhalt“) von Wasserstoff gegenüber Erdgas, wird beim Transport von reinem Wasserstoff über die bestehende Erdgasinfrastruktur die Energietransportkapazität um etwa 20 bis 25 % reduziert [5]. Daher werden zur Vorbereitung der Verlegung neuer, oder dem Austausch alter Leitungen moderne Leitungsrohrstähle geprüft. Hier stehen Untersuchungen zum mechanischen Verhalten der Stähle bei vorhandenem Wasserstoffgas im Vordergrund. Dabei wird aber nicht nur der Einfluss von reinem Wasserstoffgas untersucht, sondern auch Gemische aus Erdgas und Wasserstoff, da dies als Übergangslösung für die Umstellung auf eine wasserstoffbasierte Energieversorgung der Zukunft gilt. Zusätzlich wird die Auswirkung von anderen Gasbestandteilen wie Feuchtigkeit oder auch geringe Anteile wie Schwefelwasserstoff H_2S mit in die Betrachtung einbezogen. Letzteres könnte beispielsweise bei der Ausspeisung von als Vorrat gespeichertem Wasserstoff aus einer Salzkaverne durch die Mikrobiologie in der Kaverne im Gas enthalten sein. Für die Bewertung einer geplanten Umstellung einer existierenden (Erdgas-)Leitung werden auch ältere Stahlsorten in die Untersuchungen integriert. Hier sind dann neben den oben bereits genannten Materialuntersuchungen auch Aspekte wie Oberflächenbeschaffenheit, Korrosionsabtrag, mechanische Vorbelastungen und auch der Zustand der Schweißnähte Gegenstand der Untersuchungen zur Prüfung der Tauglichkeit für eine Umstellung auf den Transport von Wasserstoffgas. All diese Betrachtungen zur Charakterisierung von Stählen und Leitungen werden dann in die neuen Regelwerke Eingang finden, damit eine sichere Umstellung auf die wasserstoffbasierte Energieversorgung gelingt.

Im vorliegenden Fachbeitrag wird im ersten Teil ein Überblick über die Versuche gegeben, die derzeit im Blickpunkt der wissenschaftlichen Materialuntersuchungen stehen. Exemplarische Ergebnisse der Untersuchungen vor allem an modernen Leitungsrohrstählen der Mannesmann Line Pipe GmbH werden kurz vorgestellt. Weiterhin wird ein zusammenfassender Überblick über den aktuellen Stand der unterschiedlichen Normungs- und Regelwerkaktivitäten im Bereich Wasserstofftransport über Rohrleitungen gegeben. Der zweite Teil des Papers befasst sich mit der Umstellung vorhandener Erdgaslei-

tungen auf Wasserstoff. Hierzu werden die Erfahrungen des niederländischen Netzbetreibers N.V. Nederlandse Gasunie am Beispiel der Leitung X-804 (Dow, Terneuzen-Yara, Sluiskil, 12,4 km-DN 400) zum Einfluss von Wasserstoff auf die Risszähigkeit dargestellt.

Entwicklung des Energiesektors

Seit kurzem wird in Deutschland von allen Seiten grüner Wasserstoff (also erzeugt aus regenerativen Quellen) als Hauptenergieträger gesehen und diesem eine besondere Rolle in der Energiewende eingeräumt. Die Ergebnisse aus dem Dialogprozess Gas 2030 [6] messen Wasserstoff eine so große zukunftsbestimmende Klima-Bedeutung bei, dass aktuell im Auftrag der Bundesregierung eine „Nationale Strategie Wasserstoff“ erstellt wird. Wasserstoff offeriert darüber hinaus industriepolitische Chancen für Deutschland im Bereich Power-to-Gas und Folgeprodukte, sowie bei der stofflichen Verwendung. Erwartet wird ein Zuwachs des Imports von Wasserstoff und eine Vertiefung der Offshore-Zusammenarbeit. Konsens besteht auch darin, dass die Gasinfrastruktur angepasst werden muss, um künftig vermehrt Wasserstoff aufnehmen zu können. Hierbei geht es um die Beimischung von Wasserstoff ins natürliche Erdgas als Brückentechnologie in die Zukunft, sowie die Komponentenentwicklung und das Erreichen der „H₂-Readiness“. Letzteres zielt auch auf ein europaweites gemeinsames Verständnis und gegebenenfalls auf eine Regulierung von Wasserstoffnetzen. So sollen zukünftig vermehrt CO₂-freie und CO₂-neutrale Gase auch aus dem europäischen Ausland importiert werden können. Die hierzu notwendigen Maßnahmen im Bereich Planung, Technik und Regeln umfassen u.a. die Weiterentwicklung der Fernleitungsnetze. Auch eine Umstellung existierender Leitungen bzw. der Neubau von Leitungen für die Anlandung und Verteilung von grünem Wasserstoff aus Power-to-Gas-Anlagen auf Offshore-Plattformen muss Bestandteil dieser Initiative sein.

Benötigte Mengen an Wasserstoffgas bis 2050

Für die Primärerzeugung des überwiegenden Anteils an erneuerbarer Energie stehen hauptsächlich die beiden Quellen Sonne und Wind zur Verfügung. In [7] und [8] werden hier für das Jahr 2050 für Deutschland 33 GW benötigte bzw. installierte Kapazität im Bereich Offshore Wind vorhergesagt, 168 GW für Onshore Wind (die vierfache Menge im Vergleich zu heute) und 166 GW im Bereich Photovoltaik/Sonne (der etwa 4,5-fachen Menge im Vergleich zu heute). Insgesamt ist absehbar, dass Deutschland, aber auch Europa, bei einer vollständigen Defossilisierung der Energieversorgung auf erneuerbare Energieimporte von mehreren 100 TWh/a angewiesen sein wird. Solche Energiemengen lassen sich ökologisch und ökonomisch sinnvoll nur auf Basis von gasförmigen oder flüssigen Energieträgern transportieren. Wasserstoff aus regenerativen Quellen wird dabei die energetische Basis bilden [9].

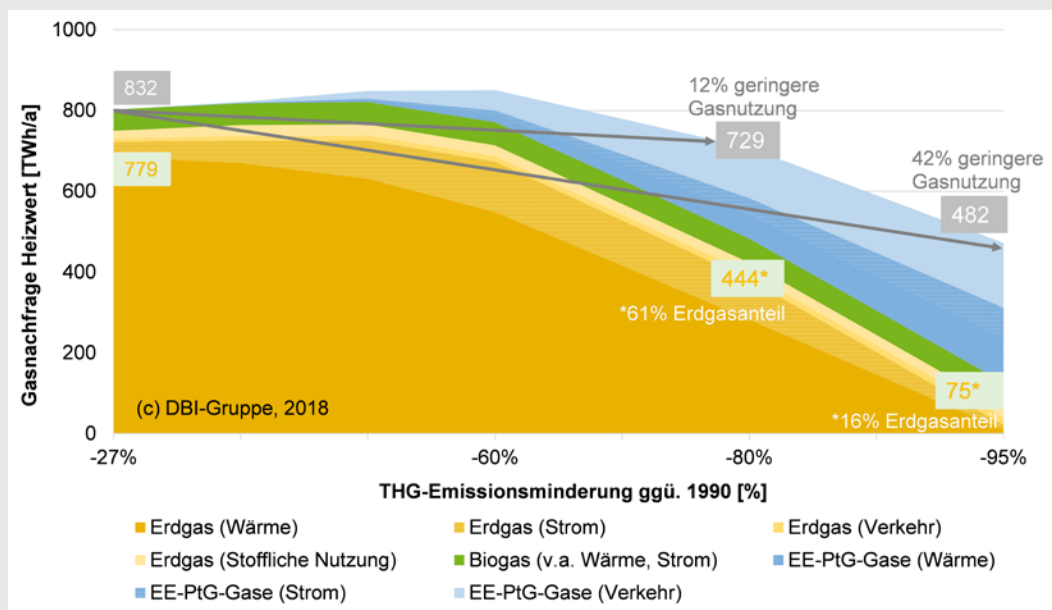


Bild 1: Entwicklungsszenarien für die Gasnachfrage und THG-Emissionsminderung in Deutschland nach J. Nitsch [10]

Bild 1 zeigt, wie sich eine Nachfrage nach Erdgas, Biogas und EE-PtG-Gasen aus den unterschiedlichen Sektoren zwischen heute und 2050 in Deutschland entwickeln kann, die im Einklang mit dem 2 °C-Ziel des Paris-Abkommens steht. Hierzu wurde eine Auswertung einschlägiger Studien vorgenommen und das Szenario „KLIMA 2050“ aus [10] ausgewählt und grafisch dargestellt.

Als Ergebnis zeigen sich Entwicklungsszenarien für die Gasnutzung in Deutschland für -60 % Minderung von Treibhausgasen (THG), -80 % THG-Minderung und -95 % THG-Minderung. Den derzeit (-27 % THG-Minderung) größten Teil der Gasnachfrage macht Erdgas aus mit 779 TWh im Jahr 2015 (94 % der Gasnachfrage). Mit zunehmender THG-Emissionsminderung muss dieser Anteil aber zwangsläufig sinken. Kurzfristig, d. h. bis zu einer Reduktion auf 60 % gegenüber 1990, kann Erdgas zur THG-Reduktion beitragen, indem es andere fossile Energieträger wie Kohle substituiert. Langfristig wird aber auch dieses fossile Erdgas mehr und mehr durch grüne Gase (Biogas, EE-PtG-Gase) ersetzt. Aus diesem Grund sinkt die gesamte Gasnachfrage trotz ambitionierter THG-Minderungsziele nur moderat.

Bild 2 zeigt die Entwicklung der Nachfrage nach EE-PtG-Gasen aufgeschlüsselt nach den Nutzungen Wärmebereitstellung, Stromerzeugung und Verkehr. Zusätzlich dargestellt ist der Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung an der Strom- und Wärmebereitstellung.

