

Künftige Zustandsbewertung von H₂-führenden Hochdruckleitungen

Von Albert Großmann

Die technologische Verknüpfung der Umwandlung regenerativen Stroms in Wasserstoff mit dem Gastransport- und Gasspeichersystem eröffnet vielversprechende Möglichkeiten einer effizienten Energiespeicherung und Bereitstellung. Die Nutzung der bestehenden Erdgasinfrastruktur stellt die logische Konsequenz dar. Im Wesentlichen kann das Medium Wasserstoff in seiner gasförmigen Form auch mit der bestehenden Erdgasinfrastruktur transportiert und gespeichert werden, jedoch gilt es für die sichere und wirtschaftliche Nutzung dieser Infrastruktur einige spezifische Besonderheiten des Wasserstoffes zu beachten, die bis dato nicht im Fokus der klassischen Betriebsführung mit dem Medium Erdgas standen. Der folgende Fachbericht soll einen kurzen Überblick über die Besonderheiten einer Mischgasinfrastruktur und den derzeitigen Forschungs- und Entwicklungsstand geben.

Transport und Speicherung von Gasen

Die Technologie für Transport und Speicherung von Gas ist seit rund 100 Jahren erfolgreich im Einsatz. Der Transport großer Volumenströme und hoher Druckstufen erfolgt mit Stahlleitungen, die Speicherung in Kavernen oder Lagerstätten. Die Bau- und Betriebsprozesse dieser Infrastruktur wurden über die Zeit für die speziellen Eigenschaften der zu transportierenden Gase optimiert und wurden bei sich ändernden Rahmenbedingungen angepasst, so z. B. wie bei der Umstellung von Stadtgas auf Erdgas.

Mit den Pipeline-Integrity-Management-Systemen (PIMS) wurden Werkzeuge geschaffen, die den sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der Gasnetze unterstützen. Diese PIM-Systeme berücksichtigen für die Zustandsbewertung

Informationen der heute bekannten Einflüsse auf die Gasnetze. Sofern sich diese Einflüsse in der Zukunft ändern und Auswirkungen auf die Integritätsaussage haben, müssen entsprechende Anpassungen in den PIMS vorgenommen werden. Somit lautet die Aufgabe für H₂-führende Hochdruckleitungen, ein H₂-PIMS zu entwickeln. Gemeinsam entwickeln die Partner Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, TÜV SÜD Industrie Service GmbH und ONTRAS Gastransport GmbH hierzu ein H₂-PIMS für den Transport von wasserstoffreichen Gasen (Erdgas-Wasserstoff-Gemische). Das Projekt startete im Juli 2016 im Rahmen des Zwanzig20-Förderprogramms des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Dach des HYPOS e. V. „Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany“ (HYPOS).

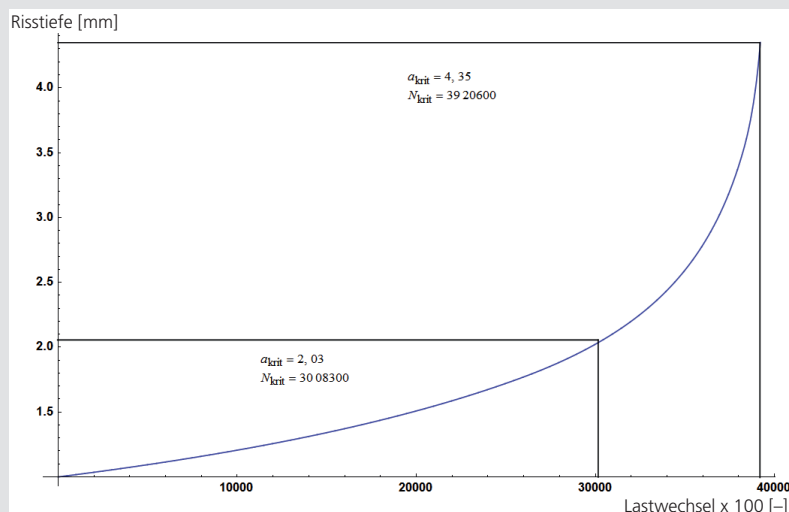


Bild 1: Risswachstum und Lastwechsel

Wirkung von Wasserstoff auf Stahl

Mit der Beimengung von Wasserstoff in das Erdgas wird das bestehende Gasnetz mit einem Medium beaufschlagt, das die Eigenschaften des Werkstoffes Stahl verändert. Dies betrifft neben einer Reduzierung der Zähigkeit des Stahls auch eine Anfälligkeit hin zu einer Rissinitiation und folgendem Risswachstum. Die Wirkung des Wasserstoffes auf die mechanischen Eigenschaften von Stahl wurde schon Ende der 1950er Jahre untersucht. Glatte Zugproben aus weichem Stahl wurden in reiner Wasserstoffatmosphäre gedehnt und die Einschnürung gemessen. Bereits bei einem Wasserstoffdruck von 1 bar zeigte sich

