Übergang zu einer Wasserstoffwirtschaft durch nutzbar machen der bestehenden Infrastruktur

Forschungsvorhaben „H_2-PIMS“: Wasserstoff im Erdgasnetz sicher transportieren

Elke Wanzenberg, Marco Henel, Holger Brauer, Eric Tamaske, Hartmut Neumann, Albert Großmann und Ken Wackermann

Power-to-Gas, Wasserstoff, Rohrleitungen, Gastransportnetz, Wasserstoffversprödung, HYPOS, Stahl, Werkstoffqualifizierung, Lebensdauermodell, PIMS

Wasserstoff ist ein zentrales Element zum Gelingen der Energiewende. In diesem Kontext werden werkstoffseitige Wechselwirkungen und damit verbundene Sicherheitsaspekte im Energietransportbereich immer wichtiger. Die Grundlage für solch eine Betrachtung bilden umfangreiche Werkstoffuntersuchungen (z. B. Kerbschlagbiege- und Zugversuche) an den Bestandswerkstoffen der Gasbranche. Ergänzend dazu liefern Risswachstumsversuche, die die Wachstumsgeschwindigkeit von Rissen infolge der Wasserstoffversprödung beschreiben, die notwendigen Informationen um existierende Sicherheitsbetrachtungen innerhalb des Pipeline Integrity Management Systems (PIMS) anzupassen. Ausgehend von diesen Daten geben zustandsbeschreibende Modelle und Algorithmen Auskunft über den aktuellen Zustand des Gastransportnetzes. Mit Hilfe von Prognosealgorithmen entsteht auf dieser Grundlage eine Zustandsaussage für die Zukunft. Daraus kann der Betreiber Maßnahmen zur Ertüchtigung des Transportnetzes veranlassen. Das HYPOS-Projekt H_2-PIMS erweitert somit die bestehenden PIMS-Modelle um die Komponente Wasserstoff und ermöglicht damit zusätzlich Zustandsaussagen zum Grad der Wasserstoffversprödung an den Transportleitungen sowie einer möglichen Rissausbreitung in Abhängigkeit der Betriebsweise.

Research project “H_2-PIMS”: safe transport of hydrogen in the natural gas grid

Hydrogen is of central importance for a successful energy transition. In this context, material-induced degradation processes and associated safety aspects are one focus for secure gas transport. Safety considerations are currently adequately addressed with the Pipeline Integrity Management Systems (PIMS). The basis for PIMS are extensive material investigations (e.g. notched bar impact bending and tensile tests) on existing materials used in the gas industry. Hydrogen exposure influences material degradation. The growth rate of cracks due to hydrogen embrittlement is defined by crack growth tests and added as algorithm to the existing safety considerations within PIMS. Based on current (condition-orientated) information of the gas transmission network, a prognosis algorithm predicts likely future conditions. With the help of this forecast, the operator can define and initiate measures to upgrade the gas transmission network. The HYPOS project H_2-PIMS adapts the existing PIMS models for hydrogen admixture and enables additional status statements on the degree of hydrogen embrittlement at the transmission lines as well as a possible crack propagation depending on the mode of operation.

1. Einleitung

Regenerativ erzeugter Wasserstoff ist ein Schlüsselenergieträger der Energiewende zum Erreichen der Klimaziele-Ziele[1] nach COP21[2]. Er kann als Energiespeichermedium zeitliche und räumliche Schwankungen ausgleichen, die bei der Energieproduktion und beim Energieverbrauch entstehen. Damit Wasserstoff seine Stärke als Energiespeicher („Power-to-Gas") entfalten und zur Versorgungssicherheit beitragen kann, ist unter anderem eine zuverlässige und sichere Infrastruktur mit Rohrleitungen und Anlagentechnik nötig. Die Idee ist, die bestehende Gasinfrastruktur[3] inkl. ihrer Untergrundspeicher für den Transport, die Verteilung und die Speicherung von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen sowie ausgewählte Teilbereiche für reinen Wasserstoff zu nutzen bzw. umzufunktionieren. Die Herausforderung besteht in einem sicheren Umgang mit den sehr speziellen physikalischen Eigenschaften des Wasserstoffes, z. B. seinem Einfluss auf die Festigkeit und die Zähigkeit der eingesetzten Werkstoffe. Entsprechend sind diese Einflüsse besonders hinsichtlich der Sicherheit der Gasinfrastruktur zu untersuchen.

Gemeinsam entwickeln daher die Partner DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Ontras Gastransport GmbH, Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM und Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH hierzu ein Integritätsmanagementsystem (PIMS - Pipeline Integrity Management System), welches die Betriebssicherheit der Erdgasinfrastruktur für den Transport von wasserstoffreichen Gasen (Erdgas-Wasserstoff-Gemische) nachweisen und gewährleisten soll. Das Projekt startete im Juli 2016 und wird Ende 2019 abgeschlossen sein. Das Gesamtbudget des Projekts beträgt etwa 3 Mio. € und wird im Rahmen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) Zwanzig20-Programms unter dem Dach von HYPOS „Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany" (HYPOS) gefördert.

Im Fokus der Zusammenarbeit stand zunächst die Identifizierung möglicher wasserstoffinduzierter Schädigungsformen an den Werkstoffen von Bestandsleitungen (historisch gewachsene Gasinfrastruktur), der typischen Vorschädigungen und der vorherrschenden Betriebsbedingungen. Auf dieser Grundlage erfolgte die Auswahl der zu untersuchenden Werkstoffe (**Tabelle 1**) und die Definition der Versuchsbedingungen (**Tabelle 2**). Mit der so ermittelten Versuchsmatrix werden aktuell Untersuchungen zur Degradationssicherheit durchgeführt, deren Ergebnisse die erforderlichen Materialinformationen bzw. Kennwerte liefern und somit die Entwicklung des PIMS für wasserstoffreiche Gase erst ermöglichen.
Des Weiteren wird eine Roadmap zur Qualifizierung und Umwidmung von Teilabschnitten des bestehenden Gasnetzes für den Transport von wasserstoffreichen Gasen bis hin zum Transport von reinem Wasserstoff entwickelt.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden Instandhaltungsstrategien und Sicherheitskonzepte für den Transport von Wasserstoff und wasserstoffhaltigen Gasen in bestehenden Gasleitungen abgeleitet. Zeitgleich können daraus neue Standards und Erweiterungen der bestehenden Regelwerke für den Betrieb von umgewidmeten Gastransportleitungen entstehen.

