

Spannungsmessungen an Gashochdruckleitungen unter Praxisbedingungen

Jürgen POHL*, Jörg HILDEBRAND**, Andreas DIEMAR**, Albert GROßMANN***

* Hochschule Anhalt, Fachbereich EMW, Bernburger Str. 57, 06366 Köthen,
j.pohl@emw.hs-anhalt.de

** Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Marienstraße 7A,
99421 Weimar, joerg.hildebrand@uni-weimar.de, andreas.diemar@uni-weimar.de

*** Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH, Leibnizstraße 25, 04105 Leipzig
Albert.Grossmann@veenkermbh.de

Kurzfassung. Die Bewertung erdverlegter Gashochdruckleitungen nimmt immer mehr an Bedeutung zu, da Dauer und Kosten von Instandhaltungsmaßnahmen sowie die Sicherheit der Gashochdruckleitungen wesentliche Größen der Versorgungssicherheit mit Erdgas darstellen. Diese Größen können durch genaue Bewertungsverfahren positiv beeinflusst werden, wodurch es von größtem Interesse ist, die genauen Beanspruchungszustände zu kennen. Die Messung realer Spannungsverhältnisse an erdverlegten Gashochdruckleitungen trägt wesentlich zu einer besseren Bewertung der Standsicherheit der Druckleitungen bei. Prinzipiell sind für derartige Aufgaben Messungen mit Dehnungsmessstreifen, die röntgenographische Spannungsanalyse sowie Methoden der Ultraschallspannungsmessung geeignet. Diese unterschiedlichen Varianten der Erfassung von Spannungszuständen müssen auch unter Praxisbedingungen prüfpraktisch umsetzbar gestaltet werden. Dies setzt eine zweckentsprechende Qualifizierung in Anwendung und Auswertung voraus. Anhand von Beispielen von Praxismessungen im Baustellenbereich werden die Bedingungen, Einflussfaktoren und die Genauigkeit der Messmethoden erläutert und zugehörige Ergebnisse präsentiert.

1. Einführung

Die Gewährleistung des störungsfreien Betriebes und der technischen Sicherheit von erdverlegten Gashochdruckleitungen stellt das vorrangige Interesse der Leitungsbetreibergesellschaften dar. Dieses Ziel wird durch die kontinuierliche technische Bewertung der Gashochdruckleitungen auf Basis deren IST-Zustandes und Umsetzung entsprechender Sanierungsmaßnahmen erreicht [1 – 3].

Die technische Bewertung stützt sich nicht allein auf die dokumentierten Leitungseigenschaften, sondern nutzt auch externe Erkenntnisse aus Molchläufen, Aufgrabungen oder Spannungsmessungen. Einen besonderen Stellenwert hat dabei die Spannungsmessung, deren Ergebnisse in Qualität und Aussagekraft stark variieren können. Die Genauigkeit einer Spannungsmessung beeinflusst in hohem Maße das



Bewertungsergebnis, da Unschärfen der Messung mit entsprechenden Sicherheiten in der Bewertung begegnet wird. Es ist deshalb erklärtes Ziel, den Unschärfen der Messung durch genauere Messverfahren zu begegnen und somit die Ergebnisse der Spannungsmessung zum ständigen Bestandteil der technischen Bewertung zu machen, ohne die Aussagekraft der technischen Bewertung zu mindern.

Bekannte Möglichkeiten zur Spannungsmessung sind das $\sin^2\psi$ -Verfahrens als Standardverfahren der röntgenographischen Spannungsmessung und die Nutzung des akusto-elastischen Effektes bei den Ultraschallmethoden, bei denen der Einfluss von Dehnungs- bzw. Spannungszuständen auf die Schallgeschwindigkeiten unterschiedlicher Wellenarten angewendet wird [4 -6]. Sowohl die röntgenographische Spannungsanalyse als auch die Anwendung von Ultraschallmessmethoden gestatten prinzipiell die zerstörungsfreie Ermittlung von Spannungen im Objekt Hochdruckrohr. Die Nutzung dieser Messmethoden im Baustellenbereich erfordert allerdings eine zweckentsprechende Adaption der anzuwendenden Gerätetechnik auf die vorherrschenden Bedingungen und eine validierte Auswertung. Voraussetzung hierfür sind entsprechende Vorarbeiten zur Qualifizierung im Laborbereich.



