

# Neue Ansätze in der quantitativen Korrosionsdetektion unter gezielter Ausnutzung des dispersiven Verhaltens geführter Ultraschallwellenmoden

Patrick JÄCKEL\*, Frank NIESE\*

\* Fraunhofer-Institut für Zerörungsfreie Prüfverfahren IZFP  
(Patrick.Jaeckel@izfp.fraunhofer.de, Frank.Niese@izfp.fraunhofer.de)

**Kurzfassung.** Rohrleitungen in chemischen und petrochemischen Anlagen sind an diversen Stellen durch Träger, Manschetten und Rohrbrücken gehalten und abgestützt. Eine Ansammlung von Feuchtigkeit und korrosionsfördernder Substanzen an diesen Auflagestellen führt häufig zu Korrosionserscheinungen direkt an der Rohrwand. Da es sich meist um für Sichtprüfungen ungeeignete und häufig auch für weitere Untersuchungsmethoden unzugängliche Positionen handelt, ist das Erkennen des Korrosionsbefalls schwierig. Auch Versorgungsleitungen für Gas und Wasser sowie tragende Konstruktionen wie Stützen und Pfosten (z.B. Verkehrszeichen und Überdachungen) sind bei mangelnder oder fehlerhafter Isolierung der Korrosion frei ausgesetzt. Hierbei kann ebenfalls die Zugänglichkeit durch Erdverfüllungen, Mauerdurchbrüche usw. stark eingeschränkt sein. Die Überwachung des Korrosionsbefalls ist aus Gründen der allgemeinen Sicherheit, der Betriebssicherheit sowie aus Umweltschutzgründen eine Notwendigkeit und meist vom Gesetzgeber vorgeschrieben. Der gezielte Einsatz von dispersiven Ultraschallwellenmoden bietet die Möglichkeit, korrosionsbedingte Wanddickenreduktionen im Schallweg via einer Ultraschall-Transmissionsmessung zu detektieren. Der Messeffekt beruht darauf, dass sich sowohl die Phasen- als auch die Gruppengeschwindigkeit des dispersiven Ultraschallwellenmodes mit der Wanddicke ändert. Über die Auswertung der Phasenlage und/ oder Laufzeit sind deshalb Informationen zur Wanddickenreduktion im Schallweg zugänglich. Insbesondere kann dieser neuartige Ansatz zur Detektion von flach einlaufenden Wanddickenänderungen, die keine messbaren Reflexionssignale hervorbringen, genutzt werden. Der Beitrag stellt die Prüfmethode vor und zeigt ihr Potential anhand von Messergebnissen.

## 1. Einführung

Zur Beurteilung des Strukturzustandes ist die genaue Kenntnis der geometrischen Abmessungen der Schädigung erforderlich. Da es sich meist um für Sichtprüfungen ungeeignete und häufig auch für weitere Untersuchungsmethoden unzugängliche Schadenspositionen handelt, sind das Erkennen und das Treffen quantitativer Aussagen schwierig und meist nicht möglich. So ist die Zugänglichkeit bei Versorgungsleitungen für Gas und Wasser sowie bei tragenden Konstruktionen wie Stützen und Pfosten (z.B. bei Überdachungen) durch Erdverfüllungen, Mauerdurchbrüche und Ähnliches stark



eingeschränkt. Eine Lösung für dieses Problem ist hier die Fehlerprüfung durch spezielle langreichweitige Ultraschallverfahren mit geführten Wellenmoden. Die unzugänglichen Bereiche können damit über größere Distanzen untersucht und gegebenenfalls überwacht werden. Die quantitative Fehlerdetektion ist bis heute in der zerstörungsfreien Prüfung gerade im Bereich von dünnwandigen Strukturen eine große Herausforderung und noch nicht zufriedenstellend gelöst. Schwierig ist hierbei, dass Materialschädigungen wie beispielsweise Oberflächenkorrosion sehr komplexe Geometrien aufweisen können und häufig zu großflächigen, aber mitunter geringen Wanddickenänderungen führen. Gängige Ultraschall-Prüfverfahren werten meist nur die Amplitude des durch die Schädigungen hervorgerufenen Reflexionssignals oder die Amplitude des Transmissionssignals aus [5]. Bei geringen Schädigungen und damit geringen Wanddickenänderungen ist das problematisch, da diese Amplitudenänderung sehr gering und durch das geringe Signal-Rausch-Verhältnis nicht auswertbar ist. Der hier vorgestellte Ansatz ist von dieser Problematik nicht betroffen.