Eine wesentliche Erkenntnis hinsichtlich der Entwicklung der Gasnachfrage bis 2050 bzw. 95 % THG-Minderung ist nicht nur, dass die gesamte Gasnachfrage sinkt, sondern auch, dass sich die Nutzung von Gas wesentlich verändert. Diese Entwicklung ist in Bild 3 dargestellt. Im Jahr 2015 wurde der größte Teil des Gases zur Deckung der Gasnachfrage im Wärmebereich genutzt. Wird jedoch ein Szenario angenommen,

bei dem eine THG-Minderung von 80 % erzielt wird, teilt sich die prognostizierte Gasnutzung etwas gleichmäßiger auf die verschiedenen Nutzungsbereiche Strom, Wärme und Verkehr auf. Bei einer THG-Minderung von 95 % nimmt vor allem die Nutzung als Kraftstoff noch weiter zu, da im Verkehrssektor die größten Potenziale zur Dekarbonisierung vorhanden sind. Würden im Szenario der 95 % THG-Minderung die in Bild 3 angegebenen gesamten 347 TWh an erneuerbar erzeugten Gasen zu 100 % auf Wasserstoff basieren, und wird ein idealer Wirkungsgrad von 1 bei der Nutzung angenommen, so würde die Menge an Wasserstoffgas bei etwa 10 Mio. t liegen. Bei realistischeren Wirkungsgraden dementsprechend weit darüber. Konkretere Zahlen beispielsweise für den Verkehrssektor gibt [4] für Europa. Wird ein linearer Anstieg des derzeitigen Treibstoffverbrauchs vorausgesetzt, betrüge der entsprechende Bedarf an Wasserstoff (korrigiert um die Antriebs-effizienz) europaweit 60,6 Mio. t in 2050, falls alle Fahrzeuge auf H₂-Antriebstechnologie basieren. In [11] wird alleine deutschlandweit in allen Verkehrssektoren, also Pkw, Lkw, Bahn und Flugzeug eine Menge von ca. 33 Mio. t H₂ pro Jahr abgeschätzt (1.100 TWh/a). Im Bereich der Industrie können am Beispiel der Stahlerzeugung folgende Menge überschlagsmäßig angesetzt werden: die Salzgitter AG als Stahlproduzent weist eine jährliche Rohstahlkapazität von etwa 5 Mio. t auf. Selbst mit den derzeit in Salzgitter eingesetzten modernsten, kohlebasierten Verfahren der Stahlerzeugung werden dabei rund 8 Mio. t CO₂ ausgestoßen. Das SALCOS-Projekt der Salzgitter AG zielt auf den Ersatz der Kohle durch Wasserstoff als Energielieferant ab. Bei einer Reduzierung des CO₂-Ausstoßes um 25 % ergibt sich ein Bedarf an Wasserstoffgas von etwa 80.000 Nm³ pro Stunde. Daraus errechnet sich ein jährlicher Bedarf von 63 kt. Dementsprechend würden bei einer nahezu CO₂-freien Stahlerzeugung 232 kt/a benötigt, und das nur für

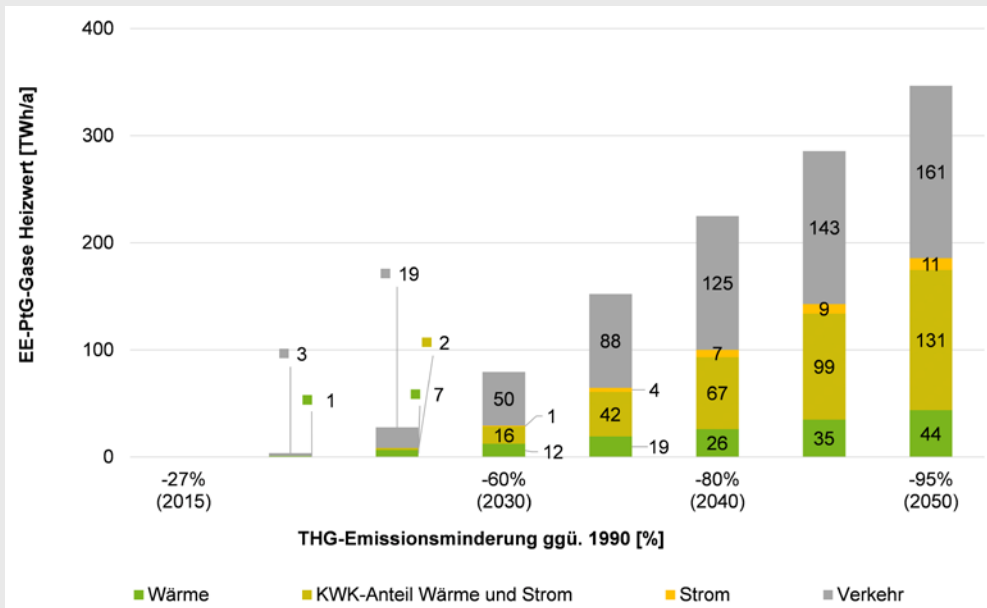


Bild 2: Entwicklungsszenarien für die Nutzung von EE-PtG-Gasen, aufgeschlüsselt nach Sektoren nach J. Nitsch [10]

einen „mittelgroßen“ Stahlproduzenten. In [12] wird von einer jährlichen H₂-Mengenabschätzung für die gesamte deutsche Stahlindustrie von ca. 2.500 kt ausgegangen.

Stand der Regelwerksaktivitäten zu Wasserstoffgas-Transportleitungen/Stand der gültigen Regelwerke

Auf dem Weg in die vollständig dekarbonisierte Zukunft der Energieversorgung mit einer Versorgungsinfrastruktur auf Wasserstoffbasis wird die Beimischung von Wasserstoff in das fossile Erdgas eine Übergangslösung sein müssen. Zumindest solange, bis über regenerative Primärenergiequellen eine ausreichende Menge an Wasserstoff für eine vollständige Umstellung auf eine 100 %ige Versorgung mit grünem Wasserstoff in allen Bedarfsbereichen zur Verfügung steht. Im Bereich der Leitungsrohrnetze werden zwei Szenarien betrachtet: zum einen die Umstellung von existierenden Rohrleitungen für den derzeitigen Erdgastransport auf Wasserstoff bzw.

Wasserstoff/Erdgasgemische. Zum anderen die Nutzung von neu verlegten Leitungssysteme. Hierzu gehören natürlich nicht nur Rohre, sondern auch Armaturen, Ventile, usw. die zum Leitungssystem gehören. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Leitungsrohrstählen.

Bei einer Umstellung von existierenden Leitungen für Erdgas-Wasserstoff-Gemische findet die Anwendung des aktuellen Handlungsspielraums des DVGW-Regelwerkes mit einer möglichen Zumischung von derzeit bis zu 10 Vol.-% Wasserstoff statt. Im Rahmen der Zielsetzung der Roadmap Gas 2050 des DVGW wird aktuell die Transformation der Gasversorgung in Deutschland in der gesamten Wertschöpfungskette, einschließlich der Gasverwendung von der heute bestehenden Struktur, auf ein weitgehend klimaneutrales Zielsystem im Jahr 2050 berücksichtigt [13]. In diesem Zuge wird über eine Anhebung dieser Zumischgrenze bis 2030 auf 20 Vol.-% Wasserstoff diskutiert. Die vollständige Umstellung von Teilnetzen

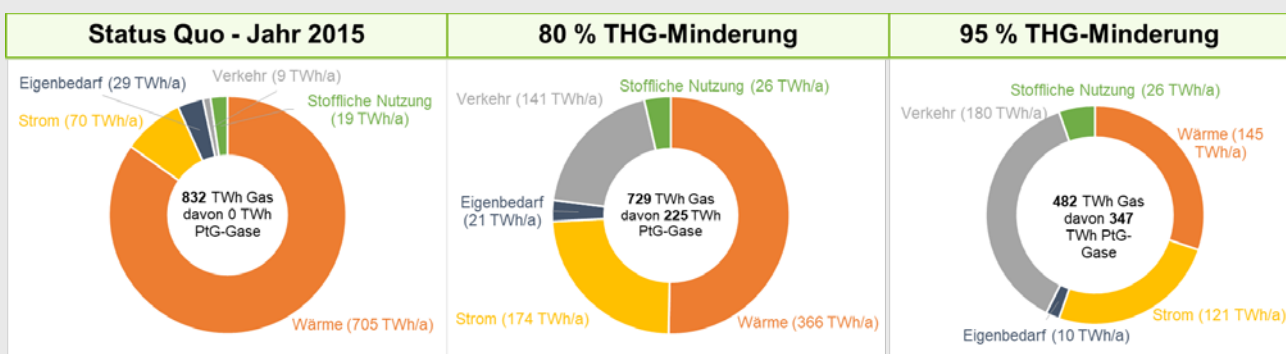


Bild 3: Entwicklungsszenarien der Gasnutzung nach Sektoren in Deutschland (Primärenergieverbrauch, Heizwert).