eine verringerte Einschnürung gegenüber Proben an der Luft, die bei zunehmendem Wasserstoffdruck bis 150 bar nur noch etwa 60 % der Ausgangseinschnürung betrug. Dabei wurde auch festgestellt, dass während des Dehnens im plastischen Bereich (Fließen) neue (aktive) Oberflächen geschaffen werden, an denen Wasserstoffmoleküle adsorbiert und dissoziiert werden.

Die Wirkung des Wasserstoffes auf Stähle wird anhand der bruchmechanischen Werkstoffkenngrößen der Stähle sichtbar. Die Bruchzähigkeit der Stähle wird mit wachsendem Wasserstoffangebot herabgesetzt und die Gefahr eines Anrisses steigt. Auch wenn die Belastungen an den Bauteilen (Stahlrohre, Armaturen) die kritischen Bruchzähigkeiten nicht erreichen, so kann auch bei kleinen Lastschwankungen ein „stabiler“ Riss wachsen. Lastschwankungen in reinen Erdtransportnetzen werden im Allgemeinen vernachlässigt, da diese für die üblichen integritätsbestimmenden Einflüsse nicht von Bedeutung sind. Unter dem Aspekt der mit Wasserstoff in Verbindung gebrachten Schädigungsmechanismen können jedoch auch geringe Lastschwankungen bei wasserstoffinduzierten Schäden lebensdauerbestimmend für die Bauteile sein (**Bild 1**).

Insofern liegen mit den bekannten Schädigungsmechanismen des Wasserstoffes neue integritätsbestimmende Einflüsse vor, die für den sicheren Betrieb der Erdgastransportnetze unter Wasserstoffeinfluss Beachtung finden müssen.

Anpassung der Zustandsbewertung

Die Hauptziele eines PIMS sind die Darstellung der technischen Integrität und die Sicherheit des bestehenden Erdgastransportnetzes für den Betreiber. Die aus dem PIMS resultierenden Aussagen sind zudem Grundlage für den technischen und wirtschaftlichen Betrieb des bestehenden Erdgastransportnetzes, die Sanierungsplanung und die Planung von Neubauten. Ausgangspunkt eines PIMS sind die technischen Daten des Erdgastransportnetzes, die sich teilweise während des Betriebes ändern. Dies betrifft im Wesentlichen Zustandsdaten, die aus der Instandhaltung oder der regelmäßigen Inspektionen der Erdgastransportnetze resultieren. So können sich z. B. Messdaten des Kathodischen Korrosionsschutzes (KKS) ändern, die 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 ein.

Ausgehend von diesen Daten werden durch geeignete zustandsbeschreibende Modelle und verifizierte Auswertelgorithmen der Zustand des Erdgastransportnetzes beschrieben und durch Prognosealgorithmen eine Zustandsaussage in der Zukunft 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 H2-PIMS