Tabelle 1: Zusammenstellung der untersuchten Werkstoffe

Bestandswerkstoffe (IWM)	
Werkstoffklasse nach DVGW G 410	**Baujahr / Errichtung**
bis StE 210 / St 34/35 / Grade A	1958
StE 240 / St 37/38 / L245 / Grade B	1985
StE 360 / St 52/53 / L360 / X52	1972
StE 480 / St 70 / L485 / X70	1992
Neu gefertigte Werkstoffe (SZMF)	
P255 (DIN EN 10217) L245 (DIN EN 10208) Grade B	
P355 (DIN EN 10217) L360 (DIN EN 10208) X52 / X52MS (API 5L)	
L485 (DIN EN 10208) X70 (API 5L)	

Tabelle 2: Versuchsbedingungen der vorgenommenen Untersuchungen

Versuchsbedingungen	**Bestandswerkstoffe**	**Neuartige Werkstoffe**
Temperatur	Raumtemperatur (RT)	10 °C
Drücke	Bei jeweiligen Einsatzdrücken	Max. 80 bar
Wasserstoffanteil	25 Vol.-% und 100 Vol.-%	
Referenzmessung	Stickstoff bzw. Wasserstoff/Methan-Gemisch	
Aufbereitung der Proben	Konservativer Ansatz: Schleifen statt Polieren der Proben	
Beladung der Proben	Gasbeladung bei RT statt elektrolytischer Beladung	

[1] Die Erderwärmung soll auf deutlich unter 2 °C, möglichst auf 1,5 °C gegenüber vorindustriellen Werten begrenzt werden. Für Deutschland bedeutet das 2 °C-Ziel nach aktuellen Erkenntnissen, die Treibhausgasemissionen um mindestens 95 % bis 2050 gegenüber 1990 zu mindern.

[2] United Nations Framework Convention on Climate Change, 21st Conference of the Parties.

[3] Sammelbegriff für ehemalige Stadtgas- und heutige Erdgasleitungen, die in regional unterschiedlichen Anteilen schon heute Biomethan und Wasserstoff als Zumischung transportieren.

2. Qualifizierungs- und Umwidmungs-Roadmap von Gastransportleitungen

Der Schwerpunkt dieser Roadmap richtet sich auf die Qualifizierung (bis 10 Vol.-% Wasserstoff im Erdgasnetz) bis hin zur Umwidmung von Erdgastransportleitungen für den reinen Wasserstofftransport. Zum einen erfolgt die Bewertung unter Berücksichtigung des aktuellen Handlungsspielraums des DVGW-Regelwerkes mit einer möglichen Zumischung von bis zu 10 Vol.-% Wasserstoff zum Erdgas (siehe DVGW-Regelwerk G 262) und die Technische Regel für Rohrfernleitungsanlagen (TRFL). Zum anderen wird der Ansatz einer vollständigen Umwidmung von (Teil-)Netzen auf den Transport von reinem Wasserstoff vertieft. Dies wird ein wichtiger Schritt in Richtung der Einhaltung des notwendigen klimapolitischen Ziels (COP21) sein. Damit lassen sich technisch-wirtschaftliche Probleme vermeiden, die langfristig bei einer stufenweisen Erhöhung des Wasserstoffanteils aufkommen, z. B. wenn die zulässige Zumischung von 10 Vol.-% auf 25 Vol.-% Wasserstoff angehoben wird. Mit jeder neu festgelegten Zumischgrenze müssten sonst erneut die Änderung der Gaskennwerte und deren Einfluss auf die Komponenten in der Gasversorgung untersucht werden. Dies könnte bedeuten, dass schon einmal ausgetauschte Elemente nicht für das neue Gasgemisch geeignet sind und somit erneut ersetzt werden müssen. Ein weiterer Aspekt, den es bei Erdgas-Wasserstoff-Gemischen zu beachten gilt, ist die Schwankung der Gasbeschaffenheit. Der Wasserstoffanteil kann aufgrund des volatilen Erzeugungscharakters im Gasnetz zeitlich variieren. Dieses Band an Wasserstoffkonzentrationen und deren Auswirkungen auf die Komponenten im Netz sind (regelungs-)technisch anspruchsvoller zu beherrschen als bei einer konstanten Gaszusammensetzung, da hier noch keine Erfahrungen vorliegen.

Einen wesentlichen Inhalt der Roadmap bildet dabei die Identifizierung der notwendigen Anpassungsmaßnahmen. Diese umfassen Rohrleitungswerkstoffe, Wasserstofftoleranzen bei den Kunden (z. B. laut DVGW-Studien), Sicherheitskonzepte, Instandhaltungsstrategien, Betriebskonzepte/Kapazitätsplanungen, Messtechnik, Kommunikation und die rechtlichen Aspekte.

Für die Qualifizierungs-Roadmap ist bei den Fragestellungen zur Instandhaltungsstrategie und zu rechtlichen Aspekten das bestehende technische Regelwerk des DVGW geeignet. Sicherheitstechnisch ist zu prüfen, wie sich die Ex-Zonen durch die Zumischung von Wasserstoff verändern und darauf aufbauend das Sicherheitskonzept anzupassen. 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 ermittelt, auch im Rahmen von „H_2-PIMS", jedoch ist allgemein bei 10 Vol.-% Wasserstoff ein unkritischer Einsatz anzunehmen[4]. Wesentlich kritischer zu betrachten ist die Wasserstofftoleranz bei den Kunden, hier besonders die CNG-Tankstellen, Porenspeicher und bestimmte Industriezweige (z. B. Glas- oder Stahlproduzenten). Sollten diese Gaskunden nicht betroffen sein, kann heute schon die Qualifizierung von Rohrleitungen relativ schnell und unkompliziert durchgeführt werden.

Die Umwidmung auf den Transport von 100 % Wasserstoff ist nur sinnvoll, wenn alle angeschlossenen Kunden dies anfordern. In diesem Fall vereinfacht sich die Kommunikation bzw. Öffentlichkeitsarbeit. Die Frage der Wasserstofftoleranz beim Kunden entfällt und der messtechnische Aufbau vereinfacht sich. Das Sicherheitskonzept und die Instandhaltungsstrategie (Leitungsprüfintervalle) für reine Wasserstoffleitungen bauen auf den Erfahrungswerten von Wasserstoffnetzen der chemischen Industrie auf (z. B. EIGA IGC Doc 121/14), welche sich jedoch inhaltlich nicht wesentlich vom DVGW-Regelwerk unterscheiden. Ausnahme bildet hier die Leckageüberwachung/-erkennung.

Eine wesentliche Fragestellung, die gemeinsam mit den zuständigen Behörden zu klären ist, ist derzeit die rechtliche Situation der Umwidmung einer Erdgasleitung: Je nach Anwendungsfall gelten für den Gastransport gemäß Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) die Gashochdruckleitungsverordnung (GasHDrLtgV) und für den Transport von z. B. Produktgasen, Prozessgasen, etc. u. a. das Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPG) und die Rohrfernleitungsverordnung (RohrFLtgV). Daraus können sich zum einen unterschiedliche Betriebsanweisungen (DVGW vs. TRFL) und Handlungsempfehlungen ergeben, welche z. B. mit der Nachrüstung eines Leckageerkennungs- und Ortungssystems gemäß TRFL verbunden sein können. Zum anderen ist zu prüfen, ob eine nach EnWG/GasHDrLtgV genehmigte und betriebene Erdgasleitung inkl. aller Rechte und Pflichten auch ohne ein erneutes Genehmigungsverfahren nach UVPG/RohrFLtgV weiter betrieben werden darf.