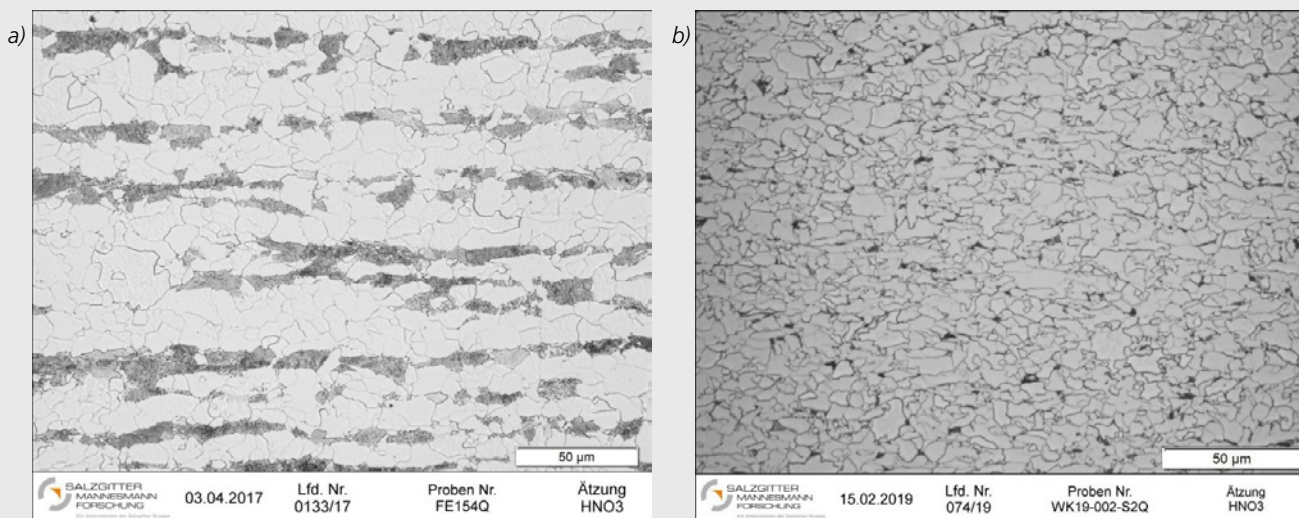


Bild 4: Gefüge des Werkstoffs 1 (a) und Werkstoff 2 (b)

auf reinen Wasserstoff soll darüber hinaus den relevanten Schritt in Richtung der Einhaltung der o.g. notwendigen klimapolitischen Ziele darstellen. Gleichzeitig kann damit auch die technisch-wirtschaftliche Problemstellung vermieden werden, die bei einer stufenweisen Zumischung von Wasserstoff (bei größer 10 Vol.-%) und der damit verbundenen Gasbeschaffenheitsschwankung aufkommt.

Das Hauptaugenmerk der Roadmap zur Umstellung liegt auf den notwendigen Anpassungsmaßnahmen, die nach Betriebskonzept/Kapazitätsplanung, Messtechnik, Wasserstofftoleranzen der Kunden, Sicherheitskonzept, Instandhaltungsstrategien, Kommunikation, Rechtlicher Aspekt und Rohrleitungswerkstoffe untergliedert werden. Bei der Qualifizierungsroadmap (Zumischung von 10 Vol.-% Wasserstoff) kann bei den Fragestellungen hinsichtlich der Instandhaltungsstrategie und der rechtlichen Aspekte auf das bestehende technische Regelwerk des DVGW zurückgegriffen werden. Sicherheitstechnisch ist durch die Zumischung von Wasserstoff die Veränderung der Ex-Zonen zu prüfen und darauf aufbauend das Sicherheitskonzept zu ändern. Aktuelle Untersuchungen des DVGW zeigen zudem, dass bei der Messtechnik auf Transportebene lediglich die Prozessgaschromatographen angepasst bzw. ausgetauscht werden müssen. Die Eignung der Rohrleitungswerkstoffe für Wasserstoff wird in laufenden Untersuchungen, zum Beispiel im Rahmen des HYPOS-Projektes „Pipeline Integrity Management zur Weiternutzung der bestehenden Erdgasinfrastruktur für Wasserstoff“ (H2-PIMS), ermittelt, jedoch wird allgemein bei 10 Vol.-% Wasserstoff ein unkritischer Einsatz angenommen. Dynamische Rissfortschritts-Untersuchungen lassen dies jedoch fraglich erscheinen. So wird in [14] gefunden, dass die Erhöhung der Rissfortschritts-geschwindigkeit durch den Einfluss von Wasserstoff nahezu unabhängig von der Wasserstoffkonzentration im Erdgas ist, und auch bereits unterhalb 10 Vol.-% nahezu vollständig wirkt.

Kritisch zu betrachten ist die Wasserstofftoleranz der Kunden, hier besonders die CNG-Tankstellen, Porenspeicher und bestimmte Industriezweige (z. B. Glas- oder Stahlproduzenten). Sind diese Gasabnehmer nicht vorhanden, so kann heute schon die Qualifizierung von Rohrleitungen relativ schnell und unkompliziert durchgeführt werden. Im Falle der Umstellung auf reinen Wasserstoff kann die Messtechnik vereinfacht werden, da die Gasbeschaffenheit konstant bleibt. Bezüglich des Sicherheitskonzeptes und der Instandhaltungsstrategien kann auf den Erfahrungen (z. B. EIGA IGC Doc 121/14) von Wasserstoffnetzen der chemischen Industrie aufgebaut werden, die jedoch nicht stark vom DVGW-Regelwerk abweichen. Eine Herausforderung, die mit den Behörden zu klären ist, stellt derzeit die rechtliche Situation dar, da je nach Anwendungsfall gemäß Gashochdruckleitungsverordnung (GasHDrLtGv) oder Technische Regel für Rohrfernleitungsanlagen (TRFL) entschieden werden muss und damit unterschiedliche Folgemaßnahmen (z. B. Überwachungs- und Leckagesystem) verbunden sein können. Nach derzeitigen Meinungen ist eine Erweiterung der GasHDrLtGv und des DVGW-Regelwerks vorteilhaft, um diese Folgemaßnahmen einzugrenzen und damit einen anwendungsfreundlicheren Umstellungsprozess zu ermöglichen. Das Thema Sicherheit darf dabei jedoch nicht vernachlässigt werden. Schlussendlich sind noch die bestehenden Rohrleitungswerkstoffe auf ihre allgemeine Anfälligkeit für Wasserstoff zu prüfen, wobei hier die Erfahrungen und Untersuchungen der chemischen Industrie sowie aus dem laufenden Projekt unterstützen, um den Zustand der Leitungen bewerten zu können.

Überarbeitung der Regelwerke

Derzeit finden vermehrte Regelwerksüberarbeitungen und -neuerarbeiten bezüglich der Nutzung von Leitungsrohren für den Transport von reinem Wasserstoffgas bzw. Beimischung von Wasserstoff zum Erdgas statt. Bei letzterem ist derzeit noch unklar, welche Grenze der Beimischungsmenge

(z. B. 5 %, 10 %, 20 %) Eingang finden wird. Möglicherweise wird es auch je nach Systemtechnologie auf dem Transportweg oder der Endanwendung unterschiedliche Lösungen geben. Erste Hinweise hierzu gibt [15].

Auf deutscher Ebene befasst sich der DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e.V.) in umfangreichen Gestaltungsaktivitäten mit dem Thema. Hier befinden sich mehrere Arbeitsblätter in der Prüfung und Bearbeitung, zum Beispiel:

- » Arbeitsblatt G 463: Gasleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar; Errichtung
- » Arbeitsblatt G 466: Gasleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar – Betrieb und Instandhaltung
- » Merkblatt G 501: Luftgestützte Gasferndetektionsverfahren

Das TC234 im Rahmen des CEN hat u. a. die folgenden Normen im Fokus der Anpassung:

- » DIN EN 1594: Gasinfrastruktur – Rohrleitungen für einen maximal zulässigen Betriebsdruck über 16 bar – Funktionale Anforderungen
- » DIN EN 16348: Gasinfrastruktur – Sicherheitsmanagementsystem (SMS) für die Gastransportinfrastruktur und Rohrleitungsintegritätsmanagementsystem (PIMS) für Gastransportleitungen – Funktionale Anforderungen
- » DIN EN 1918: Gasinfrastruktur – Untertagespeicherung von Gas

Im nordamerikanischen Raum war und wird zurzeit durch die ASME (American Society of Mechanical Engineers) das Regelwerk B31.12: Hydrogen Piping and Pipelines revidiert. Die überarbeitete Version soll Anfang 2020 freigegeben werden. Während auf deutscher und europäischer Ebene noch unklar ist, welche wesentlichen Materialuntersuchungen zum Einfluss von Druckwasserstoffgas in die Regelwerke Eingang finden sollen, ist die ASME B31.12 deutlich konkreter. Welche Untersuchungen diskutiert werden, bzw. in der B31.12 berücksichtigt sind, wird im nächsten Kapitel näher erläutert.

Materialuntersuchungen zum Einfluss von Druckwasserstoffgas auf Leitungsrohrstähle – Bedeutung der Versuche und exemplarische Ergebnisse

Der Prozess und die Wirkung einer möglichen „Wasserstoffversprödung“ in Metallen ist umfangreich beschrieben worden [1, 16-20]. Zur Materialcharakterisierung und Auslegung von Leitungsrohren werden derzeit drei wesentliche Tests diskutiert.

Slow-Strain-Rate Zugversuch

Im Slow-Strain-Rate Zugversuch wird eine Zugprobe einer quasistatischen Beanspruchung ausgesetzt. Der Versuchsaufbau entspricht dem eines üblichen Zugversuchs mit deutlich reduzierter Dehngeschwindigkeit. Damit wird

dem Wasserstoff genügend Zeit gegeben, in die Probe einzudringen und sich durch Diffusion im Werkstoff an kritischen Gefügestellen (bspw. einer Risspitze) anzureichern. Nachdem die Streckgrenze des Werkstoffes erreicht ist und die Probe plastisch verformt wird, entsteht durch die konstante Zunahme der Probendehnung eine blanke Metalloberfläche, an der der Wasserstoff atomar in den Stahl eindringen kann. Dies ist notwendig, da die natürliche Oxidschicht auf der Probenoberfläche ansonsten ein Aufspalten der Wasserstoffmoleküle in atomaren Wasserstoff und ein Eindringen von Wasserstoffatomen in den Stahl nahezu unterbindet. Im Ergebnis des Versuchs lässt sich der Einfluss des Wasserstoffs auf die grundlegenden Festigkeitskennwerte quantifizieren.