Bild 1. Gashochdruckleitung

2. Qualifizierung von röntgenographischer und Ultraschallspannungsmessung

Während im Fall der röntgenographischen Spannungsanalyse die benötigten Materialparameter für die untersuchten Rohrwerkstoffe hinlänglich bekannt sind [7, 8], müssen im Fall der Bestimmung von Spannungen mittels Ultraschall zunächst die akusto-elastischen Koeffizienten als Zusammenhang zwischen Geschwindigkeits- bzw. Laufzeitänderung und Spannungen für die jeweilige Wellenart, Polarisationsrichtung und räumlicher Zuordnung für den jeweiligen Werkstoff ermittelt werden. Eine derartige Vorgehensweise ist vorteilhaft in einachsigen Versuchen im Zug- und Druckbereich mit geeigneten Probenformen realisierbar. Bild 2 zeigt links eine in einer Zug-Druckprüfmaschine eingespannte Flachprobe C, auf der ein Ultraschallprüfkopf A angekoppelt ist und sich das Röntgendiffraktometer B (Fabrikat Xstress 3000 G2 der Firma Stresstech) in Messposition befindet.

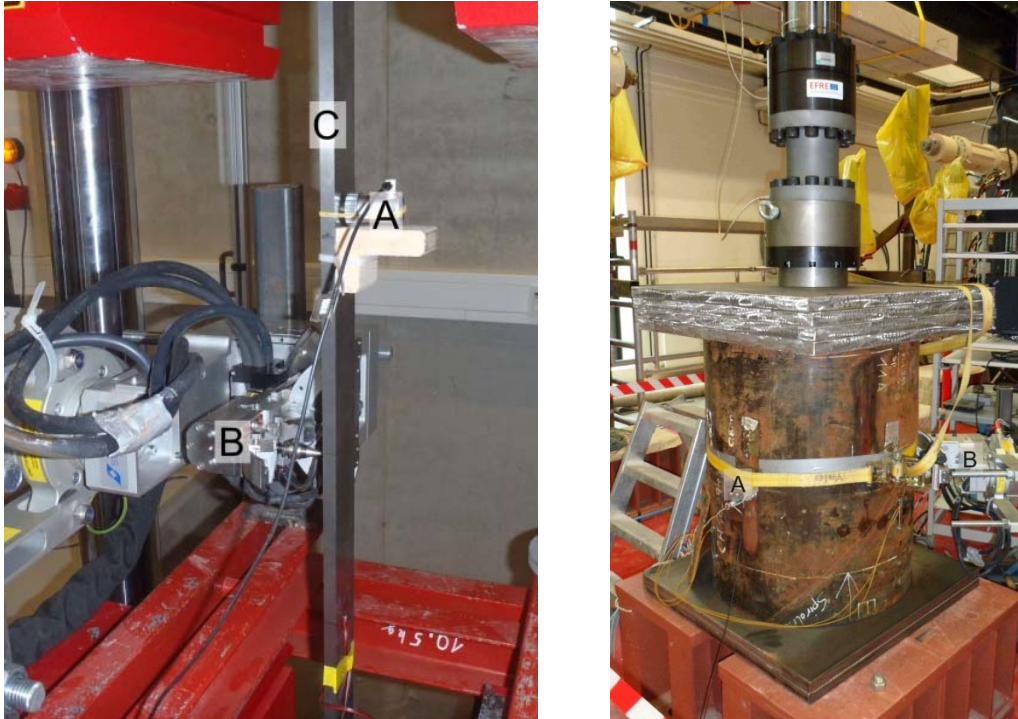


Bild 2. Labormessungen an Flachzugprobe (links) und an Rohrabschnitt mittels Ultraschall und röntgenographisch
 A: Ultraschallprüfkopf, B: Röntgendiffraktometer, C: Flachzugprobe

Im rechten Teilbild ist eine ähnliche Anordnung eines Bauteilversuchs mit einem Rohrabschnitt einer Gashochdruckleitung (vgl. Abschnitt 3) dargestellt, bei dem in Druckversuchen Messungen mittels Dehnungsmessstreifen, Röntgendiffraktometer und Ultraschall durchgeführt wurden.