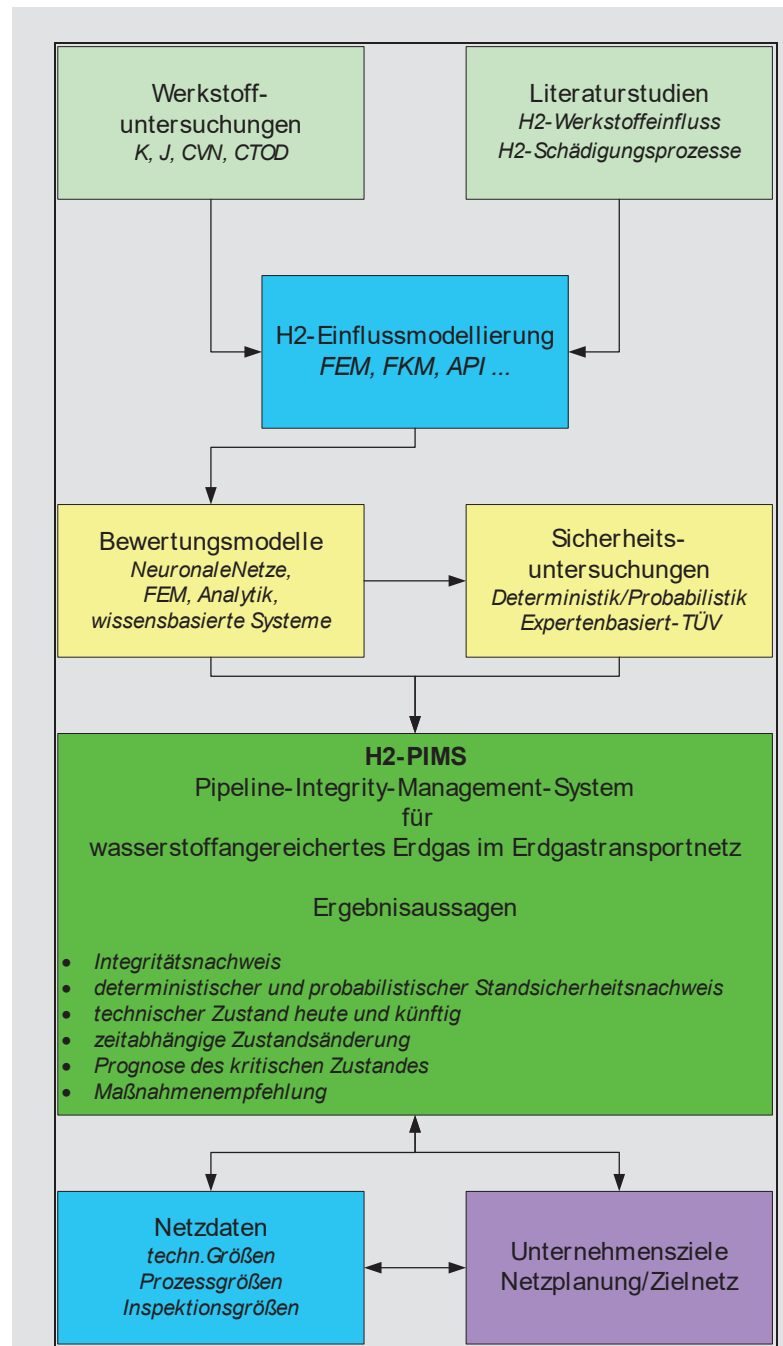


Bild 2: Grundstruktur H2-PIMS-Modellentwicklung

erweitert dieses Vorgehen um den Aspekt des Wasserstoffes. Die wesentlichen Elemente in der Entwicklung des H2-PIMS sind in **Bild 2** zusammengestellt.

Zur Entwicklung des H2-PIMS werden im ersten Schritt zusätzliche Informationen zum Einfluss des Wasserstoffes auf den Werkstoff Stahl benötigt, die Rückschlüsse auf das Schädigungsverhalten des Wasserstoffes auf die Erdgastransportleitungen ermöglichen. Diese zusätzlichen Informationen werden im Rahmen der Werkstoffuntersuchungen gewonnen und fokussieren auf die Zähigkeitseigenschaften des Stahls. Die Kerbschlagarbeit und Risswachstumsgrößen