Zur Bewertung der Eignung von Rohrleitungen für den Transport von reinem Wasserstoff sowie einer Beimischung von Wasserstoff in Erdgas hat die Mannesmann Line Pipe GmbH mit Hilfe der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF) an aktuellen Stahlrohrwerkstoffen der Mannesmann Line Pipe in unterschiedlichen Festigkeitsklassen die Beständigkeit gegenüber Wasserstoff-beeinflusseter Korrosion untersucht. Die Untersuchungen konnten nachweisen, dass auch Rohre höherer Festigkeitsklassen von Mannesmann Line Pipe unter Belastung durch reinen Druckwasserstoff keine verstärkte Anfälligkeit für Wasserstoff-beeinflussete Korrosion zeigten [z. B. 1, 21, 22]. Für die Anfälligkeit der Werkstoffe gegenüber Wasserstoff-beeinflusseter Korrosion sind nicht nur Festigkeitsklasse und Legierung von Bedeutung. Auch das von der Herstellungsrouten abhängige Gefüge des Werkstoffes zeigt großen Einfluss auf die Eignung des Werkstoffes zum Transport von Wasserstoff.

Der Einfluss des Wasserstoffs auf die Duktilitätskennwerte Bruchdehnung und Brucheinschnürung in Abhängigkeit vom Gefüge des Werkstoffes wurde mit Slow-Strain-Rate Tensile Tests an zwei Werkstoffen der API 5L [23] Güte X52 getestet. Die beiden Werkstoffe unterscheiden sich signifikant in der Fertigungsrouten. Werkstoff 1 wurde bei der Herstellung des Vormaterials im Warmwalzwerk normalisierend gewalzt, Werkstoff 2 wurde thermomechanisch gewalzt. Letzterer Werkstoff wurde nach den Vorgaben des bei Mannesmann Line Pipe internen Technischen Standard für Rohre für den Wasserstofftransport „H2Ready“ gefertigt [25]. Die Unterschiede im Gefüge sind in **Bild 4** dargestellt. Die Gefügebilder des Werkstoffes 1 zeigen ein ferritisch-perlitisches Gefüge mit ausgeprägten Seigerungszeilen. Die ehemalige Austenitkorngröße wurde nach DIN EN ISO 643 [26] zu 10 bestimmt. Das Gefüge des thermo-mechanisch gewalzten Werkstoffes 2 ist gegenüber dem des Werkstoffes 1 wesentlich feiner und homogener ohne ausgeprägte Seigerungszeilen: Die ehemalige Austenitkorngröße ist 11. **Tabelle 1** zeigt die chemische Zusammen-

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der beiden Werkstoffe

Werkstoff	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	Nb
Werkstoff 1	0,169	0,201	1,373	0,017	0,0041	0,05	0,033	0,052	0,053	0,013	0,022
Werkstoff 2	0,048	0,281	0,898	0,007	0,0007	0,035	0,017	0,038	0,044	0,013	0,034

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der beiden Werkstoffe

Werkstoff	R _{p0,2} / MPa	R _{t0,5} / MPa	R _{p2,0} / MPa	R _m / MPa	R _{t0,5} /R _m / %	A / %	Z / %
Werkstoff 1	378,5	381	427,5	522,5	73	32,5	69,5
Werkstoff 2	459,5	465	494	524	88,5	31,3	80,5

setzung der beiden Werkstoffe, **Tabelle 2** die mechanischen Eigenschaften.

Zur Bestimmung der Anfälligkeit für Wasserstoff-beeinflusste Korrosion wurden Slow-Strain-Rate Tensile Tests an Rundzugproben unter praxisrelevanten Bedingungen von 80 bar Gesamtdruck durchgeführt. Testmedien waren 100 % Wasserstoff sowie Stickstoff als Referenzmedium. Die Proben wurden bei einer Dehnrage von $2,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ unter einsinniger Belastung bis zum Bruch geprüft. Zur Bewertung der Duktilität wurden die Brucheinschnürung

und die plastische Dehnung ermittelt sowie die Bruchflächen der Proben fraktographisch 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} .

$$Z_{rel} = \frac{Z_{H_2}}{Z_{N_2}} \cdot 100 \% \quad (\text{Formel 1})$$

$$E_{PR} = \frac{E_{PH_2}}{E_{PN_2}} \cdot 100 \% \quad (\text{Formel 2})$$

Die ermittelten Zähigkeitswerte E_{PR} und Z_{rel} der Proben sind in **Bild 5** dargestellt, die ermittelten Zugkurven in **Bild 6** und **Bild 7**. Bei allen Proben wurde weder die Zugfestigkeit noch die Gleichmaßdehnung im Medium Wasserstoff beeinflusst. Die Untersuchungen in Wasserstoff zeigen bei beiden Proben des Werkstoffs 1 einen steileren Abfall der Zugkurve im Bereich sehr hoher Dehnungen gegenüber den Zugkurven gemessen im inerten Medium. Die Zähigkeitskennwerte dieser Proben weisen eine verringerte Brucheinschnürung mit Mittelwerten von 54,2 % auf. Eine fraktographische Auswertung im Rasterelektronenmikroskop zeigt einen erhöhten Spröbruchanteil auf der Bruchfläche der Zugproben (siehe **Bild 8**). Bei den Proben des Werkstoffs 2 ist dieser Effekt in den Zugkurven nicht zu erkennen. Mit Zähigkeitskennwerten von 98,4 % für die Brucheinschnürung und 96,7 % für die Bruchdehnung zeigt der Werkstoff eine gute Beständigkeit gegenüber Wasserstoff-beeinflusster Korrosion.

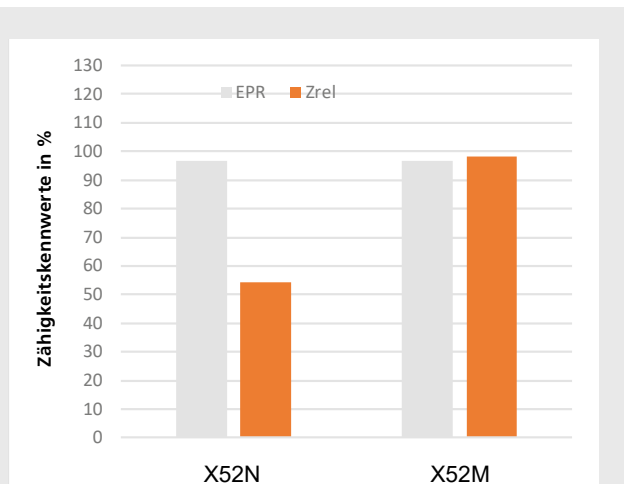


Bild 5: Zähigkeitskennwerte der beiden Werkstoffe in 80 bar Wasserstoff

Statische Rissfortschrittsversuche

Der Slow-Strain-Rate-Tensile Test berücksichtigt nicht das Vorhandensein von Kerben oder Rissen. Um das Werkstoffverhalten bei vorhandenen Anrissen unter Wasserstoffeinfluss zu untersuchen, dienen Rissfortschrittsversuche. In

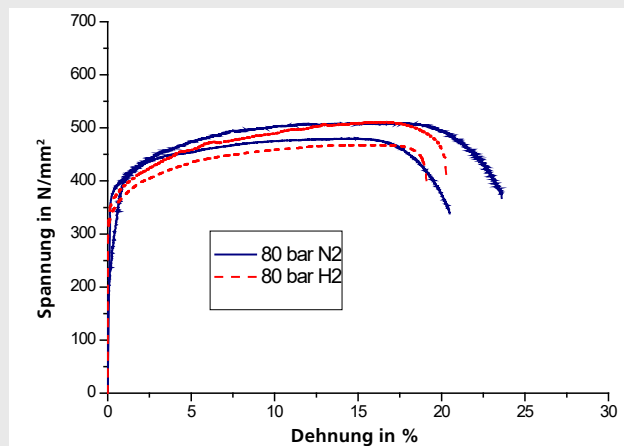


Bild 6: Spannung-Dehnung-Kurven der SSRT-Tests gemessen am Werkstoff 1

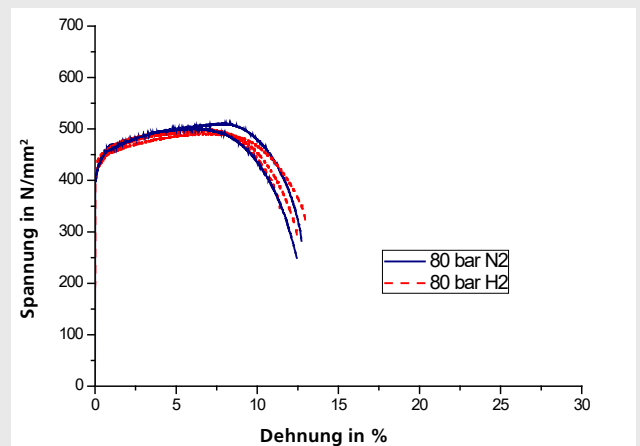


Bild 7: Spannung-Dehnung-Kurven der SSRT-Tests gemessen am Werkstoff 2

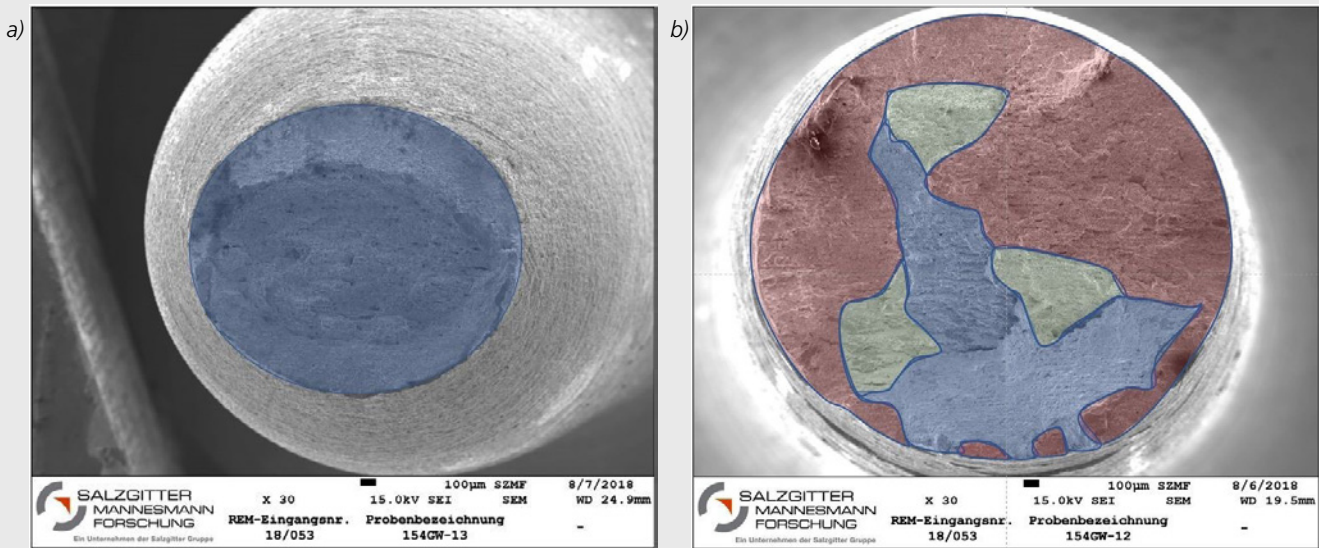


Bild 8: Typische Bruchfläche des Werkstoffs 1 nach dem Slow-Strain-Rate Test im Rasterelektronenmikroskop. Blau: duktiler Bruch, rot: Sprödbbruch, grün: Mischfläche. Testmedium Stickstoff (a) und Wasserstoff (b)