Die für zwei typische Rohrwerkstoffe (S355 und L485) aufgenommenen akustoelastischen Koeffizienten stellt Bild 3 als Abhängigkeit der relativen Transversalwellengeschwindigkeitsänderung als Funktion der Dehnung dar. Bemerkenswert ist hierbei, dass keine Unterschiede zwischen dem höherfesten, thermomechanisch gewalzten L485 und dem konventionellen Baustahl S355 auftraten.

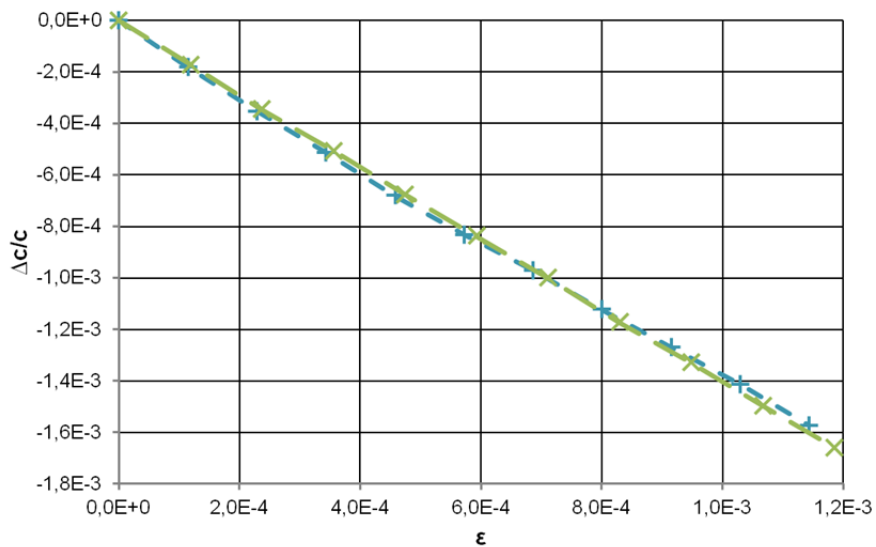


Bild 3. Schallgeschwindigkeitsänderung - Dehnung + S355 x L485

Neben den akusto-elastischen Materialkonstanten sind ferner die Einflüsse der Störgrößen Geometrie, Oberflächenzustand und Temperatur zu bestimmen. Die gekrümmte Ankoppelfläche bei Rohren bewirkt beispielsweise Ankopplungsprobleme, die sich in einer erhöhten Streuung der Messwerte niederschlagen. Bild 4 zeigt dies an Hand der Standardabweichung der Transversalwellengeschwindigkeit bei Wiederholungsmessungen mit 20 Einzelmessungen an Rohren unterschiedlicher Durchmesser. Kleinere Durchmesser verursachen Schwankungen, denen durch eine erhöhte Zahl von Messungen entgegengewirkt werden kann. Bei größeren Rohrdurchmessern nähern sich die Werte denen des ebenen Zustands.

