

# Spannungsmessung an druckbeanspruchten Stahlrohren mittels Ultraschall- und röntgenographischen Verfahren

Jürgen POHL<sup>\*</sup>, Jörg HILDEBRAND<sup>\*\*</sup>, Andreas DIEMAR<sup>\*\*</sup>, Albert GROßMANN<sup>\*\*\*</sup>

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

<sup>\*\*</sup> Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Marienstraße 7A,  
99421 Weimar, joerg.hildebrand@uni-weimar.de

<sup>\*\*\*</sup> Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH, Leibnizstraße 25, 04105 Leipzig  
Albert.Grossmann@veenkermbh.de

**Kurzfassung.** Die Bewertung von erdverlegten Gashochdruckleitungen erfolgt auf Grundlage des Beanspruchungszustandes. Neben den zu erwartenden Beanspruchungen als Bemessungslasten können Zusatzlasten auftreten, die zu unerwünschten Betriebszuständen führen können. Die Ermittlung des tatsächlich vorhandenen Beanspruchungszustandes mittels röntgenographischer Spannungsmessung und Ultraschallmessmethoden gestattet eine effektive Verbesserung der Bewertung der Integrität der Rohrleitungen.

Vorgestellt hierzu werden das röntgenographische Messverfahren und Varianten der Erfassung von Spannungszuständen mit Ultraschall.

## Einführung

Die Bewertung von sicherheitstechnisch relevanten Objekten wie erdverlegten Gashochdruckleitungen erfolgt auf Grundlage des Beanspruchungszustandes. Da in der Bemessungsphase von Gashochdruckleitungen nur die zu erwartenden Beanspruchungen berücksichtigt sind, ist die Kenntnis des tatsächlich vorhandenen Beanspruchungszustandes für eine umfassende Bewertung sehr wichtig. Die Bemessungslasten können durch Zusatzlasten des Systems verändert werden und in einen Beanspruchungszustand außerhalb des bestimmungsgemäßen Betriebszustandes resultieren. Dabei ist zu differenzieren nach Einflüssen, die vorhersehbar und gut bekannt oder einfach messbar sind und jenen, die sich ohne umfangreiche Messung der Bewertung entziehen.

Aus diesen Gründen ist es wünschenswert, reale Beanspruchungszustände im Objekt erfassen zu können. Dadurch wird eine effektive Verbesserung der Bewertung der Integrität der Rohrleitungen bewirkt.

Zur Messung unbekannter Spannungszustände bieten die bekannten röntgenographischen Methoden und Ultraschallmessmethoden Potenzial, dies zerstörungsfrei zu realisieren.

Der Beitrag stellt einen Messablauf des röntgenographischen Verfahrens mit minimaler Anzahl von Messpunkten zur Erfassung der oberflächennahen Spannungen vor, der den Spannungszustand im Rohr für eine Verbesserung der Beanspruchungsbewertung ermittelt. Betrachtet werden weiterhin für diese Zielsetzung Varianten der Erfassung von

Spannungszuständen mit Ultraschall in ihrer prüfpraktischen Umsetzung und den wirkenden Störparametern.

## 1. Bewertung von erdverlegten Hochdruckleitungen

Innerhalb der Nutzungszeit eines Gastransportnetzes sind die Wartung und Instandhaltung die größten Kostenfaktoren für den Betrieb. Die wirtschaftliche und sichere Nutzung des Gastransportnetzes kann im Wesentlichen nur durch eine effiziente Instandsetzungsstrategie gewährleistet werden. Die Instandsetzungsstrategie wird von den Unternehmen eigenverantwortlich festgelegt und soll zum einen die Sicherheit der Gastransportleitungen sowie der Umgebung gewährleisten und zum anderen wirtschaftlich umgesetzt werden. Sicherheit und Wirtschaftlichkeit müssen dabei gleichermaßen bedient werden, ohne dass das eine das andere wesentlich negativ beeinflusst.