Schlussendlich sind noch die bestehenden Rohrleitungswerkstoffe auf ihre allgemeine Verträglichkeit für Wasserstoff zu prüfen, wobei hier die Erfahrungen und Untersuchungen der chemischen Industrie sowie aus dem laufenden Projekt unterstützen, um die Eignung der Leitungen bewerten zu können.

[4] Siehe DVGW-Studie: Wasserstofftoleranz der Erdgasinfrastruktur inklusive aller assoziierten Anlagen, Abschlussbericht, DVGW-Förderkennzeichen G 1-02-12, 2014 sowie DVGW-Regelwerk G260/262 Ausgaben März 2013/ September 2011.

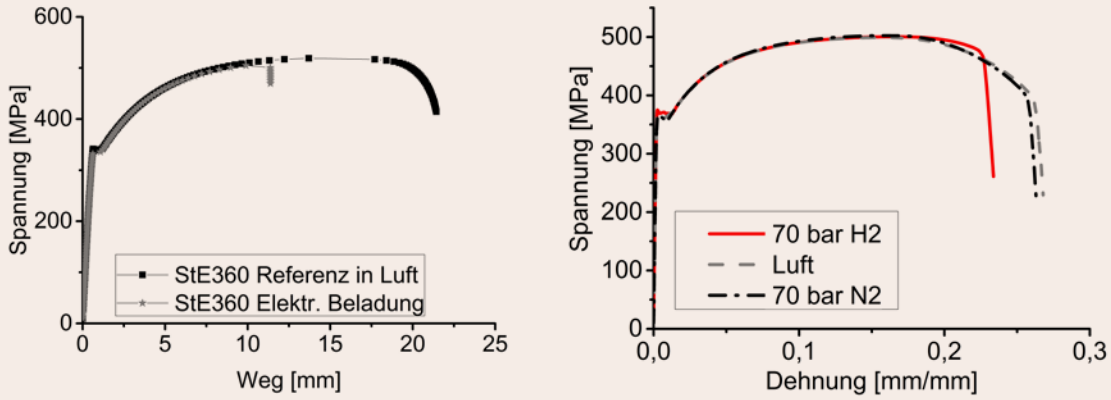

Bild 1: Links: Ergebnisse von Langsamzugversuchen (SSRT) an Flachproben mit elektrochemischer in situ Beladung.
Rechts: Ergebnisse von Versuchen an Hohlproben mit Druckgasfüllung

3. Ergebnisse aus Grunduntersuchungen

Das Fraunhofer IWM qualifiziert im Projekt die in **Tabelle 1** genannten Bestandswerkstoffe. Dafür wurden alte Rohrsegmente entnommen und daraus Proben gefertigt. Die Ergebnisse fließen als Eingangsgrößen in das Integritätsmanagementsystem (PIMS) zur Auslegung neuer und zur Bewertung bestehender Ferngasleitungen zum Transport von Wasserstoff ein. Das Testprogramm umfasst eine Vielzahl verschiedenster Prüfmethoden, wie Zugversuche für die Festigkeitsbewertung und Versuche zur Identifikation wasserstoffspezifischer Versagensmechanismen. Lokale hydrostatische Zugspannungen, wie sie beispielsweise vor Rissspitzen auftreten, können zu einer lokal erhöhten Wasserstofflöslichkeit und Wasserstoffversprödung führen. In den Versuchen ist daher eine kontinuierliche Anpassung der Wasserstoffverteilung durch Diffusion an ein sich änderndes Spannungsfeld zu gewährleisten. Damit sich die maximale Wasserstoffschädigung durch die Wasserstoffverteilung im Versuch einstellen kann, werden die Versuche sehr langsam durchgeführt. Das Versuchsprogramm umfasst:

1. Kerbschlagbiegeversuche: Diese Versuche werden bei Raumtemperatur an unbeladenen Referenzproben und an vorbeladenen Proben durchgeführt.
2. Zugversuche: Es werden Zugversuche mit sehr langsamer Abzugsrate mit Versuchszeiten bis zu zwei Tagen durchgeführt. Diese Versuchsart wird im Englischen „Slow-Strain-Rate-Test" (SSRT) genannt. Die Versuche werden mit in situ Wasserstoffbeladung durchgeführt. Dabei werden die Proben während des Versuchs mit Wasserstoff beladen. Referenzversuche erfolgen ohne Beladung. Durch SSRT kann auf einfache Weise geprüft werden, ob ein bestimmter Werkstoff in einer definierten wasserstoffhaltigen Atomsphäre einer Wasserstoffversprödung unterliegt.
3. Versuche zur Rissinitiierung an Kerben: Bei statischen Spannungen deutlich unterhalb der Streckgrenze kann es durch die Wasserstoffversprödung erst zu einer Rissinitiierung und dann zu einem Versagen durch Rissausbreitung kommen. Im Rahmen des Projekts werden Fehler konservativ als Risse betrachtet. Es werden Proben mit künstlich eingebrachtem Startriss hergestellt. An diesen wird die minimale nötige Spannungsintensität gemessen, die bei statischer Last zu einem Risswachstum führt. Diese Spannungsintensität wird nach ASTM E 1681[5] K_{IEAC} genannt. EAC ist im Englischen die Abkürzung für „Evironmental Assisted Cracking". K_{IEAC} wird als die maximal zulässige Beanspruchung an bekannten Kerben und Rissen betrachtet, die einen sicheren Betrieb gewährleistet.
4. Risswachstumsversuche: Die Wasserstoffversprödung kann zu einer erhöhten Wachstumsgeschwindigkeit von Rissen führen. Eventuell muss dies bei der Sicherheitsbetrachtung durch das PIMS gesondert betrachtet werden. Es werden Risswachstumsversuche bei Raumtemperatur mit langsamer Frequenz zur Messung der Paris-Erdogan-Geraden in Druckwasserstoff und zur Referenz in Luft durchgeführt. Die Ergebnisse ermöglichen den Effekt der zyklischen Druckschwankungen im Betrieb zu berücksichtigen.
5. Es werden Versuche zur Messung der kritischen Spannungsintensität K_{IC} oder des J-Integrals mit in situ Wasserstoffbeladung und als Referenz an Luft durchgeführt.

Exemplarisch werden hier die Ergebnisse der Zugversuche am Bestandswerkstoff StE 360 dargestellt. In einem ersten Schritt wurden Zugversuche an Flachproben mit elektrochemischer Beladung durchgeführt. Die Beladung erfolgt mit 0,1 molarer Natronlauge, versetzt mit 1 g/l Thioharnstoff, mit einer Stromdichte von 10 mA/cm². Die Zugkurven (**Bild 1**, links) zeigen ein Versagen durch die

[5] ASTM E1681 - 03(2013) - Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials, 2013.