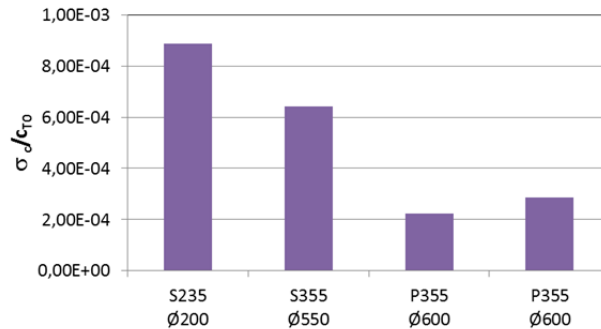


Bild 4. normierte Standardabweichung der Transversalwellengeschwindigkeit für unterschiedliche Rohrdurchmesser

Die in Bild 2 dargestellten simultanen Versuche zur Spannungsmessung im Labor gestatten auch den Vergleich der mittels Ultraschall bzw. Röntgenstrahlung ermittelten Spannungen. Am Beispiel einer spannungsarmgeglühten Flachprobe zeigt das Bild 5 eine Gegenüberstellung der Nennspannungen in axialer Richtung der Flachprobe mit der jeweils röntgenographisch ermittelten Axialspannung.

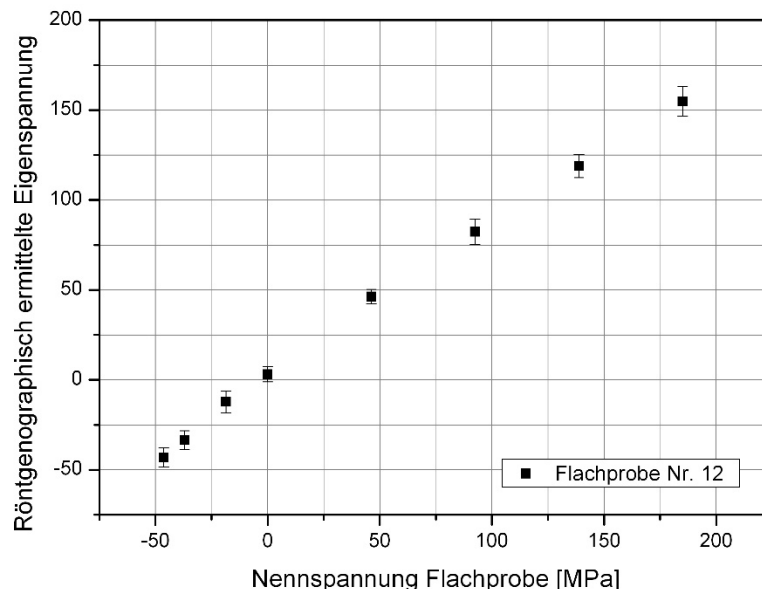


Bild 5. Gegenüberstellung zwischen röntgenographisch ermittelten Axialspannungen und den jeweiligen Nennspannungen einer axial beanspruchten Flachprobe

Bild 6 zeigt die mit den unterschiedlichen zerstörungsfreien Messverfahren ermittelten Spannungen in axialer Richtung einer Flachprobe. Die Abweichungen müssen vor dem Hintergrund der Schwankungen der für die Auswertung bedeutsamen

Materialparameter des jeweiligen Messverfahrens bewertet werden. Insgesamt betrachtet ist die Übereinstimmung sehr gut.

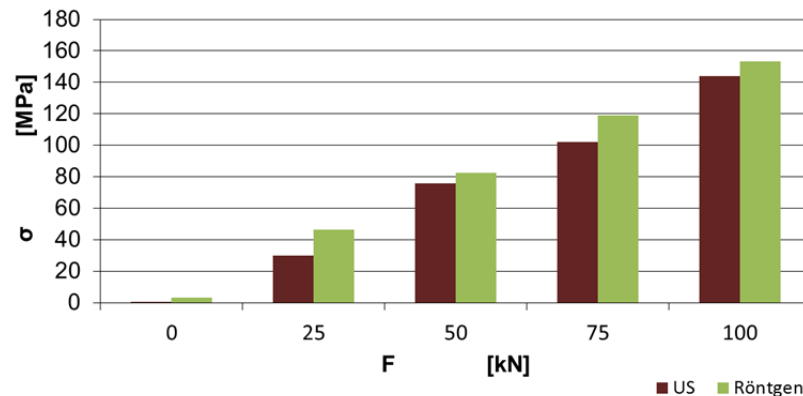


Bild 6. Gegenüberstellung der mit Ultraschall sowie röntgenographischer Spannungsanalyse ermittelten Axialspannungen während des Zugversuchs