Bild 1: Gashochdruckleitungen

Die Bemessung von Gashochdruckleitungen erfolgt nach deterministischen Verfahren mit Sicherheitszahlen, die entsprechend dem Gesetzgeber durch die Normen und Normungsausschüsse vorgegeben werden [1 -3]. Für Gashochdruckleitungen bewegen sich diese Sicherheitszahlen für den Neubau im Bereich zwischen 1,5 und 1,6. Die Einhaltung dieser Sicherheitszahlen bei Auslegung der Gashochdruckleitungen ist verbindlich.

Unterliegen Gashochdruckleitungen Veränderungen, wie z.B. durch Korrosionen (siehe Bild 2), so befinden diese sich nicht mehr in ihrem ursprünglichen Bemessungszustand und es ist ersichtlich, dass die vorgegebenen Sicherheiten nicht mehr eingehalten werden. Es muss somit eine Bewertung der Tragfähigkeit erfolgen, welche alle bekannten Last- und Widerstandsgrößen berücksichtigt. Numerische Berechnungsverfahren ermöglichen heutzutage eine sehr präzise Ermittlung der Tragfähigkeit, benötigen jedoch auch sehr genaue Angaben zu den Berechnungsgrößen.

Demnach hängt die Qualität der Bewertung zur Tragfähigkeit von der Qualität der Eingangswerte ab, da alle Imponderabilien und Schwankungen der Eingangswerte auch in der Bewertung durch Sicherheiten im Ergebnis abgedeckt werden müssen.

Während die Widerstandsgrößen, Korrosionsgeometrie und die Hauptlast aus Innendruck für Gashochdruckleitungen sehr gut bekannt sind, müssen Zusatzlasten, z. B. aus Verlegespannungen oder Spannungen aus dem Schweißprozess zumeist abgeschätzt oder mittels zerstörender Prüfmethoden ermittelt werden.

Können jedoch diese Spannungen aus den Zusatzlasten messtechnisch genauer erfasst werden, so können auch die Eingangswerte genauer angegeben und ein exakteres Ergebnis berechnet werden. Das Bewertungsmodell wird also hinsichtlich der Genauigkeit der Eingangswerte differenziert, was bedeutet, dass die Sicherheiten in der Bewertung angepasst werden müssen.



Bild 2: Korrosionsstelle (links) und numerische Berechnung der Spannungssituation (rechts)

## 2. Röntgenographische Spannungsmessung

Zur zuverlässigen röntgenografischen Analyse des Spannungszustandes ist es unumgänglich, den Werkstoff zu charakterisieren. Die zur Anwendung des  $\sin^2\psi$ -Verfahrens als Standardverfahren der röntgenographischen Spannungsanalyse benötigten röntgenographischen Elastizitätskonstanten, der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl, werden unter Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur sowie der chemischen Zusammensetzung nach Collin [4] bestimmt.

Für den zunächst anhand von gefrästen Flachproben untersuchten Baustahl S355J2+N (WS-Nr. 1.0570) mit einer über Glimmentladungsspektroskopie (GD-OES) bestimmten chemischen Zusammensetzung zeigt Bild 3 beispielhaft die temperaturabhängigen Verläufe von Elastizitätsmodul und Querdehnzahl.

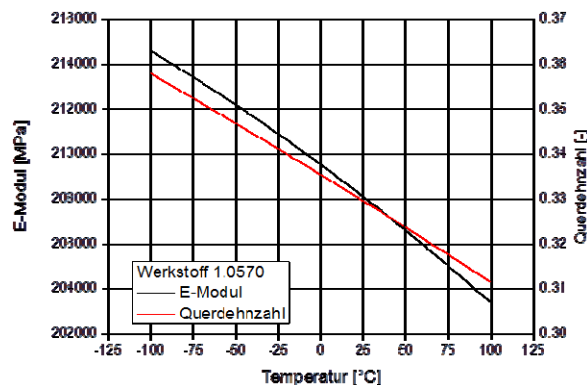


Bild 3: Temperaturabhängige Verläufe von Querdehnzahl und Elastizitätsmodul

Für den jeweiligen Stahl der zu untersuchenden Hochdruckleitung können somit anhand einer Analyse mittels mobiler Funkenemissionsspektroskopie (F-OES) die Ausgangswerkstoffkennwerte der röntgenographischen Spannungsanalyse unter Berücksichtigung der Temperaturverteilung des Messobjekts bestimmt werden.