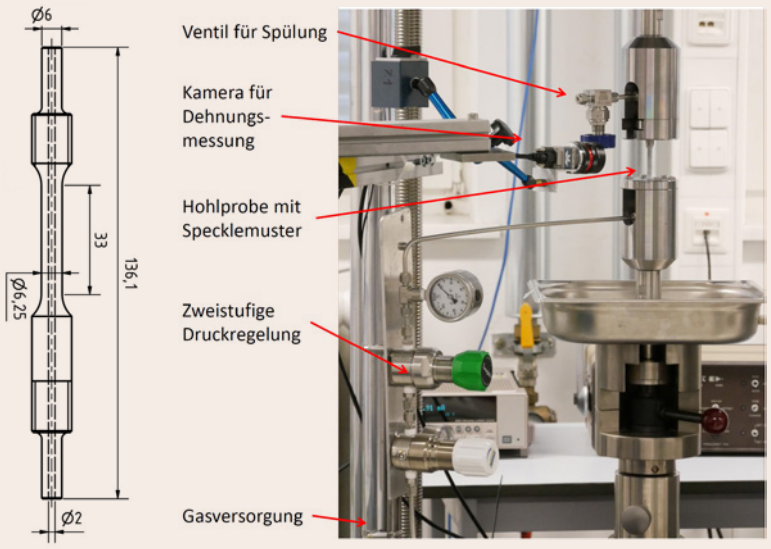

Bild 2: Links: Zeichnung der Geometrie der Hohlprobe. Rechts: Hohlprobenprüfstand

Tabelle 3: Untersuchte Werkstoffe der Firma MLP. Güte und Abmessungen

Güte	Abmessungen (Außendurchmesser x Wanddicke)
P235 (DIN EN 10217)	610 mm x 12,7 mm
L245 (DIN EN 10208)	610 mm x 12,7 mm
X52MS	219 mm x 8,2 mm
X70M (API 5L) L485 (DIN EN 10208)	508 mm x 12,7 mm

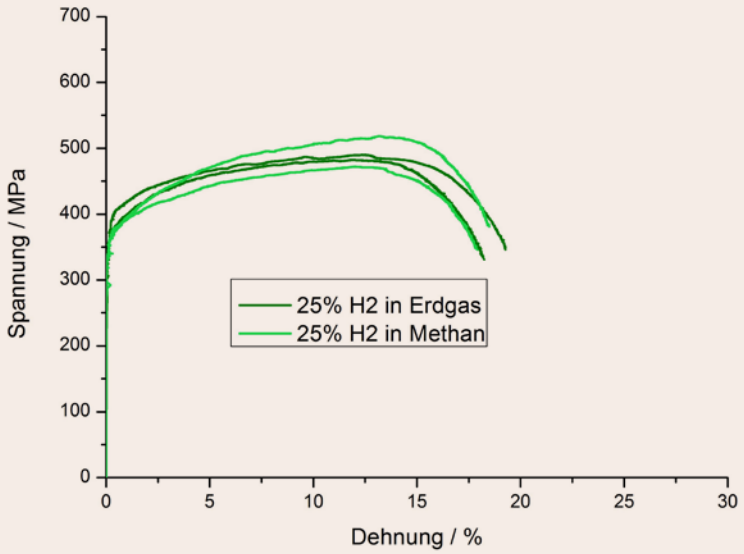

Bild 3: SSRT-Test Zugkurven des Werkstoffes L360 in Wasserstoff/Methan und Wasserstoff/Erdgas-Gemisch

Wasserstoffbeladung bereits bei Erreichen der Zugfestigkeit. In den Referenzversuchen ohne Beladung wird eine deutliche höhere Bruchdehnung erreicht.

Da die elektrochemische Beladung konservative, aber weniger betriebsrelevante Materialkennwerte für Rohrfernleitungen für den Gastransport liefert, wurde entschieden die weiteren Versuche mit einer Gasbeladung durchzuführen. Dafür wurde ein Versuchsstand für Zugversuche an Hohlproben aufgebaut. Dies sind Proben mit innenliegendem Hohlraum, die mit Wasserstoffinnendruck beaufschlagt werden können. Eine Skizze der Probengeometrie und ein Foto des Versuchsaufbaus zeigt **Bild 2**. Die Probe wird in eine Zugprüfmaschine eingebracht und an eine permanente Gasversorgung angeschlossen. Ein Ausblasen mit Wasserstoffgas vor Versuchsbeginn reduziert die Gaskontamination mit Luft auf ein Minimum. Durch eine zweistufige Druckreglung wird eine sehr hohe Regelgenauigkeit des Versuchsdrucks erreicht. Die Dehnungsmessung erfolgt optisch über die Speckle-Interferometrie. Die Abzugsrate in den Versuchen ist mit 3,5 µm/min sehr langsam, um dem Wasserstoff ausreichend Zeit zur Umverteilung und Anpassung an das sich verändernde Spannungsfeld zu geben. Es ergeben sich eine durchschnittliche Dehnrate von ungefähr 1,1 x 10^{-6} s^{-1} und eine Versuchszeit von ein bis eineinhalb Tagen je nach Bruchdehnung.

Für den Versuch wird die Probe von Innen mit gasförmigem Wasserstoff mit dem betriebsrelevanten Druck von 70 bar gefüllt. Auch bei Verwendung der Hohlprobe ist eine Reduktion der Bruchdehnung durch die Wasserstoffbeladung, gegenüber den Referenzversuchen an Luft und mit Stickstofffüllung zu erkennen, (siehe **Bild 1**, rechts). Im Vergleich zur elektrochemischen Beladung zeigt der Werkstoff bei einer gasförmigen Beladung eine geringere Beeinflussung durch Wasserstoff. Doch auch hier bricht die Probe vorzeitig im Vergleich zur Referenzprobe mit Stickstoffinnendruck. Die elektrochemische Beladung führt somit für die Bewertung von Gasleitungen zu unnötig konservativen Ergebnissen. Auch auf der Bruchfläche ist der Effekt der Wasserstoffversprödung zu erkennen. Mit gasförmiger Wasserstoffbeladung kommt es zu einer großflächigen spröden Bruchmorphologie im Vergleich zu den duktilen Bruchwaben der Referenzversuche. Diese Ergebnisse zeigen, dass der alte Rohrleitungswerkstoff StE 360 prinzipiell anfällig für die Wasserstoffversprödung ist und eine weitere Qualifizierung durch ein umfassendes Testprogramm mit Risswachstumsversuchen und der Messung bruchmechanischer Kennwerte nötig ist.

Das Fraunhofer IWM baut dafür aktuell ein neues Wasserstofflabor mit einer Prüfmaschine für die Werkstoffqualifizierung in einer wasserstoffhaltigen Druckgasatmosphäre auf. Mit der Maschine werden alle gän-

gigen Versuche zur Werkstoffqualifizierung wie beispielsweise Zugversuche oder zyklische Ermüdungs- und Risswachstumsversuche bei isothermer Temperatur bis 90 °C und in Wasserstoffgas bei einem Druck von bis zu 1.000 bar möglich sein. Mit diesem Versuchsaufbau werden die Rohrleitungswerkstoffe unter einsatzrelevanten Bedingungen qualifiziert. Die Ergebnisse werden Eingang in das PIMS finden.

Die Salzgitter Mannesmann Forschung (SZMF) qualifiziert im Projekt die in **Tabelle 1** genannten neuen Werkstoffe. Hierbei handelt es sich um hochfrequent-induktiv (HFI) längsnahtgeschweißten Leitungsrohre der Firma Mannesmann Line Pipe (MLP). Güte und Abmessungen der Rohre sind in **Tabelle 3** aufgelistet.