statischen Rissfortschrittsversuchen nach ASTM E 1681 [27] werden gekerbte Kompaktzugproben (**Bild 9**) zunächst so lange schwingend belastet, bis sich im Kerbgrund ein Anriss bildet. Die so angeschwungenen Proben werden mit Wasserstoff elektrolytisch beladen. In der Regel wird dabei eine weit höhere Volumenkonzentration an Wasserstoff in der Probe erzielt als durch eine Beladung in Wasserstoffgas. Zusammen mit der Spannungsüberhöhung am Anriss im Kerbgrund wird so ein möglichst kritischer Zustand eingestellt. Anschließend werden diese Proben einer konstanten statischen Last ausgesetzt. Ausgewertet wird die Zeit bis zum Versagen der Probe. Durch Prüfen bei unterschiedlichen Lasten kann ein unterer Risszähigkeitsgrenzwert ermittelt werden, bei dem die Proben nicht mehr brechen. Dieser

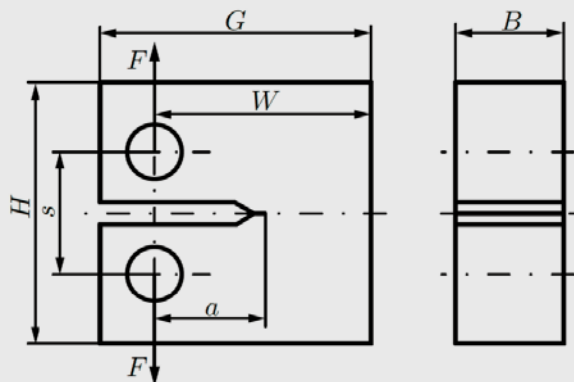


Bild 9: Geometrie der CT-Probe nach ASTM E 399 [28] (Beispiel)

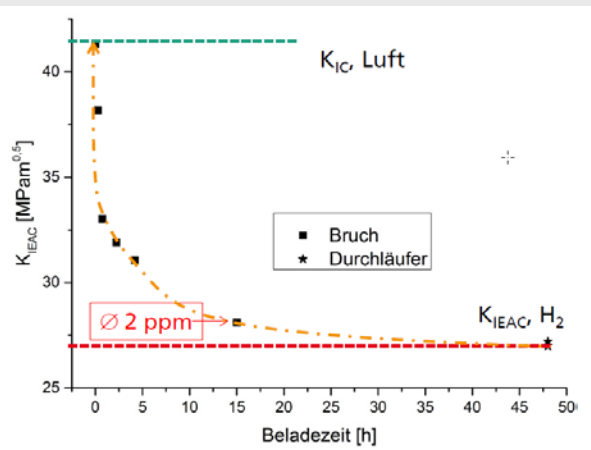
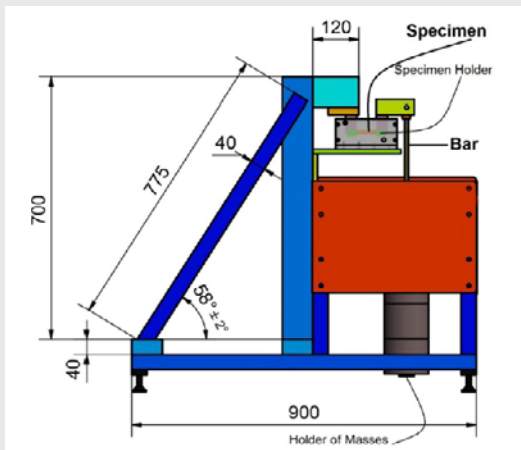


Bild 10: Aufbau der Prüfanordnung eines statischen Rissfortschrittsversuchs (schematisch) und typische Ergebniskurve einer vollständigen Prüfreihe [29]

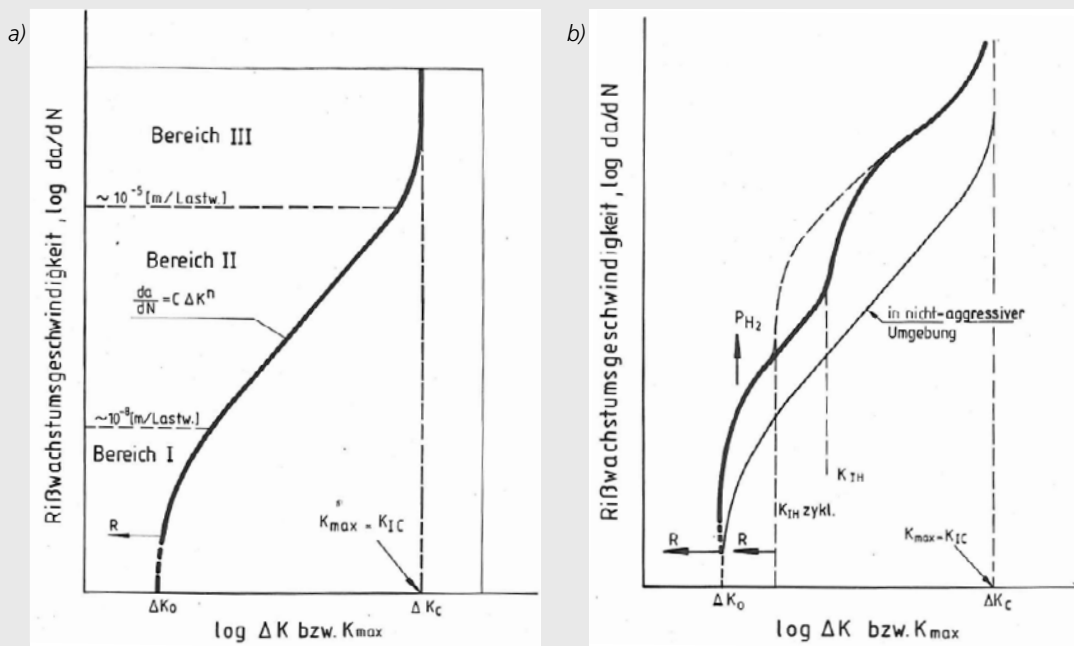


Bild 11: Ermüdungsrisswachstum an Luft (a) und in Gegenwart von Wasserstoff (b) [32]

kann mit entsprechenden Versuchen in inerten Medien, z. B. Luft, verglichen und so ein Abminderungsfaktor ermittelt werden. Ein typischer Versuchsaufbau mit Ergebniskurve ist in **Bild 10** zu sehen.

Dynamische Rissfortschrittsversuche

Dynamische Rissfortschrittsversuche vervollständigen die Charakterisierung der Werkstoffe unter dem Einfluss von Wasserstoffdruckgas. Der Versuch ist in verschiedenen ASTM Standards beschrieben [27, 28, 30, 31]. Im Gegensatz zu den statischen Versuchen wird hier eine schwingende (dynamische) Belastung aufgebracht. Gemessen wird dabei der Rissfortschritt pro Zyklus. Der bekannte Zusammenhang zwischen der Risswachstumsgeschwindigkeit da/dN und der Amplitude des Spannungsintensitätsfaktors ΔK (Prüfmedium Luft) ist in **Bild 11a** schematisch dargestellt. Erst ab dem Schwellwert ΔK_0 wird Risswachstum nachweisbar. Dieser Wert hängt maßgeblich vom Spannungsverhältnis und weniger vom untersuchten Werkstoff ab. Erwähnenswert ist, dass bei der Bildung eines Risses unter zyklischer Belastung in lokalen Bereichen mit hoher Spannungskonzentration (Kerben, Risse, Oberflächenfehler) bereits kritische plastische Verformungen stattfinden können, obwohl sich die Gesamtverformung noch im elastischen Bereich des Werkstoffs befindet [32]. Nach einer kurzen Phase des Rissstarts (Bereich I) verlangsamt sich die Risswachstumsgeschwindigkeit im Bereich II. Dieses konstante Risswachstum kann durch die in der Abbildung angegebene Paris-Gleichung beschrieben werden. Im Bereich III setzt dann wieder ein beschleunigtes Risswachstum ein, bis bei Überschreiten der kritischen Spannungsintensität K_{IC} überkritisches Risswachstum und damit