Zur Ermittlung des Spannungszustandes in den Proben wird das Röntgendiffraktometer Xstress 3000 G2 der Firma Stresstech verwendet. Zur Linienlagenbestimmung der gemessenen Interferenzlinienprofile und Berücksichtigung von Werkstofftexturen wurde die vorhandene Messsoftware um eine Auswertungssoftware basierend auf der Skriptsprache R [6] erweitert, Bild 4. Dabei werden die Spannungen unter Berücksichtigung nichtlinearer Anpassungsalgorithmen nach Gauss, Cauchy, Lorentz, Voigt und Pearson VII für die gemessenen Interferenzen ausgewertet und stehen zur Gegenüberstellung zur Verfügung.

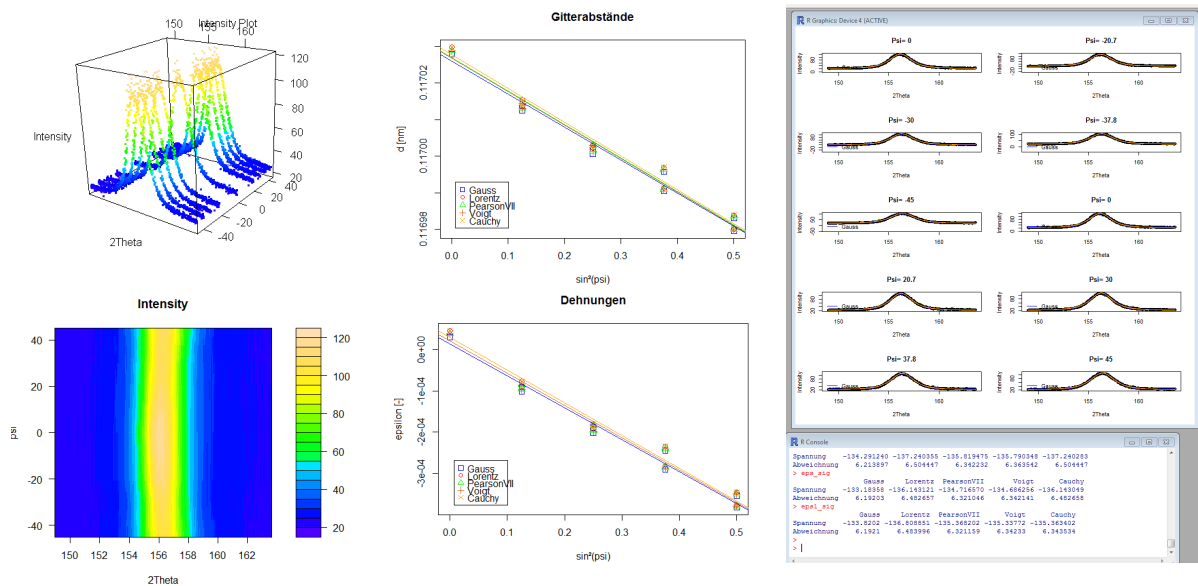


Bild 4: Auswertungssoftware zur röntgenografischen Spannungsermittlung  
Ermittlung der Intensitätskurve, Ermittlung der Spannung mit vier unterschiedlichen Verfahren

Durch ihre skriptbasierte Architektur gestattet diese Software eine schnelle Auswertung von röntgenografischen Messungen auf der Baustelle. Ihr modularer Aufbau ermöglicht darüber hinaus eine hohe Flexibilität in Bezug auf Anpassungen.

Alle bisher röntgenografischen untersuchten Flachproben wiesen unterschiedlich stark ausgeprägte Eigenspannungszustände aus dem jeweiligen Herstellungsprozess auf. Beispielhaft zeigen die Bilder 5 und 6 Flächenplots der Eigenspannungen in Längs- und Querrichtung einer Flachprobe S355.