Die Anfälligkeit der Rohre und HFI-Nähte gegenüber Wasserstoffversprödung wird anhand von Slow-Strain-Rate Tensile Tests (SSRT) geprüft. Die Testbedingungen -speziell die Dehnrate- sind vergleichbar zu den Untersuchungen der Bestandswerkstoffe des Fraunhofer IWM. Es werden SSRT-Tests an Rundzugproben aus dem Grundwerkstoff sowie aus der HFI-Schweißnaht bei einer in-situ Druckgasbeladung von 80 bar durchgeführt. Die Proben werden bei einer Dehnrate von 2,0 x 10^{-6} s^{-1} unter einsinniger Belastung bis zum Bruch geprüft.

Testmedien sind 100 % Wasserstoff, 25 % Wasserstoff in Methan sowie Stickstoff als Referenzmedium. Untersuchungen an dem Werkstoff L360 in den Testmedien 25 % Wasserstoff in Erdgas sowie 25 % Wasserstoff in Methan zeigen für beide Testmedien das gleiche Bruchverhalten, so dass ein Einfluss der neben Methan in Erdgas vorhandenen Begleitstoffe auf das Werkstoffverhalten ausgeschlossen werden konnte (siehe **Bild 3**). Im Weiteren wird daher für die Gasgemische nur Methan als Gasbasis genutzt.

Zur Bewertung der Duktilität wurden nach dem SSRT-Test 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_{H2} und in Stickstoff Z_{N2} bestimmt, die relative plastische Dehnung E_{PR} aus dem Verhältnis der plastischen Dehnung der Proben nach dem Zerreißen in Wasserstoff E_{PH2} und in Stickstoff E_{PN2}.

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

Bei den Grundwerkstoffen getestet in 25 % Wasserstoff verweisen Zähigkeitskennwerte ≥ 90 % auf eine sehr gute Beständigkeit gegenüber wasserstoff-beeinflusster Korrosion. Unter 100 % Druckwasserstoff zeigt der Werkstoff L245 die besten Ergebnisse mit Zähigkeitskennwerten ≥ 95%. Auch die Proben der Güte L485 zeigen trotz der hohen Festigkeitsstufe gute Beständigkeit gegenüber Wasserstoff-beeinflusster Korrosion mit Zähigkeitskennwerten von ≥ 80% (**Bild 4**).

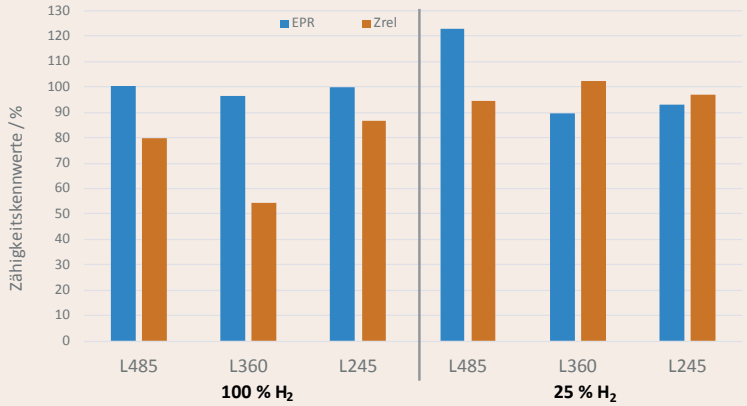

Bild 4: Z_{rel} = relative Brucheinschnürung, E_{PR} = relative plastische Dehnung; jeweils im Versuch unter Wasserstoff-Atmosphäre, bezogen auf die Referenz-Atmosphäre Stickstoff

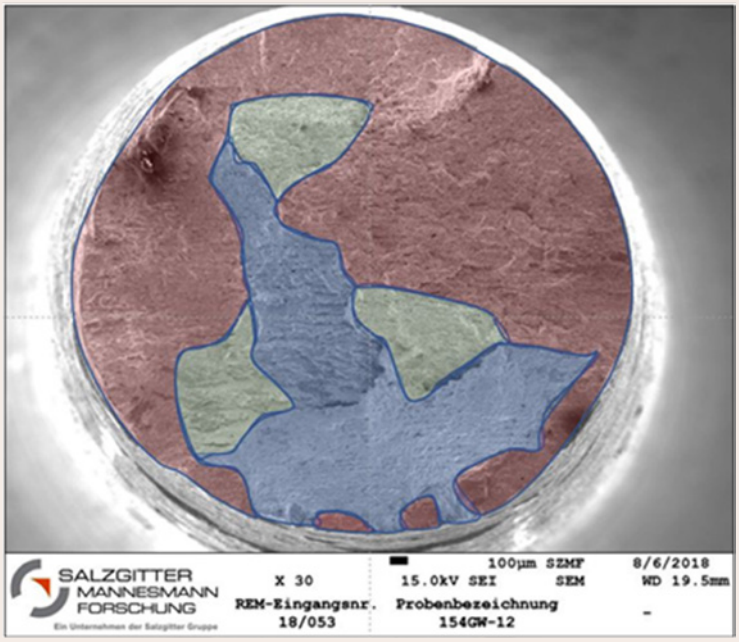

Bild 5: Bruchfläche einer in 80 bar Wasserstoff getesteten SSRT-Zugprobe des Werkstoffes L360, rot: Spaltbruch, blau: duktiler Bruch, grün: Mischfläche

An den Proben des Werkstoffes L360 ist ein leichter Einfluss der Wasserstoffversprödung zu erkennen: Die Proben weisen eine verringerte Brucheinschnürung mit Z_{rel} = 54 % sowie Sprödbruchanteile auf den Bruchflächen auf (**Bild 5**). In den Zugkurven (**Bild 6**) der L360-Proben wird beobachtet, dass der Wasserstoff das Bruchverhalten der Proben erst im Bereich hoher Dehnung

nach Erreichen der Zugfestigkeit beeinflusst. Bis in diesen Bereich verlaufen die Zugkurven gleichförmig unabhängig vom Testmedium. Ein Betrieb der Leitungsrohre im Bereich höherer Dehnung ist nicht vorgesehen, so dass hier mit einer Einschränkung für den Einsatz als Leitungsrohr nicht zu rechnen ist.

Aus der Literatur ist eine höhere Anfälligkeit für Wasserstoffversprödung mit steigender Festigkeitsstufe bekannt. Insofern sind die guten Ergebnisse des L485 Werkstoffes gegenüber den Ergebnissen des Werkstoffes L360 unerwartet. Die beiden Proberohre unterscheiden sich signifikant in ihrer Fertigungsroute. Bei der Herstellung des Vormaterials (für die spätere Rohrfertigung) im Warmwalzwerk, wurde der L360 normalisierend, der L485 thermomechanisch gewalzt. Somit weisen die beiden Werkstoffe unterschiedliche Gefügezustände auf, die in **Bild 7** gezeigt sind. Der L485 weist ein sehr feines und homogenes Gefüge aus, der L360 ein gröberes Gefüge mit ausgeprägten Seigerungszeilen, was sich negativ auf die Beständigkeit gegen Wasserstoffversprödung auswirken kann. In weiteren Untersuchungen wird daher auch ein zweiter Werkstoff der Festigkeitsstufe L360 (Güte X52MS) untersucht, der ebenfalls thermomechanisch gewalzt ist und ein feineres Gefüge ohne ausgeprägte Seigerungszeilen aufweist (siehe **Bild 7**). Die Ergebnisse zu diesen Untersuchungen stehen noch aus.