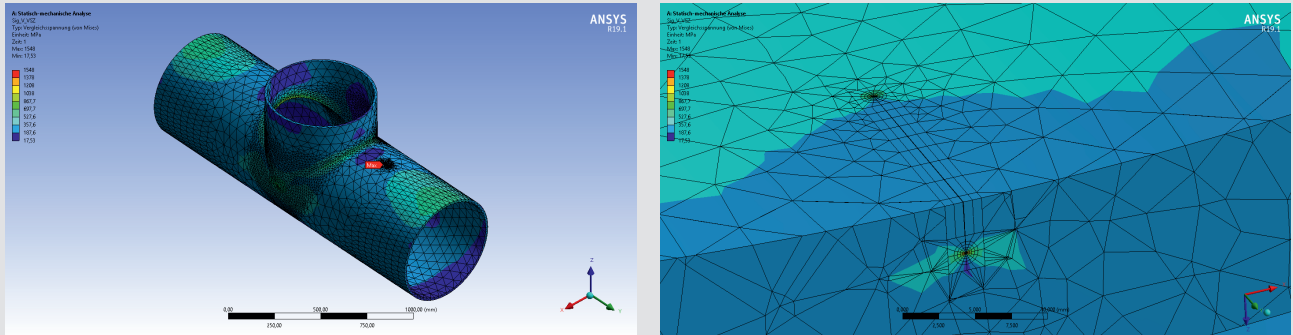


Bild 3: Finite-Element-Modell T-Stück mit Oberflächenanriss

sind Basis für die Beschreibung des Schädigungsmodells einer Rissinitiiierung und eines Risswachstums an Rohren bzw. an Schweißnähten. Dazu werden u. a. die Risszähigkeit unter Wasserstoffatmosphäre K_{IEAC} , Risszähigkeit an Luft K_{IC} , 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, die 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. Rohrgeometriegrößen, Festigkeitsgrößen, auch die Prozessgrößen des Gastransportnetzes, z. B. Druck-Zeit-Verlauf, Temperatur und Wasserstoffanteil. In Zukunft werden diese Kenntnisse des Netzbetriebes einen großen Einfluss auf die Zustandsbewertung haben. So wird z. B. der quasistatische Ansatz des Innendruckes hin zu einem dynamischen Ansatz entwickelt, der 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 3**), Rohre mit Stützen, Bögen und Reduzierstücke.

Im Ergebnis stehen Zustandsaussagen zum Grad der Wasserstoffversprödung an den Erdgastransportleitungen und einer möglichen Rissausbreitung in Abhängigkeit von der Betriebsweise des Erdgastransportnetzes für den Zeitpunkt der Bewertung und in der Prognose.

Die Zustandsaussagen werden sowohl auf den klassischen deterministischen als auch auf statistischen Nachweiskonzepten (**Bild 4**) basieren und somit auch strukturbasierte Risikoanalyse (SRA) die quantitative Risikoanalyse (QRA) erlauben.

In Bild 4 ist ein Teilergebnis einer statistischen Analyse dargestellt. Darin werden im sogenannten Failure Assessment Diagram (FAD) Ergebnispunkte dargestellt, die aus streuenden Eingangsgrößen resultieren. Das FAD ist ein elastisch-plastisches Analysekonzept, das die Zulässigkeitsaussage einer rissartigen Fehlstelle bezüglich zweier Kriterien bewertet. K_r ist ein werkstoffspezifisches Kriterium, das die Risszähigkeit des Werkstoffs auf den bauteilspezifischen Risswiderstand normiert. L_r ist ein lastspezifisches Kriterium, das 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 gewonnenen Erkenntnisse und Implementierung aller Ergebnisse in die technische Zustandsbewertung des H₂-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 oder Schweißnähte, bzw. große Längen aufweisen, wenn der Regelquerschnitt konstant ist und keine Besonderheiten dokumentiert sind. Ein exemplarisches Ergebnis ist in **Bild 5** dargestellt.