Versagen einsetzt. Der Einfluss von Wasserstoff auf den Kurvenverlauf und damit das Risswachstum in Wasserstoff wurde beispielsweise in [33] und [34] an niedrig-legierten Stählen untersucht. In beiden Studien wurde gefunden, dass bei unterschiedlichen Wasserstoffangeboten und Gasdrücken stets eine Zunahme der Risswachstumsrate nachweisbar war. Eine typische Änderung der Kurve ist in **Bild 11b** schematisch gezeigt. In allen Bereichen der Kurve kommt es durch den Wasserstoff zu einer Rissbeschleunigung. Der Schwellenwert ΔK_0 bleibt jedoch unverändert. Ermüdungsversuche in Wasserstoff an der API 5L Güte X80 zeigten einen signifikanten Abfall der Risszähigkeit und eine Zunahme der Risswachstumsgeschwindigkeit um den Faktor 10 [35]. Dabei spielt der Faktor Zeit eine entscheidende Rolle. Bei hohen Frequenzen wird nur schwer eine Korrosionsreaktion in einer Wasserstoffatmosphäre induziert. Hier ist die Zeit für den Wasserstoff zu gering, um über eine bei der Belastung gegebenenfalls durch Aufreißen der Oxidschicht freiwerdende blanke Metalloberfläche in den Werkstoff einzudringen und/oder in dem Werkstoffgefüge zur Risspitze zu diffundieren. Daher sind im Versuch sehr niedrige Frequenzen der Belastungsänderung zu wählen. In [36] werden für Gaspipelines Druckschwankungen mit Frequenzen unterhalb 0,03 Hz verantwortlich gemacht für wasserstoffinduzierte Ermüdungsrisse. Neue Erkenntnisse widersprechen jedoch der gängigen Lehrmeinung, dass das Risswachstum mit sinkender Belastungsfrequenz immer weiter steigt [37]. Für die Frequenz scheint es bei einigen metallischen Werkstoffen einen unteren Grenzwert zu geben. Neben der oben bereits erwähnten Beobachtung in [14], dass die Erhöhung der Rissfortschrittsgeschwindigkeit

durch den Einfluss von Wasserstoff nahezu unabhängig von der Wasserstoffkonzentration im Erdgas ist, wird auch in [38] davon berichtet, dass der Wasserstoffdruck hier vernachlässigbar ist. Schon bei niedrigen Wasserstoff-(partial-)drücken ist die Wirkung der Wasserstoff-schädigung auf die Rissfortschrittsgeschwindigkeit der API 5L Leitungsröhrstähle nahezu vollständig erreicht. Ebenso zeigte sich keine Abhängigkeit von der Mindeststreckgrenze des Materials, sehr wohl aber von der Mikrostruktur des Werkstoffes.

Bei der Auslegung einer Pipeline für den Transport von Wasserstoff gibt es unter der Annahme eines vorhandenen Anrisses zwei Möglichkeiten: entweder die Auslastung der Leitung wird so berechnet, dass kein messbares und damit kein kritisches Risswachstum auftritt, oder die Anzahl der Betriebszyklen wird so bemessen, dass ein wachsender Riss innerhalb der geplanten Nutzungsdauer der Leitung den kritischen Wert nicht überschreitet. Um dies zu gewährleisten, können bislang zwei grundsätzliche Wege beschritten werden. Der eine sieht eine Reduzierung der Auslastung der Rohre vor, z. B. durch Absenken des Leitungsdruckes oder durch eine entsprechende Erhöhung der Wanddicke oder Festigkeitsklasse. Dies wird beispielsweise in der ASME B31.12 in der Design Option A durch einen sogenannten „Materials Performance Factor“, also einen Abminderungsbeiwert erreicht. Dieser hängt von den mechanischen Kennwerten des Rohres und dem Designdruck ab. Der andere (Design Option B) sieht vor, über bruchmechanische Betrachtungen und Versuche Grenzwerte der Belastungsintensität in Wasserstoffgas zu ermitteln, die dann in die Berechnung der Auslastung eingehen. In der neuen Revision der ASME B31.12 wird auch der Mechanismus der Wasserstoff-verstärkten Ermüdung berücksichtigt werden. Auf Basis von etlichen Versuchen an unterschiedlichsten Rohrleitungsgütern [38] wurde eine einzelne, obere Hüllkurve definiert. **Bild 12** zeigt einen repräsentativen Vergleich der Hüllkurve mit den Ergebnissen am X52. Diese Kurve bildet die „Worst-Case“ Grundlage des neuen implementierten vereinfachten Modells zur konservativen Auslegung von Rohrleitungen unter dem Einfluss von Wasserstoffdruckgas.

Aus früheren statischen Untersuchungen (Zugversuch) ist ein umgekehrter Zusammenhang zwischen der Festigkeit und dem negativen Effekt von Wasserstoff auf die Duktilität (Wasserstoffversprödung) bekannt. Da lediglich dieser Effekt bei der Auslegung von Auslegungskennwerten in beispielsweise dem ASME Standard B31.12 berücksichtigt wurde, ergaben sich hieraus Einschränkungen für Stahlgütern oberhalb von API 5L X52 mit Mindeststreckgrenzen größer als 360 MPa. Jüngere Untersuchungen ergaben demgegenüber, dass die wasserstoffinduzierte Rissausbreitung unter Ermüdungsbelastung nicht von der Werkstofffestigkeit abhängig ist [39]. Hieraus wurde gefolgert, dass die Designeinschränkung für höherfeste Stähle übermäßig konservativ und nicht gerechtfertigt ist. Damit kann die Zulassung von Stählen mit Streckgrenzen bis 485 N/mm² (API 5L X70) ohne die Berücksichtigung von

Abminderungen Material- und Installationskosten um etwa 25 % senken [40]. Als Ergebnis dieser Studie werden in der neuen Version der ASME B31.12 diese Einschränkungen für höherfeste Stähle zwischen X52 und X70 nicht mehr enthalten sein.

Umstellung einer niederländischen Erdgaspipeline auf Wasserstoff

Gasunie hat 2018 eine bestehende Gasleitung für den Transport von Erdgas auf den Transport von Wasserstoff umgestellt. Die Gaszusammensetzung variiert von 70 bis 100 % Wasserstoff, der Rest ist Erdgas bei einem Maximum von 1 % CO. Um dies zu realisieren, wurden an der bestehenden Leitung begrenzte Anpassungen vorgenommen und die volle Integrität und Sicherheitssituation erneut bewertet. In diesem Dokument wird speziell auf den Einfluss auf die Lebensdauer der verwendeten Rohre und die Schweißnähte, mit denen diese Rohre verbunden wurden, eingegangen.

Eine der Herausforderungen bei der Herstellung eines Rohres und dessen Verlegung vor Ort ist die Herstellung der Schweißverbindungen. Schweißen ist ein Prozess, bei dem eigentlich immer Ungängen auftreten. Solange diese jedoch die Integrität nicht gefährden, werden sie als akzeptabel angesehen. Dafür gibt es verschiedene Normen, wie die DIN EN ISO 3183 [24] für die Längsnähte der Rohre und die DIN EN 12732 [41], die auch im DVGW GW 350 [42] angewendet wird, für die Rundschweißungen vor Ort. Beide Normen enthalten Akzeptanzkriterien, die eine Ungänge in der Schweißverbindung erlauben. Dies bedeutet, dass bei diesen Ungängen keine Gefährdung für die Integrität beim Auslegungsdruck und bei den Verlegungsbedingungen der Leitung vorliegt. Allerdings können diese Ungängen infolge von Druckwechseln in der Leitung wachsen. Für eine Erdgas-transportierende Leitung gehen wir bei Gasunie davon aus, dass trotz der

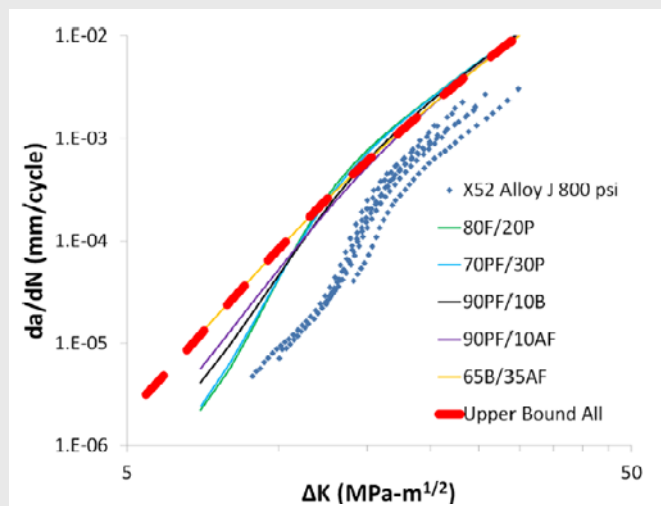


Bild 12: Vergleich der Hüllkurve mit den Ergebnissen mit einem X52 [38]

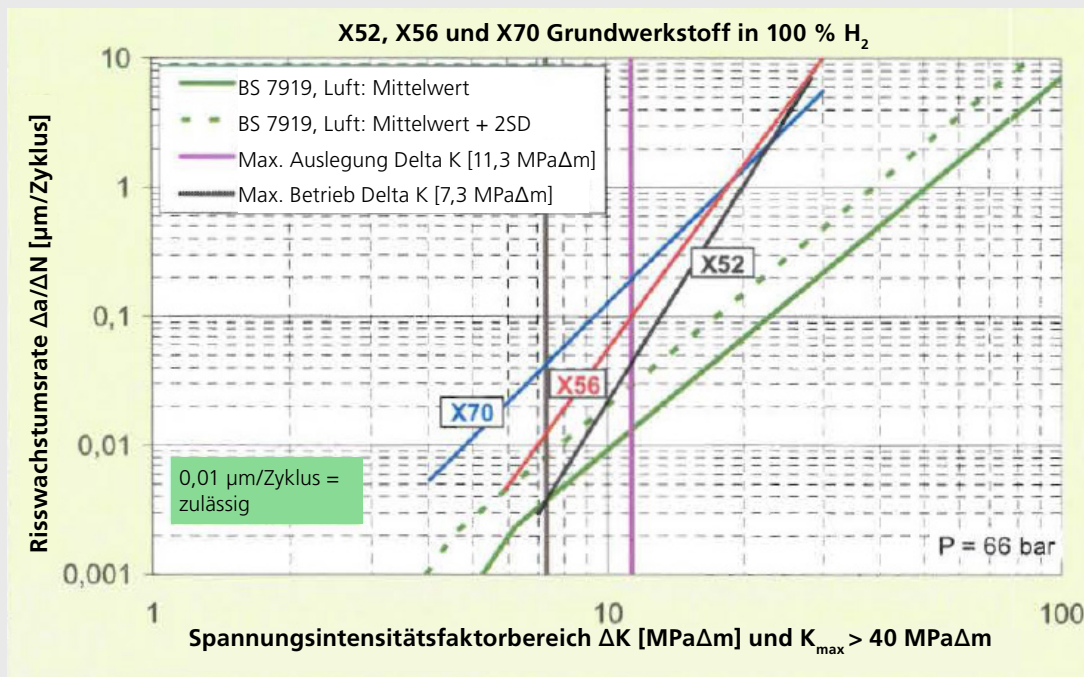


Bild 13: Risswachstumsgeschwindigkeiten in 100 % Wasserstoff [43]

Dauerbelastung durch die Druckwechsel kein nennenswertes Wachstum der gemäß der Norm erlaubten Ungängen stattfindet. Wenn es sich bereits um ein Wachstum handelt, ist davon auszugehen, dass dieses kleiner ist als $0,01 \mu\text{m}$ pro Belastungswechsel.