Die HFI-Schweißnähte zeigen durchgehend gute Beständigkeit gegenüber Wasserstoffversprödung unter den getesteten Bedingungen. Die Zähigkeitskennwerte E_{PR} und Z_{rel} weisen bei allen getesteten Werkstoffen Werte > 80 % auf, sowohl bei den Tests unter Beimengung von 25 % Wasserstoff zu Methan, als auch bei Tests in reinem Druckwasserstoff (**Bild 8**).

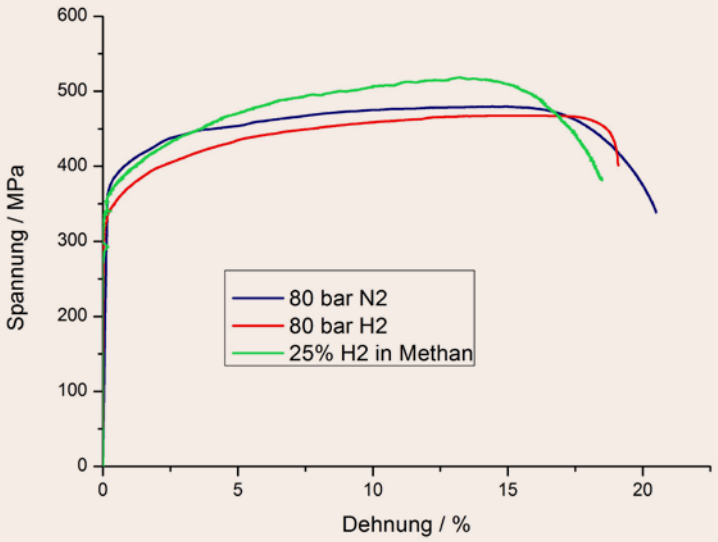

Bild 6: Zugkurven der SSRT-Tests am Werkstoff L360

4. Das H2-PIMS-Modell

Das Hauptziel eines PIMS ist die Darstellung der technischen Integrität und Sicherheit des bestehenden Erdgastransportnetzes für den Betreiber. Die aus dem PIMS resultierenden Aussagen sind zudem Grundlage für den technischen und wirtschaftlichen Betrieb des bestehenden Gastransportnetzes, die Sanierungsplanung und die Planung von Neubauten. Ausgangspunkt eines PIMS sind die technischen Daten des Gastransportnetzes, welche sich teilweise innerhalb der Betriebszeit ändern. Dies betrifft im Wesentlichen Zustandsdaten, welche aus der Instandhaltung oder den regelmäßigen Inspektionen der Erdgastransportnetze resultieren. So können sich z. B. KKS-Messdaten ändern, welche auf eine äußere Beeinflussung (Streustrom) zurückzuführen sind oder Isolierungsfehler auftreten (Beeinflussung durch Dritte). Auch Korrosion mit daraus resultierendem Materialabtrag oder mit der Zeit erkannte Schweißnahtfehler fließen in die Integritätsbewertung mit ein.

Ausgehend von diesen Daten wird durch geeignete Modelle und verifizierte Auswertealgorithmen der Zustand des Gastransportnetzes beschrieben und durch Prognosealgorithmen eine Zustandsaussage für die Zu-

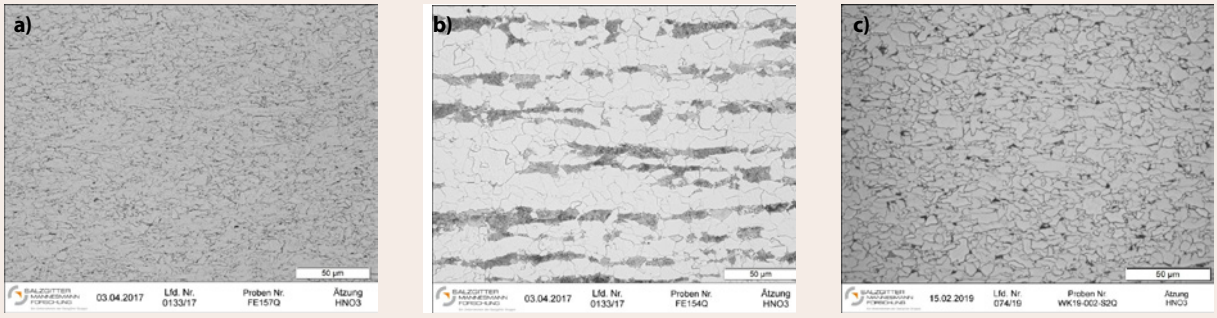

Bild 7: Gefügebilder der Werkstoffe a) L485, b) L360, c) X52MS

kunft vorgenommen. Mit diesen Zustandsaussagen werden, sofern erforderlich, durch den Betreiber Maßnahmen zur Ertüchtigung des Erdgastransportnetzes veranlasst oder auch strategische Entscheidungen wie der Neubau von Leitungsabschnitten getroffen.

Das H_2-PIMS erweitert dieses Vorgehen um den Aspekt Wasserstoff. Die wesentlichen Elemente in der Entwicklung des H_2-PIMS sind in **Bild 9** zusammengestellt.

Zur Entwicklung des H_2-PIMS werden im ersten Schritt zusätzliche Informationen zum Einfluss des Wasserstoffes auf den Werkstoff Stahl benötigt, welche Rückschlüsse auf das Schädigungsverhalten des Wasserstoffes auf die Erdgastransportleitungen ermöglichen. Diese zusätzlichen Informationen werden vom IWM und SZMF im Rahmen der Werkstoffuntersuchungen gewonnen und fokussieren im Kern auf die Zähigkeitseigenschaften des Stahls. Die Kerbschlagarbeit und Risswachstumsgrößen sind der Ausgangspunkt für die Beschreibung des Schädigungsmodells einer Rissinitiierung und eines Risswachstums an Rohren bzw. der Schweißnähte. Dazu werden unter anderem der K_{IEAC}-Wert, K_{IC}-Wert, das J-Integral und die Risswachstumsgrößen da/dN benötigt. Die Größen werden zudem in Abhängigkeit der Wasserstoffkonzentration und der in den Gasnetzen eingesetzten Festigkeitsklassen der Stähle differenziert.

Mit diesen zusätzlichen Informationen ist es möglich, wasserstoffbasierende Zustandsmodelle abzuleiten, welche Zustandsaussagen und -prognosen zur technischen Integrität und Sicherheit des Gastransportnetzes erlauben.