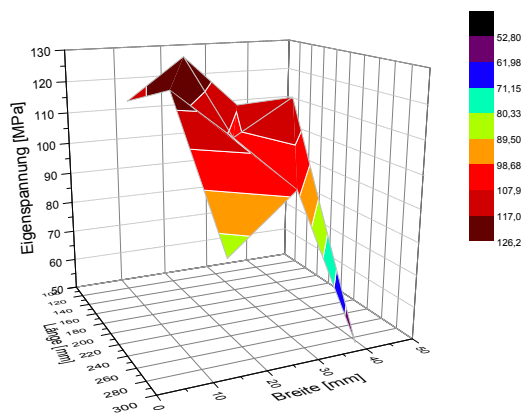


Bild 5: Längseigenspannungen

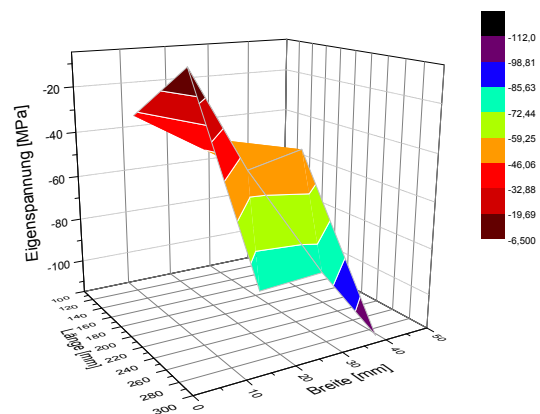


Bild 6: Quereigenspannungen

Zur Vorbereitung der röntgenografischen Untersuchungen an den Hochdruckleitungen erfolgte eine Adaption des Röntgendiffraktometers an eine Zug-Druck-Prüfmaschine, Bild 7. In Vorversuchen wurden Flachproben des Werkstoffs S355 zunächst die Eigenspannungen im unbelasteten Zustand bestimmt, anschließend in definierten Stufen Lastspannungen aufgebracht und ermittelt.



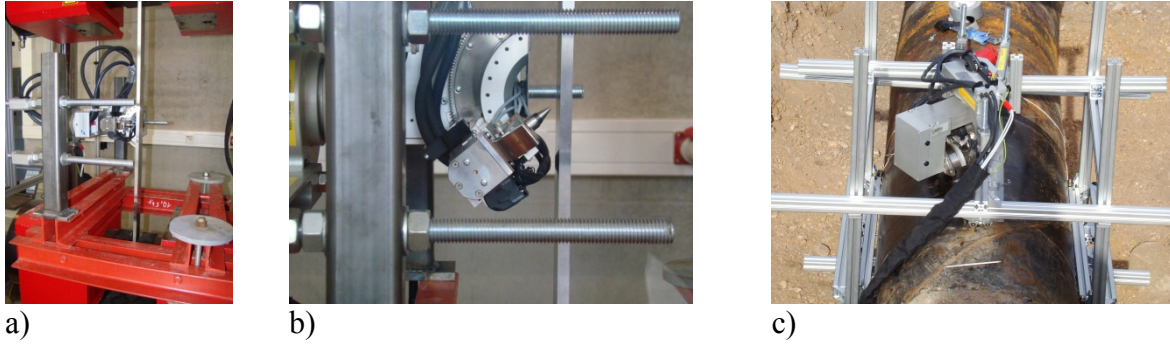


Bild 7: Spannungsmessungen an zugbelasteten Flachproben (a,b) und an einem Rohr (c)

Die analytische Betrachtung der Spannungszustände in den jeweiligen Hochdruckrohren erfolgt basierend auf der Finiten Elemente Methode mit dem Programm ABAQUS [7] unter Nutzung von Shell- bzw. Solid-Elementen. Zur Berücksichtigung unterschiedlicher möglicher Geometrien wurden diese entsprechend parametrisiert. Die Ermittlung des Eigenspannungszustandes in Längs- und Querrichtung des Hochdruckrohres erfolgt ausgehend von den Messergebnissen unter Verwendung von der FE-Methode.

Dabei wird basierend auf den röntgenografische Messungen des Spannungszustandes eine Anfangsbedingung definiert und innerhalb einer Iteration des statischen Gleichgewichtes der Eigenspannungszustand im Hochdruckrohr ermittelt.