Im Fall des Transports von Wasserstoff oder eines Wasserstoffprozentatzes in Erdgas kann sich die Risszähigkeit des Stahls gegenüber Rissausbreitung ändern, wenn atomarer Wasserstoff in das Stahlgitter eindringen kann. Dazu muss zuerst molekularer Wasserstoff in atomaren Wasserstoff aufgespalten werden. In einer Transportleitung aus Stahl kann dies auf einer nicht korrodierten, sauberen Stahloberfläche geschehen. Dies kann der Fall sein, wenn in der Leitung eine zulässige Ungänge wie beispielsweise eine Riefe vorhanden ist, die auf der Innenseite der Leitung offen ist. In diesem Fall ist es wichtig, zu wissen, wie das auftretende Risswachstum unter Wasserstoffbedingungen ist. Im Rahmen verschiedener internationaler Projekte wurden umfangreiche Informationen über die Geschwindigkeit des Risswachstums von Stahl unter Wasserstoffbedingungen gesammelt. Durch Verwendung dieser Werte in einer bruchmechanischen Analyse der bekannten, zulässigen, Ungängen kann berechnet werden, bei welchen Belastungswechseln/Druckwechseln das höchstzulässige Wachstum der Ungängen nicht überschritten wird. Dazu wird die oben genannte Grenze von $0,01 \mu\text{m}/\text{Wechsel}$ bei Erdgas als Grenzwert für ein akzeptables Wachstum angewandt. **Bild 13** zeigt für eine Anzahl Leitungsstähle die Risswachstumsgeschwindigkeit, die im Rahmen des Projekts Naturalhy [43] bestimmt wurde.

Aus Bild 13 ist der Schwellenwert für das zulässige ΔK für

ein Risswachstum von $0,01 \mu\text{m}/\text{Druckwechsel}$ zu bestimmen. Der Faktor ΔK für die Bewertung einer schwellenden Belastung ist aus der Theorie der Bruchmechanik bekannt. Gasunie hat die Methode angewandt, um für die bestehende Gasleitung zu prüfen, ob das eventuelle Risswachstum unter dem Einfluss von Wasserstoff keinen größeren Wert ergibt als bei Erdgas. Die Berechnungen wurden gemäß BS 7910:2013+A1:2015 [44] durchgeführt. Dazu wurden folgende Schritte angewandt:

- » Wasserstoff-Risszähigkeit bei Dauerbelastung
- » Bestimmen der Druckschwankungen (Größe Δp und Anzahl N) während der vorgesehenen Lebensdauer.
- » Bestimmen der Schwellungbelastung (ΔK) eines bekannten Fehlers (3 bei 50 mm) in einer Rohrleitung.
- » Bestimmen der Risswachstumsgeschwindigkeit.
- » Bestimmen des Risswachstums der angenommenen Ungänge.
- » Bestimmen, ob das Risswachstum innerhalb der vorgesehenen Lebensdauer zu einer unzulässigen Fehlergröße führt.

Bei der Berechnung der Fehlergröße wurden folgende Ausgangswerte angenommen: Ausgehend von einem Fehler in der Höhe einer Schweißraupe, ist eine Fehlerhöhe von 3 mm zur Bewertung herangezogen worden. Die meisten zulässigen Fehlerlängen betragen 25 mm. Da aber die zerstörungsfreie Ultraschallprüfung nicht immer die ganze Fehlerlänge zeigt, wurde als Maximallänge 50 mm verwendet. In **Tabelle 3** sind die Resultate der Berechnungen zusammengefasst. Aufgrund dieser Berechnung ist festzustellen, dass der Integritätsbereich für diese Leitung mit bis zu 100 % Wasserstoff kein

Table 3: Rissbildungskraft ΔK und Spannungsbereich D_r (Fehlerannahme: 3 mm Höhe und 50 mm Länge in Längsrichtung der Rohrschweißung oder Rundschweißung in Rohren mit der Abmessung 48" x 14,1 mm, bei einem Leitungsdruck von 66 bar)

Druckschwankung in bar	Fehlerausrichtung	Spannung in N/mm ²	Spannungswechsel in N/mm ²	Spannungsintensität ΔK in N/mm ² ·√m	Fehlerwachstum in 100 Jahren in mm
6,6	Rundnaht	292	29	3,4	0,37
	Längsnaht	150	15	1,7	0,37

anderer ist als für eine Erdgasleitung für die Fehlerprüfung in den Rohren oder Rundschweißungen. Aber all dies ist schon seit einiger Zeit bekannt: „Das größte technische Problem beim Transport von Wasserstoffgas unter hohem Druck ist die Möglichkeit eines geringen Ermüdungsrisswachstums von bestehenden Rissen oder rissähnlichen Fehlern im Rohrkörper oder in der Schweißnaht.“ [45].

Zusammenfassung und Ausblick

Allgemein anerkannt ist mittlerweile, dass Wasserstoff bei der Umstellung der Primärenergieversorgung auf regenerative Energiequellen einer der Hauptenergieträger sein wird. Im Zuge der schrittweisen Anpassung der Verbraucher in allen Sektoren wie Verkehr, Wärme und Industrie auf eine reine Wasserstofftechnologie, werden fossiles Erdgas, Methan aus Remethanisierung von gespeichertem Kohlenmonoxid/-dioxid, und Erdgas/Wasserstoff- bzw. Methan/Wasserstoffgemischen eine Brückentechnologie für viele Jahre bilden. Da für den Transport von großen Mengen Wasserstoff Rohrleitungen die ökonomischste und ökologischste Lösung darstellen, zielen derzeitige Untersuchungen im Transport- und Speicherbereich einerseits auf die Umstellung und Weiterverwendung von bereits existierenden Leitungsnetzen, andererseits auch auf die Optimierung moderner Leitungsrohr-Stahlwerkstoffe für Neuinstallationen. Im Fokus stehen hier sowohl Wasserstoff/Gasgemische, als natürlich auch reiner Wasserstoff. Die derzeit zur Werkstoffqualifizierung diskutierten Versuche und deren Hintergrund, sowie die hauptsächlichsten normativen Anpassungen auf eine Wasserstoffinfrastruktur wurden in der vorliegenden Arbeit vorgestellt.

Hauptaugenmerk der Mannesmann Line Pipe GmbH liegt derzeit auf der Entwicklung und dem Nachweis der Verwendbarkeit von Stahlgütern für neue Leitungen. Im Rahmen von internen und geförderten Projekten wurden und werden umfangreiche Untersuchungen mit unterschiedlichsten alten und neuen Werkstoffen durchgeführt. Diese sind in der vorliegenden und in früheren Veröffentlichungen beschrieben. Aus den Erkenntnissen und Erfahrungen sieht das aktuelle Konzept „H2ready“ für Rohre für den Transport von Wasserstoffgas folgende wesentlichen Merkmale vor. Durch die Vermeidung von Oberflächenunregelmäßigkeiten wie Kerben oder Absätze auf der Rohrinneinnenseite werden unter Innendruck lokale Spannungsüberhöhungen vermieden. Hierdurch sinkt zum einen die Wahrscheinlichkeit, dass im Betrieb blanke Metalloberflächen erzeugt werden, die einen potentiellen Angriffspunkt für die Dif-

fusion von Wasserstoff in den Werkstoff darstellen. Zum anderen wird so kritisches Risswachstums unterbunden, welches ansonsten bereits vor Erreichen der Streckgrenze des Materials einsetzen und zu einem verfrühten Bauteilversagen führen könnte. Ein verringerter Kohlenstoffgehalt, bzw. ein verringertes Kohlenstoffäquivalent, hat eine bessere Schweißbarkeit und damit einen geringeren Wasserstoffeintrag zur Folge. Die Reduzierung des Anteils an unerwünschten Begleitelementen Phosphor und Schwefel führt bei der Stahlherstellung zu geringerer Segregation und zu weniger inneren Ungängen, und damit in letzter Konsequenz zu weniger inneren Angriffspunkten für den Wasserstoff. Ebenso positiv auf den Widerstand gegen Wasserstoffangriff wirkt sich die Einstellung einer optimalen Mikrostruktur aus. Dies wird bei der Mannesmann Line Pipe durch die Verwendung von thermo-mechanisch (TM) gefertigtem Material erreicht. Aufgrund des angepassten Prozesses sowohl bei der Vormaterial- als auch bei der Rohrherstellung kann eine Einschränkung der Maximalwerte für Streckgrenze und Zugfestigkeit garantiert werden. Dies wiederum führt zu einer Vereinheitlichung der Auslastung unter Innendruck, und damit zu einer Vermeidung von lokalen Überlasten. Bislang durchgeführte Untersuchungen in Wasserstoffdruckgas lassen auch die Verwendung höherfester Rohrleitungsgütern oberhalb von API 5L X52 als geeignet für die Verwendung als Transportleitungen erscheinen. Mittels höherer Festigkeit wird eine Erhöhung des Transportdrucks oder eine Reduzierung der Wanddicke der Rohre ermöglicht. Dies wiederum hat einen verringerten Ressourcenverbrauch und einen reduzierten Energieeinsatz bei der Herstellung zur Folge. Somit sind „H2ready“-Rohre von Mannesmann Line Pipe sauber, sicher und wirtschaftlich.