3. Baustellenmessungen

Die derzeit praktikabelste Messmethode zur Erfassung des Spannungszustandes an Gashochdruckleitungen ist die Spannungsmessung mit Dehnungsmessstreifen (DMS). Die Vorteile sind die einfache Applikation der DMS unter Baustellenbedingungen und die Ermittlung zuverlässiger Messwerte. Durch Nutzung der Vollbrückenschaltung können u. a. Temperaturänderungen kompensiert werden, wodurch das Messverfahren an Zuverlässigkeit gewinnt. Der wesentliche Nachteil des Messverfahrens ist der Bezug der Messwerte auf eine Nullmessung, welche den spannungsfreien Zustand der Gashochdruckleitungen kennzeichnet. Bei bereits verlegten und in Betrieb befindlichen Gashochdruckleitungen kann dieser Referenzzustand nicht ohne größeren Aufwand hergestellt und erfasst werden.

Im Rahmen dieses Projektes war im Bauablauf die Trennung der untersuchten Gashochdruckleitung vorgesehen, womit die Spannungszustände vor und nach dem Trennen der Gashochdruckleitung gemessen und gegenübergestellt werden konnten. Die Erfassung und Auswertung der Dehnungs- bzw. Spannungsunterschiede aus der DMS-Messung dienten als Orientierungs- und Kontrollgrößen für die röntgenographische Spannungsanalyse sowie die Ultraschallmessung, welche Spannungswerte auch ohne Kenntnis des Referenzzustandes ermitteln.

Im Folgenden werden am Beispiel einer Baustellenmessung typische Bedingungen und Vorgehensweisen der Spannungsmessung mit Ultraschall bzw. röntgenographisch vorgestellt.

Voraussetzung sowohl für röntgenographische und Ultraschallspannungsmessung sowie für die Anwendung von Dehnungsmessstreifen ist eine zweckentsprechende Vorbereitung der Messstellen. Da erdverlegte Rohre mit wirksamen Korrosionsschutzbeschichtungen versehen werden, müssen Maßnahmen zu ihrer Entfernung und der Präparation der metallischen Oberfläche vorgesehen werden. Der relativ kleine zu präparierende Bereich für die röntgenographische Spannungsmessung in der Größenordnung von einigen Millimetern erfordert eine hohe Oberflächenqualität, die unter Baustellenbedingungen nur durch das mobile elektrolytische Polieren / Ätzen erreicht werden kann. Das Bild 7 zeigt eine derartige Vorbereitung eines Messpunktes für die röntgenographische Spannungsermittlung. Die Tiefe des Abtrages richtet sich nach der

Oberflächenvorbehandlung. Werden beispielsweise zusätzliche Eigenspannungen durch mechanisches Schleifen eingetragen, beträgt die Tiefe $150\ \mu\text{m} - 200\ \mu\text{m}$. Dieses Vorgehen wurde anhand von spannungsarmgeglühten und nachfolgend geschliffenen Flachproben verifiziert.



Bild 7. Vorbereitung der Messstelle durch elektrolytisches Ätzen

Die Anforderungen für die Ankopplung der Ultraschallprüfköpfe und die Applikation von Dehnungsmessstreifen sind analog durch ein Beschleifen der Rohroberfläche realisierbar. Für die Nutzung von Senkrechprüfköpfen ist hierbei wie auch für Dehnungsmessstreifen ein Bereich von einigen zehn Millimetern Durchmesser vorzubereiten. Für Durchschallungsanordnungen mit Rayleighwellen oder Longitudinalwellen sind entsprechend der Messstrecke zwischen Send- und Empfangsprüfkopf größere Bereiche bis zu einigen hundert Millimetern zu präparieren. Das Bild 8 verdeutlicht die Bedingungen für die Ultraschallmessung.