### 3. Spannungsmessung mittels Ultraschall

Die Laufzeit von Ultraschallwellen kann zur Messung mechanischer Spannungen genutzt werden. Der sogenannte akusto-elastische Effekt beschreibt den Einfluss von Dehnungs- bzw. Spannungszuständen auf die Schallgeschwindigkeiten unterschiedlicher Wellenarten, d. h. Spannungen bewirken kleine Geschwindigkeits- und damit Laufzeitänderungen von Ultraschallwellen. Die Effekte sind abhängig von Wellenart, Richtung der Spannung, Ausbreitungsrichtung der Welle und Schwingungsrichtung der Welle [8, 9].

Für den im Bild 8 dargestellten Fall der Spannungseinwirkung wird die Geschwindigkeit einer Longitudinalwelle  $c_{ii}$  (erster Index: Ausbreitungsrichtung, zweiter Index: Schwingungsrichtung) bezüglich der Schallgeschwindigkeit im Ausgangszustand  $c_l$  durch

$$\rho c_{ii}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)(\varepsilon_i + \varepsilon_j + \varepsilon_k) + (4m + 4\lambda + 10\mu)\varepsilon_i \quad (1)$$

in Abhängigkeit von den Dehnungen  $\varepsilon$  ausgedrückt [8], wobei  $\lambda$ ,  $\mu$  die Lamésche Module,  $\rho$  die Dichte und  $l$  und  $m$  elastische Konstanten dritter Ordnung darstellen. Für eine Longitudinalwelle in Spannungsrichtung wird dies zu

$$\rho c_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + (4m + 4\lambda + 10\mu)\varepsilon_1 \quad (2)$$

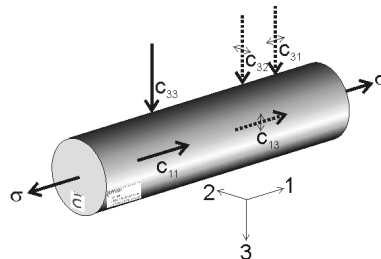


Bild 8: richtungsabhängige Größen der Ultraschallspannungsmessung

Im elastischen Bereich kann der Bezug zu den Spannungen durch

$$\frac{c_{ii}-c_l}{c_l} = \frac{A}{C} \sigma_i + \frac{B}{C} (\sigma_j + \sigma_k) \quad (3)$$

ausgedrückt werden [10], wobei  $A$ ,  $B$ ,  $C$  und  $D$  Linearkombinationen der elastischen Konstanten zweiter und dritter Ordnung sind.

Den direkten Bezug zur messtechnischen Erfassung als die auf Dehnung oder Spannung bezogenen jeweiligen Schallgeschwindigkeitsänderungen liefern die akusto-elastischen Koeffizienten AEK:

$$AEK_{\varepsilon_{11}} = \frac{\Delta c_{11}}{c_l} / \varepsilon_1 \quad \text{bzw.} \quad AEK_{\sigma_{11}} = \frac{\Delta c_{11}}{c_l} / \sigma_1 \quad (4)$$

Derzeitiger Stand der Technik auf dem Gebiet der Ultraschallspannungsmessung ist die Nutzung für definierte Produkte, wie z. B. die Messung von Spannungen in Schrauben, Schweißnähten von Stahlbauteilen, Rädern von Schienenfahrzeugen und Walzen [8, 10 - 15].

Für die Objektgeometrie Rohr können unterschiedliche Wellenarten und Prüftechniken eingesetzt werden. Prinzipiell unterschiedlich sind die Prüfkopfarrangements, die Prüftechnik (Sende-Empfang oder Impuls-Echo), die erfassten Objektbereiche und die Auswertemodalitäten bei den im Bild 9 dargestellten Prüftechniken.

Wie Bild 9 schematisch zeigt, können Longitudinal- und Transversalwellen, die mittels herkömmlicher piezoelektrischer Wandler erzeugt werden, in Dickenrichtung des Objektes eingeschallt werden. Hierbei werden Senkrechtprüfköpfe in der Impuls-Echo-Technik eingesetzt, wobei Transversalwellen in zwei senkrecht zueinander stehenden Schwingungsrichtungen angewendet werden. Diese Technik hat den Vorteil, an einem Messpunkt zu messen und Spannungen in Rohrlängs- und Umfangsrichtung zu separieren. Durch die begrenzten Schallwege in Dickenrichtung ergeben sich allerdings Anwendungsgrenzen.