Wesentliche Eingangsgrößen einer wasserstoffabhängigen Zustandsbewertung sind neben den technischen und werkstofftechnischen Größen (z. B. Rohrgeometrie, Festigkeit) auch die Prozessgrößen des Gastransportnetzes (z. B. Druck-Zeit-Verlauf, Temperatur, Wasserstoffanteil). In Zukunft werden diese Kenntnisse des Netzbetriebes einen großen Einfluss in der Zustandsbewertung erhalten. So wird z. B. der quasistatische Ansatz des Innendruckes hin zu einem dynamischen Ansatz entwickelt, welcher eher einer sich ändernden Wasserstoffeinspeisung und den damit verbundenen Schädigungsmechanismen entspricht. Für die Integritätsbewertung sollen auch bauteilspezifische Besonderheiten des Gastransportnetzes Berücksichtigung finden. Im Detail erfolgen differenzierte Bewertungen für gerade Rohre, T-Stücke (**Bild 10**), Rohre mit Stutzen, Bögen und Reduzierstücke.

Im Ergebnis stehen Zustandsaussagen zum Grad der Wasserstoffversprödung an den Gastransportleitungen und einer möglichen Rissausbreitung in Abhängigkeit der Betriebsweise des Gastransportnetzes für den Zeitpunkt der Bewertung und in der Prognose. Die Zustandsaussagen werden neben den klassischen deterministi-