Aspekte der Weiterverwendung bereits existierender Gasleitungen und deren Umstellung auf Wasserstoff sind ebenfalls Inhalt des Papers. Dabei wird auf die aktuellen Arbeiten zur Erstellung einer Umstellungsroadmap eingegangen. Weiterhin berichtet der niederländische Netzbetreiber N.V. Nederlandse Gasunie von seinen praktischen Erfahrungen bei der Umnutzung einer Erdgasleitung auf den Wasserstofftransport. Hier stehen insbesondere Rissfortschrittsbetrachtungen im Vordergrund. Dabei wurde mit Hilfe von bruchmechanischen Ansätzen geprüft, wann eine mögliche Ungänge zu einem Riss führen kann, und ob das Risswachstum innerhalb der vorgesehenen Lebensdauer zu einer unzulässigen Fehlergröße führt. Die Auslegung des Leitungsbetriebs erfolgte

auf Basis der konservativen Berechnungen. Laufende und zukünftige Untersuchungen und Tätigkeiten widmen sich der Vervollständigung der technischen Untersuchungen und der weiteren Optimierung neuer Leitungsrohrwerkstoffe, sowie Auslegung des Betriebs von auf Wasserstoff umgestellten Altleitungen. Ziel ist die Minimierung der Konservativität derzeitiger Kriterien zum möglichst ökonomischem und ökologischem Betrieb von Wasserstofftransportleitungen, unter Beachtung aller sicherheitsrelevanten Aspekte.

Literatur

- [1] 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.)
- [2] Doetsch, C.: Säulen der Energiewende – Technologien zur Systemintegration. Vortrag auf dem 19. Fachkongress Zukunftsenergien der EnergieAgentur.NRW im Rahmen der E-world energy & water 2015, 10.02.2015, Essen
- [3] Tangermann, S.: Windgas für die Energiewende. Vortrag auf dem 7. Deutschen Wasserstoff Congress 2016, 05.07.2016, Berlin
- [4] van Gerwen, R.; Eijelaar, M.; Bosma, T.: Hydrogen in the Electricity Value Chain. DNV GL - Group Technology & Research, Position Paper 2019
- [5] Wurster, R.: Motivation für Wasserstoff und aktuelle Technologien. Vortrag auf dem Rhein-Ruhr-Wasserstoff-Workshop, 20. Januar 2016, Duisburg
- [6] Dialogprozess Gas 2030 – Erste Bilanz. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi, Oktober 2019
- [7] Bonhoff, K.: Marktvorbereitung und Kommerzialisierung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie. 7. Deutscher Wasserstoff Congress 2016, Berlin, 05.07.2016
- [8] Grube, T.; Robinius, M.; Stolten, D.: Infrastrukturbedarf einer H₂-Kraftstoffversorgung für NRW auf Basis Erneuerbaren Stroms. Vortrag auf dem Rhein-Ruhr-Wasserstoff-Workshop 2.0, 07.09.2017, Duisburg
- [9] Diewald W.: Wasserstoffstrategie Bund und Länder. Obleutetagung des DVGW, Bonn, 13.09.2019
- [10] Nitsch, J.: Die Energiewende nach COP 21 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung; Kurzstudie für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V., 07.03.2016. Available: https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Joachim_Nitsch_Energiewende_nach_COP21_Langversion.pdf. [Zugriff am 22.09.2017].
- [11] Pressemitteilung vom 26.09.2019 auf www.greenpeace-energy.de
- [12] Jakobus, S.: Wasserstoff in der Stahlindustrie – Erzeugungsmöglichkeiten und Einsatzmöglichkeiten in der Zukunft. H2-Congress, Berlin, 05./06.07.2016
- [13] Internet-Link: <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsprojekt-roadmap-gas-2050/>, aufgerufen am 24.10.2019
- [14] Meng, B.; Gu, C.; Zhang, L.; Zhou, C.; Li, X.; Zhao, Y.; Zheng, J.; Chen, X.; Han, Y.: Hydrogen effects on X80 pipeline steel in high-pressure natural gas/hydrogen mixtures. International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017), 11, S. 7404 – 7412
- [15] Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages: Grenzwerte für Wasserstoff (H₂) in der Erdgasinfrastruktur. WD 8 - 3000 - 066/19 (2019)
- [16] Kuron, D: Wasserstoff und Korrosion. Verlag Irene Kuron, 2000 (ISBN 3-923623-03-8)
- [17] Kirchheim, R.: Solubility and Diffusivity of Hydrogen in Complex Materials. Physica Scripta, T94, 58-57, (2001)
- [18] Wipf, H.: Solubility and Diffusivity of Hydrogen in Pure Metals and Alloys. Physica Scripta, T94, 53-51, (2001)
- [19] Kirchheim, R.: Solid solutions of Hydrogen in Complex Materials. In: Solid State Physics, Ehrenreich, H.; Spaepen, F. (eds.), Elsevier, Amsterdam, (2004), Vol. 59, 203-305
- [20] Pundt, A.; Kirchheim, R.: Hydrogen in Metals: Microstructural Aspects. Annu. Rev. Mater. Res., (2006), 36, 555-608
- [21] Tröger, M.; Bosch, C.; Brauer, H.: Untersuchungen zur Beständigkeit hochfester HFI-geschweißter Rohre für den Wasserstofftransport. Oldenburger Rohrleitungsforum 2014, S. 233/43 (Proc. Conf.)

14. Praxistag Korrosionsschutz

01. Juli 2020, RuhrCongress, Bochum
www.praxistag-korrosionsschutz.de

SAVE THE DATE!

- [22] 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
- [23] API Specification 5L, 46th edition (2018-04): Specification for Line Pipe
- [24] DIN EN ISO 3183 „Petroleum and natural gas industries – Steel pipe for pipeline transportation systems“ (2018-09)
- [25] Mannesmann Line Pipe Microsite „Wasserstoff“: www.mannesmann-innovations.com
- [26] DIN EN ISO 643 „Stahl – Mikrophotographische Bestimmung der erkennbaren Korngröße (2017-09)
- [27] ASTM E 1681 „Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials“ (2013)
- [28] ASTM E 399 „Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials“ (2019)
- [29] Pfeiffer, W.; Wackermann, K.: Feierliche Laboreröffnung und Fachworkshop „Die Wirkung von Wasserstoff beherrschen – Das neue Fraunhofer IWM Wasserstofflabor.“ Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg, 10./11.04.2019
- [30] ASTM F 1624 „Standard Test Method for Measurement of Hydrogen Embrittlement Threshold in Steel by the Incremental Step Loading Technique“ (2018)
- [31] ASTM E 647 „Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates“ (2015)
- [32] 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
- [33] Kesten, M.; Schlecker, H.; Schlerckmann, H.: Schäden an Stählen in gasförmigem Wasserstoff. In: Korrosion verstehen - Korrosionsschäden vermeiden. H. Gräfen, A. Rahmel (Ed.), Verlag Irene Kuron, Bonn, 1994, 32/7
- [34] Maier, H. J.; Popp W.; Kaesche, H.: Hydrogen Effects on Cyclic Deformation Behaviour of a Low Alloy Steel: In: Hydrogen Effects in Materials, Thompson, A. W.; Moody, N. R. (eds.), The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, Pennsylvania, USA, (1996)
- [35] 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
- [36] Gräfen, H.; Pöpperling, R.; Schlecker, H.; Schlerckmann, H.; Schwenk, W.: CERT-Untersuchungen an Leitungsrohrstählen über eine Korrosionsgefährdung durch wasserstoffhaltige Gase bei hohen Drücken. Werkstoffe und Korrosion, 39, 1988, 517
- [37] Wackermann, K.; Schweizer, WF.; Pfeiffer, W.: Wasserstoffversprödung metallischer Werkstoffe: Adsorption, Diffusion und Werkstoffeigenschaften. gwf Gas + Energie 2-3 (2019), S. 66-75
- [38] 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
- [39] 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
- [40] Fekete, J.R.; Sowards, J.W.; Amaro, R.L.: Economic Impact of Applying High Strength Steels in Hydrogen Gas Pipelines. Int. J. Hydrogen Energy, 40 (2015), 33, S. 10547-10558.
- [41] DIN EN 12732:2013+A1:2014 „Gasinfrastruktur - Schweißen an Rohrleitungen aus Stahl - Funktionale Anforderungen“
- [42] DVGW GW 350 „Schweißverbindungen an Rohrleitungen aus Stahl in der Gas- und Wasserversorgung - Herstellung, Prüfung und Bewertung“ (2015-06)
- [43] Preparing for the hydrogen economy by using the existing natural gas system as a catalyst (NATURALHY). EU 6th Framework Programme, Contract No. SES6/CT/2004/502661
- [44] BS 7910:2013+A1:2015 “Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures”
- [45] Anderson, E.; et al.: Analysis of the potential transmission of hydrogen by pipeline in Switzerland. Bericht zur 2. World Hydrogen Energy Conference, Zürich, Schweiz, 21.-24.08.1978

SCHLAGWÖRTER: Energiewende, Wasserstofftransport, Gasinfrastruktur

AUTOREN



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



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



OTTO JAN HUISING
N.V. Nederlandse Gasunie
Tel. +31 6 1100 5729
O.J.C.Huising@gasunie.nl