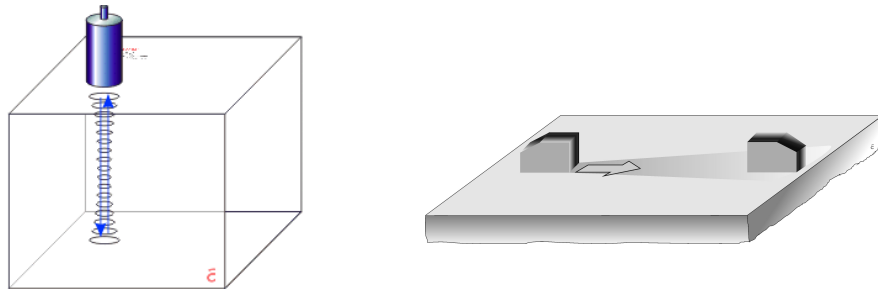


Bild 9: Prüftechnik mit Longitudinal- und Transversalwellen und Durchschallungsanordnung

Weiterhin sind Oberflächenwellen oder Longitudinalwellen im Oberflächenbereich in Durchschallungsanordnungen einsetzbar. Hier wird entlang einer Messspur gemessen, wobei sich aus der Entfernung zwischen Sender und Empfänger die notwendige Laufzeitaufösung des Systems ergibt. Die hier optimale Entfernung ergibt sich prüftechnikspezifisch aus Einflüssen des Prüfsystems sowie des Prüfobjekts hinsichtlich Werkstoff-, Oberflächen und Geometrieinflüssen.

Bild 10 zeigt beispielhaft den akustoelastischen Effekt für die Longitudinal und Transversalwellen für einen Rohrwerkstoff.

Die Auswertebeziehung zwischen den Spannungen und der Schallgeschwindigkeit beinhaltet, dass diese Änderungen gerätetechnisch mit hoher Genauigkeit zu bestimmen sind und die Schallgeschwindigkeit (bzw. deren Messung) von Störgrößen beeinflusst wird.

Neben der Temperatur sind wesentliche Einflussfaktoren für die praktische Laufzeitmessung zur Bestimmung von Spannungen die Objektgeometrie, der Oberflächenzustand, der die Ankopplung beeinflusst, und der Gefügestand, insbesondere Texturen. Weiterhin ist die Kenntnis der Schallgeschwindigkeiten der spannungsfreien Bauteile notwendig.

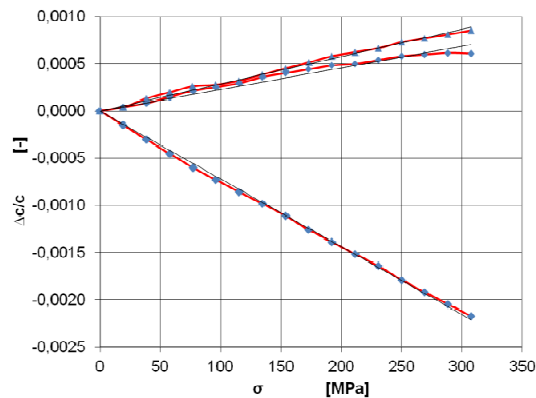


Bild 10: Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Spannung für Transversalwellen (♦) unterschiedlicher Polarisierung und Longitudinalwellen (▲) für einen Baustahl S355J2+N (Rohrwerkstoff)

Da Rohrobjekte aus gewalzten Stahlblechen hergestellt werden, sind Gefügeeinflüsse auf die Spannungsermittlung zu betrachten. Gewalzte Objekte zeichnen sich durch deutliche Unterschiede der Gefügestände zwischen Walzrichtung und Querrichtung aus, die sich in Schallgeschwindigkeitsunterschieden äußern. Bild 11 verdeutlicht diese Effekte anhand der richtungsabhängigen Laufzeitwerte von Longitudinal- und Transversalwellen für einen spannungsarmgeglühten Probenzustand.