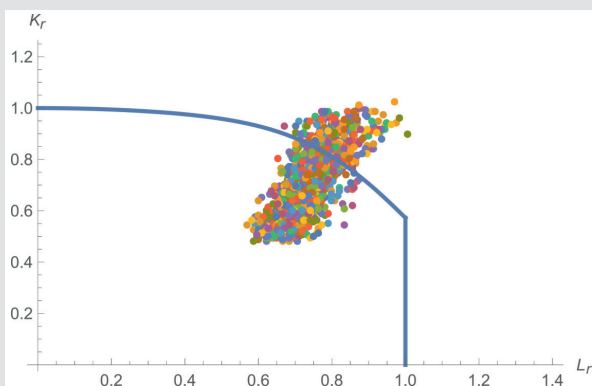


Bild 4: Statistische Bewertung

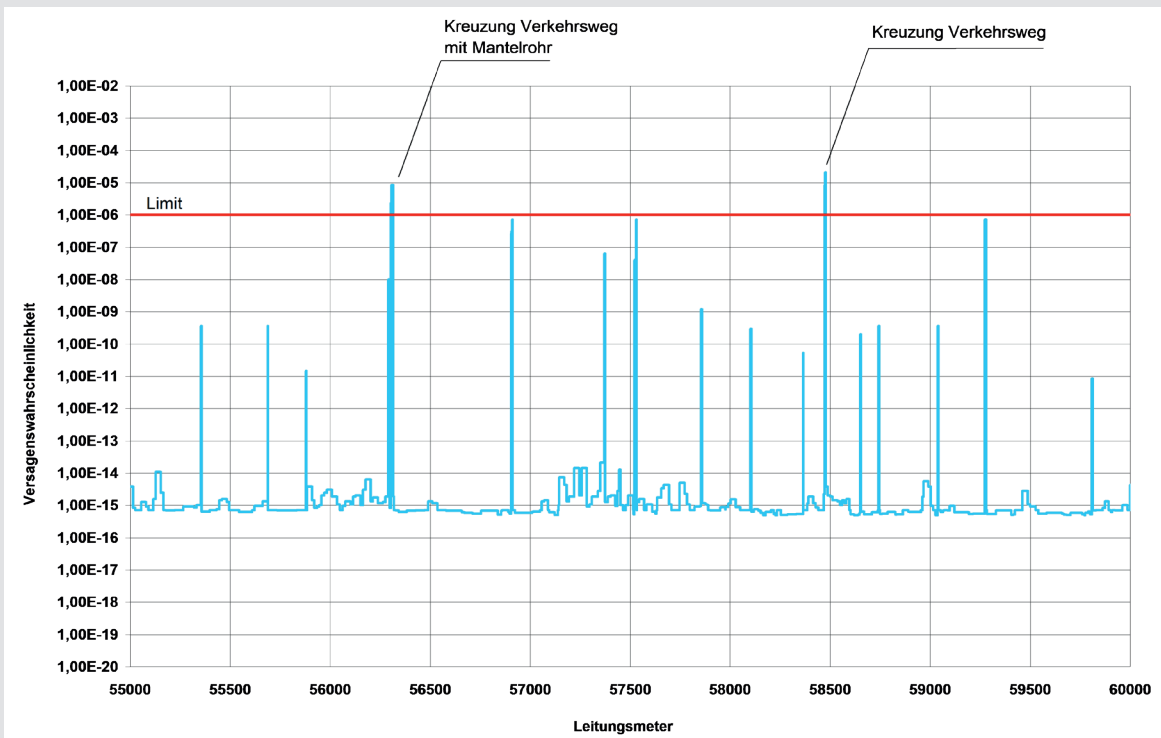


Bild 5: Exemplarische Ergebnisse der H₂-PIMS-Zustandsbewertung

Durch Parameterstudien – insbesondere der theoretischen Alterung der Leitung im System – werden die Einwirkungen erkannt, die 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 zugrunde liegenden 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 Genehmigung weitergehende sicherheitstechnische Betrachtungen gefordert werden, z. B. bei der 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.

Fazit

Wasserstoff ist ein zentrales Element zum Gelingen der Energiewende. In diesem Kontext sind auch werkstoffseitige Wechselwirkungen und damit verbundene Sicherheitsaspekte im Energietransportbereich zu berücksichtigen. Die Grundlage für eine Zustandsbewertung der H₂-beaufschlagten Erdgastransportnetze bildet die genaue Kenntnis der Werkstoffeigenschaften der eingesetzten Stähle. Diese

können z. B. aus Kerbschlagversuchen oder Risswachstumsversuchen gewonnen werden, die Eingang in die Bewertung mit einem H₂-PIMS finden.

Ausgehend von den zu erhebenden Daten kann durch neue zustandsbeschreibende Modelle und Algorithmen die Integrität der Erdgastransportnetze dargestellt und durch Prognosealgorithmen eine Zustandsaussage in der Zukunft vorgenommen werden, so dass die Betreiber Maßnahmen zur Ertüchtigung des Transportnetzes für die Wasserstoffzukunft veranlassen können.

Das H₂-PIMS erweitert somit die bestehenden PIMS-Modelle um die Komponente Wasserstoff und ermöglicht Zustandsaussagen an Erdgastransportleitungen unter Zumischung von Wasserstoff im Erdgas.

SCHLAGWÖRTER: Wasserstoffhochdruckleitungen, Zustandsbewertung

AUTOR



Dr.-Ing. **ALBERT GROSSMANN**
Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH,
Leipzig
Tel. +49 341 21737 62
albert.grossmann@veenkermbh.de