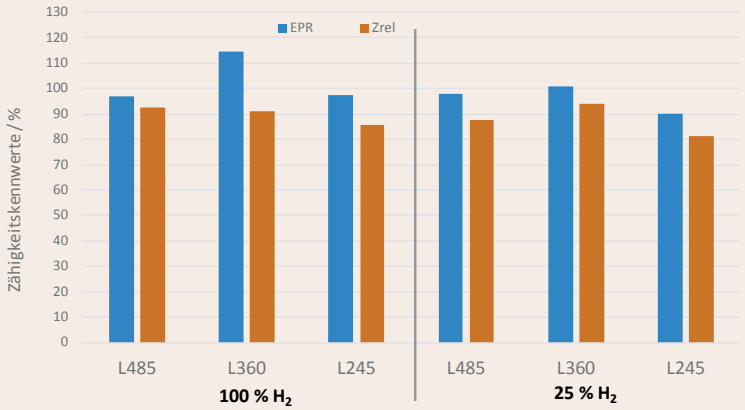

Bild 8: Zähigkeitskennwerte gemessen an den HFI-Nähten

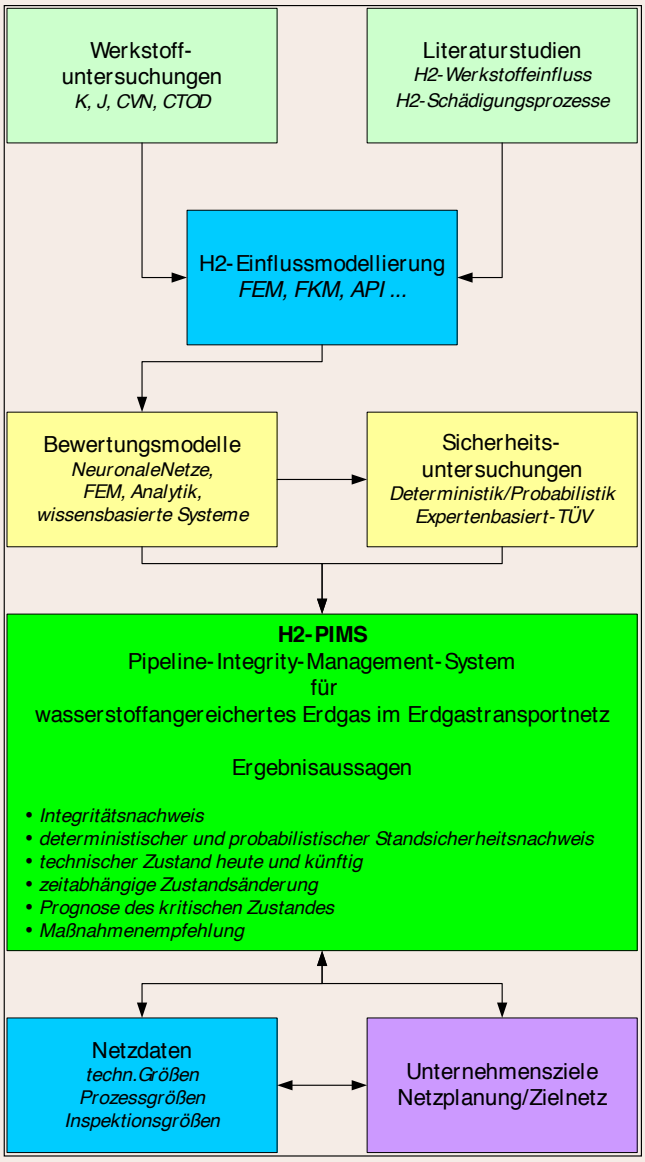

Bild 9: Grundstruktur H2-PIMS-Modellentwicklung

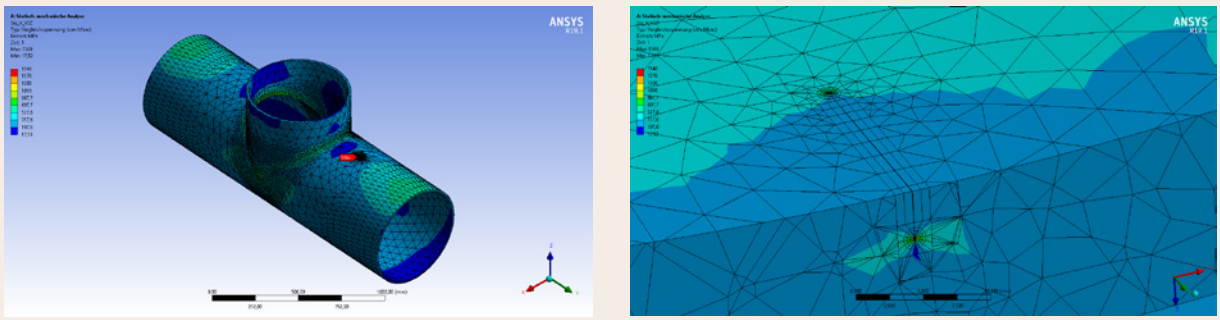

Bild 10: FE-Modell T-Stück mit Oberflächenanriss

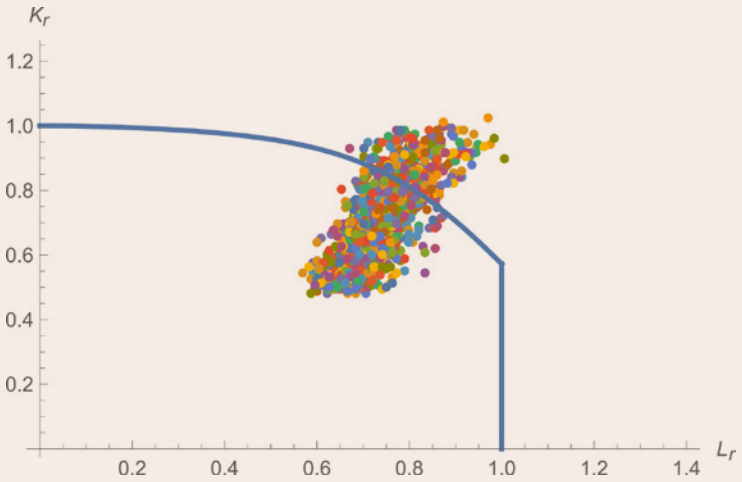

Bild 11: Statistische Bewertung

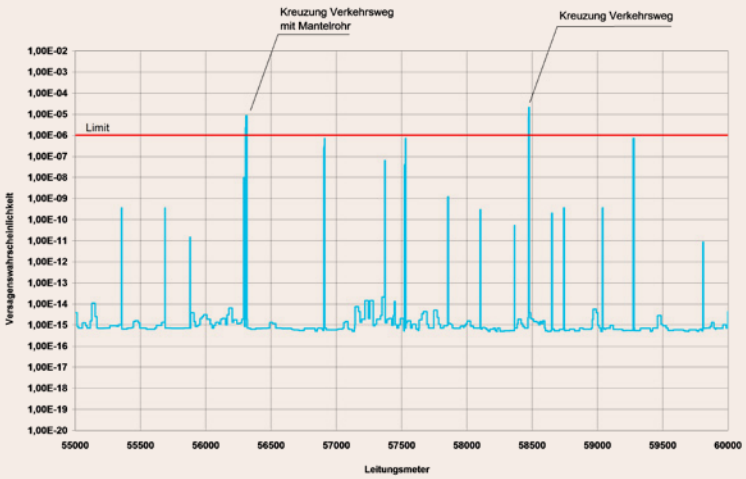

Bild 12: Beispielhafte Ergebnisse der H2-PIMS Zustandsbewertung

schen auch auf statistischen Nachweiskonzepten (**Bild 11**) basieren und somit über strukturbasierte Risikoanalyse (SRA) die quantitative Risikoanalyse (QRA) erlauben.

In **Bild 11** ist ein Teilergebnis einer statistischen Analyse dargestellt. Darin werden im sogenannten Failure Assessment Diagram (FAD) Ergebnispunkte dargestellt, welche aus streuenden Eingangsgrößen resultieren. Das FAD ist ein elastisch-plastisches Analysekonzept, welches die Zulässigkeitsaussage einer rissartigen Fehlstelle bezüglicher zweier Kriterien bewertet. K_r ist ein werkstoffspezifisches Kriterium, welches die Risszähigkeit des Werkstoffs auf den bauteilspezifischen Risswiderstand normiert, L_r ein lastspezifisches Kriterium, welches den Grad der Bauteilplastizierung ausdrückt.

Der Vorteil der statistischen Bewertungsmethoden liegt in der Berücksichtigung sehr unwahrscheinlicher Ergebnisse. Dadurch finden z. B. Messunsicherheiten bei der Vermessung von Risstiefen oder Schwankungen der Kerbschlagarbeit in der technischen Zustandsbewertung Eingang.

Die Zusammenführung der gewonnen Erkenntnisse und Implementierung aller Ergebnisse in die technische Zustandsbewertung des H_2-PIMS führt zu Ergebnissen, die für jeden Leitungsabschnitt, in dem sämtliche Eingangsdaten konstant sind, eine konstante Versagenswahrscheinlichkeit aufzeigen (SRA). Die Versagenswahrscheinlichkeit ändert sich an den Abschnittsgrenzen. Die Abschnitte können sehr kurz sein (z. B. der Einflussbereich einer Korrosionsstelle, Rissverdachtszonen, Schweißnähte) oder große Längen aufweisen, wenn der Regelquerschnitt konstant ist und keine Besonderheiten dokumentiert sind. Ein beispielhaftes Ergebnis ist in **Bild 12** dargestellt.

Durch Parameterstudien – insbesondere der theoretischen Alterung der Leitung im System – werden die Einwirkungen erkannt, welche in Zukunft kritisch werden können. Aus diesen Prognosen leitet sich eine Geltungsdauer für das Ergebnis ab. In der Regel werden hier Zeiträume in der Größenordnung von bis zu zehn Jahren angestrebt. Da Änderungen in den zugrundeliegenden Basisdaten (z. B. Risswachstum) das Ergebnis der geführten Zustandsbewertung verwerfen, ist während dieser Phase sicherzustellen, dass entsprechende Prozesse eingeleitet und verfolgt werden.

Diese Ergebnisse der SRA können später auch überall dort angewendet werden, wo im Rahmen der Planung und im Rahmen von Genehmigungsverfahren weitergehende sicherheitstechnische Betrachtungen gefordert werden, z. B. die Erstellung einer QRA. Mit einer SRA kann nicht nur gezeigt werden, dass die Forderung nach einer sicheren Planung auf Grundlage einer deterministischen Bemessung vorhanden ist, sondern dass die zu erwartenden Versagenswahrscheinlichkeiten unter Anwendung statistischer Bewertungsalgorithmen die Grenzwerte einhalten.

zwanzig20 PARTNERSCHAFT FÜR INNOVATION

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

HYPOS-Innovationsoffensive:
HYPOS steht für eines von zehn Projekten, welches im Rahmen des Programms „Zwanzig20-Partnerschaft für Innovation" durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird. Ziel von HYPOS ist es, „grünen" Wasserstoff durch Wasserelektrolyse aus erneuerbarem Strom im großtechnischen Maßstab für energiewirtschaftliche Anwendungen herzustellen – als effizienten Energieträger mit hervorragender Transport- und Speicherfähigkeit. Mit über 110 Partnern deutschlandweit kombiniert HYPOS mit Sitz in Leipzig die Kompetenzen aus Wirtschaft und Wissenschaft Mitteldeutschlands. Das HYPOS-Projekt „H_2-PIMS" schließt die Lücke zwischen der lokal voneinander getrennten Erzeugung und dem Verbrauch von grünem Wasserstoff und dient somit als Unterstützer der Energiewende.

Autoren

Dr. **Elke Wanzenberg**
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH |
Duisburg |
Tel.: +49 203 999 3172 |
e.wanzenberg@du.szmf.de

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

Dr. **Hartmut Neumann**
TÜV SÜD Industrie Service GmbH |
Tel.: +49 371 26737-22 |
hartmut.neumann@tuev-sued.de

Dr. **Ken Wackermann**
Frauhofer Institut für Werkstoffmechanik
IWM |
Tel.: +49 761 5142 492 |
ken.wackermann@iwm.fraunhofer.de:

Marco Henel
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH |
Leipzig |
Tel.: +49 341 245 124 |
marco.henel@dbi-gruppe.de

Eric Tamaske
ONTRAS Gastransport GmbH |
Leipzig |
Tel.: +49 341 27111 2386 |
eric.tamaske@ontras.com

Albert Großmann
Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH |
Tel.: +49 341 217 37 62 |
Albert.Grossmann@veenkergmbh.de