Als zu beachtende Störgröße tritt auch die Temperatur des Objektes in Erscheinung. Durch Sonneneinstrahlung können erhebliche örtliche Temperaturunterschiede von einigen zehn K hervorgerufen werden, die ohne Gegenmaßnahmen bzw. Korrektur eine erhebliche Fehlerquelle darstellen würden. Das linke Teilbild zeigt dem entsprechend die Verhinderung einer starken Erwärmung durch Abschattung des Messbereiches. Die Messung der Temperatur an den Messstellen gestattet die Korrektur der verbliebenen Temperatureffekte mittels der im Labor ermittelten Korrekturwerte. Der mit der Sonneneinstrahlung verbundene starke Lichteinfall verursacht zusätzlich auch Ableseprobleme der Displays der Messgeräte.

Unter den vorherrschenden Baustellenbedingungen sind teilweise auch Zwangspositionen der Messung an unterschiedlichen Messpositionen des Rohres nicht zu vermeiden (Bild 8 rechts). Den hierdurch bedingten Schwankungen der Messwerte kann durch reproduzierbare Positionierung des Prüfkopfs und eine ausreichend hohe Zahl von Einzelmessungen begegnet werden.



Bild 8. Ultraschallmessungen an einer Gashochdruckleitung

Für die röntgenographische Ermittlung des Spannungszustandes in den Hochdruckrohren wurde das Röntgendiffraktometer Xstress 3000 G2 der Firma Stresstech verwendet. Zur stabilen Positionierung des Röntgendiffraktometers an unterschiedlichen Messstellen entlang des Rohrumfanges war die Fertigung einer entsprechenden Vorrichtung notwendig, Bild 9. Die Konstruktion der Vorrichtung erlaubt die Untersuchung beliebiger Rohrdurchmesser, das manuelle Anfahren beliebiger Messpunkte entlang des Rohrumfanges sowie eine präzise Ausrichtung des Messkopfes des Röntgendiffraktometers in radialer Richtung des Gashochdruckrohres. Damit ist eine Bestimmung der oberflächennahen Tangential- und Axialspannungen möglich.



Bild 9. Vorrichtung zur genauen Positionierung des Röntgendiffraktometers

Danksagung

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie sowie der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e. V. für die Förderung des ZIM-Projektes „Messung von Spannungen an in Betrieb befindlichen Hochdruckleitungen“.

Referenzen

- [1] Verordnung über Gashochdruckleitungen (GasHLVO), Ausgabe 01/1997
- [2] DIN EN 1594: 2009-06 Gasversorgungssysteme - Rohrleitungen für einen maximal zulässigen Betriebsdruck über 16 bar - Funktionale Anforderungen
- [3] DVGW-Arbeitsblatt G 463: „Gasleitungen aus Stahlrohren für mehr als 16 bar Betriebsdruck, Errichtung“, Ausgabe 12/2001
- [4] V. Hauk: Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods; Elsevier Science B. V. Amsterdam (1997) 522-563
- [5] P. J. Withers; H.K.D.H. Bhadeshia: Residual stress. Part 1 – Measurement techniques Materials Science and Technology, Volume 17, Number 4, April 2001, pp. 355-365
- [6] H.-D. Tietz: Grundlagen der Eigenspannungen. Dt. Verlag für Gurstoffindustrie. 1983 ISBN 978-3-211-95814-8
- [7] H.U. Baron, H. Behnken, B. Eigenmann, J. Gibmeier, Th. Hirsch, W. Pfeiffer, B. Scholtes: Röntgenographische Ermittlung von Spannungen - Ermittlung und Bewertung homogener Spannungszustände in kristallinen, makroskopisch isotropen Werkstoffen. Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e.V., Arbeitsblatt 1 (2001)
- [8] J. Pohl; J. Hildebrand; A. Diemar; A. Großmann: Spannungsmessung an druckbeanspruchten Stahlrohren mittels Ultraschall- und röntgenographischen Verfahren. DACH-Jahrestagung 2012 ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, Graz 17.-19.09.2012, DGZfP-Berichtsband BB 136-CD, P8, ISBN 978-3-940283-44-3