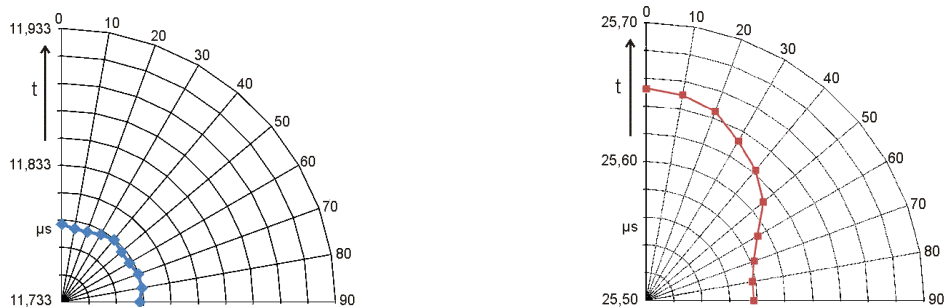


Bild 11: Richtungsabhängigkeit der Laufzeiten von Longitudinalwellen (♦) und Transversalwellen (■)

Im Fall ausgeprägter Texturen kommt es zur akustischen Doppelbrechung von Transversalwellen [16, 17], die in definierten Ausbreitungsrichtungen durch Interferenz der in unterschiedlichen Richtungen polarisierten Wellen zu dem in Bild 12 dargestellten dafür typischen Signalbild führen.

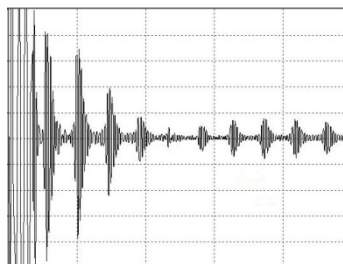


Bild 12: A-Bild im Fall der Doppelbrechung von Transversalwellen

## Danksagung

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die Förderung des Projektes.

## 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] W. C. Leslie: The physical Metallurgy of steels. McGraw-Hill: New York, 1981. - ISBN 0070377804
- [5] DIN 1632. Kaltgewalztes Band und Blech - Technische Lieferbedingungen - Allgemeine Baustähle, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2009.
- [6] R DEVELOPMENT CORE TEAM, R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2010.
- [7] ABAQUS Analysis User's Manual. Version 6.11. Dassault Systèmes: Providence, RI, USA, 2011.
- [8] E. Schneider: Ultrasonic Techniques; in V. Hauk: Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods; Elsevier Science B. V. Amsterdam (1997) 522-563
- [9] D.S. Hughes, J.L. Kelly, Second Order Elastic Deformation of Solids, Physical Review, 92 (1953) 5, 1145-1149
- [10] E. Schneider, R. Herzer, D. Bruche Automatisierte Bestimmung oberflächennaher Spannungszustände in Walzen mittels Ultraschallverfahren, DGZfP Berlin, Berichtsband 18 (1989) 419-426
- [11] T. Lüthi Beitrag zur Ermittlung von Eigenspannungen mit Ultraschall Anwendung auf Schweißnahte, Dissertation (1990) Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
- [12] E. Schneider; H.-R. Herzer; K. Braunbach Ultraschall-System zur on-line Bestimmung der Schraubenvorspannkraft und zur Schraubersteuerung. DGZfP, Berlin: DGZfP-Jahrestagung 2.-4. Mai 2005; (DGZfP-Berichtsbände 94-CD)
- [13] J. Szelazek Monitoring of Thermal Stresses in Continuously Welded Rails with Ultrasonic Technique, ECNDT '98, Copenhagen 26-29 May 1998, Vol. 3
- [14] D. E. Bray Current directions of Ultrasonic Stress Measurement Techniques. 15th World Conference on Non-Destructive Testing, 15-21 October 2000 Rome
- [15] Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, O. Gushcha, V. Smilenko V. Brodovoy Ultrasonic Technique and Device for Residual Stress Measurement. X International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics. Costa Mesa, California USA, June 7-10, 2004.
- [16] D.R. Allen, C.M. Sayers The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique. Ultrasonics 22, (1984) 179-188
- [17] E. Schneider Ultrasonic birefringence effect - its application for materials characterizations. Optics and Lasers in Engineering 22 (1995), S.305-323