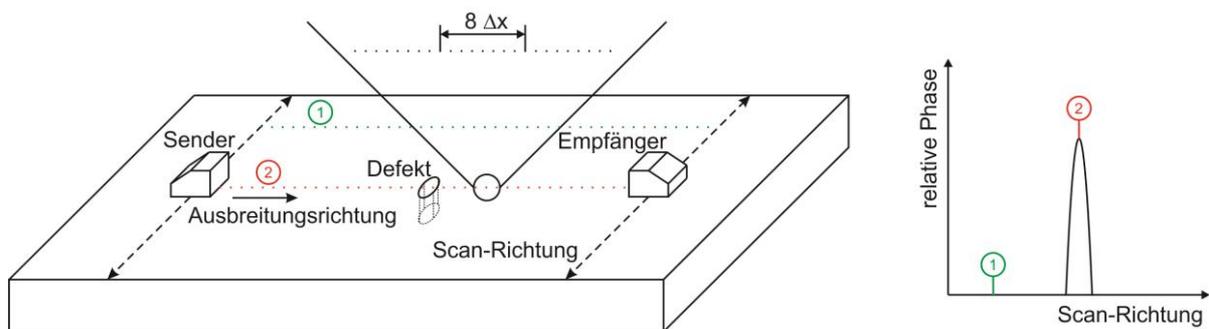
## 2. Theoretischer Hintergrund

### Phasenänderung des Ultraschallsignals

Das theoretische Modell beschreibt die Ausbreitung geführter Ultraschallwellen in plattenförmigen Geometrien mit variierender Dicke in Transmissionsanordnung. Der Ultraschalllaufweg  $L$  wird vorgegeben und ist durch die feste Position von Sender und Empfänger bestimmt. Wird nun diese Strecke diskretisiert und in  $n$  Teilstrecken  $\Delta x$  unterteilt, wobei an jedem einzelnen Punkt  $i$  des „virtuellen Gitters“ eine gesonderte dickenabhängige Phasengeschwindigkeit  $c_p^i(d_n)$  angenommen wird, so lässt sich die zu erwartende „Phasenänderung“  $\Phi_{\lambda,k}^y$  berechnen.

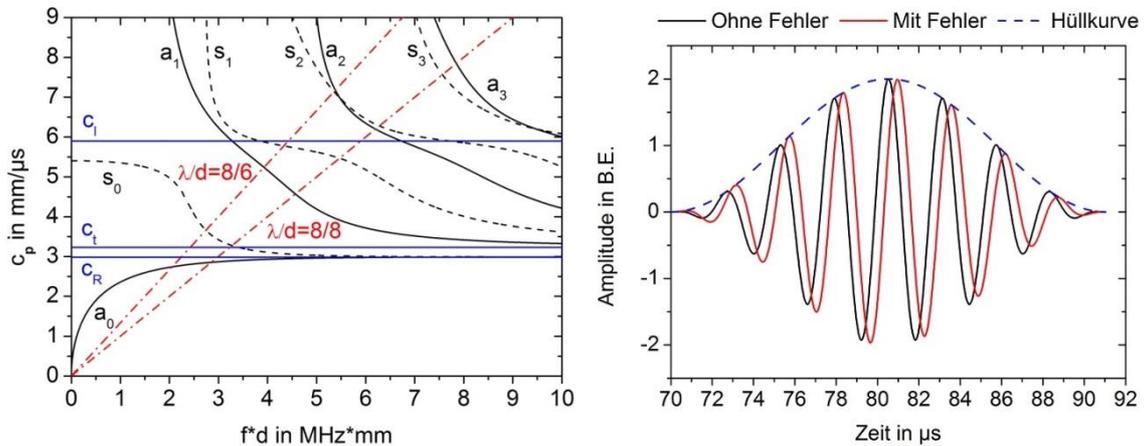
$$\Phi_{\lambda,k}^y = \underbrace{\Delta x_1 \cdot \frac{1}{c_p^1(d_1)}}_{t_p^1} + \underbrace{\Delta x_2 \cdot \frac{1}{c_p^2(d_2)}}_{t_p^2} + \dots + \underbrace{\Delta x_n \cdot \frac{1}{c_p^n(d_n)}}_{t_p^n}$$

Hierbei geben  $y$  die Prüfkopfposition (Scan-Position),  $\lambda$  die Spurwellenlänge,  $k$  den Mode und den Wellentyp an und  $t_p^i$  die Laufzeit über die Teilstrecke  $\Delta x_i$ . Befindet sich ein „Fehler“ im Laufweg, so lässt sich dieser ebenfalls als Wanddickenreduktion betrachten. Somit lassen sich selbst komplexe Fehlergeometrien bei sehr feiner Diskretisierung abbilden. Abbildung 1 verdeutlicht die Vorgehensweise und das mögliche Ergebnis bei einer Messung. Bei der relativen Phase wird der ungestörte Untergrund subtrahiert.



**Abbildung 1:** Skizze zum Verständnis der Transmissionsauswertung und des Phasensignals

Werden beispielsweise Lamb-Wellen mit einer Spurwellenlänge  $\lambda$  von 8 mm verwendet, so kann bei Annahme einer minimalen Plattendicke von 6 mm und einer maximalen Dicke von 8 mm der in Abbildung 2 (links) gekennzeichnete Bereich der Phasengeschwindigkeiten im Dispersionsdiagramm angenommen werden. Im aufgenommenen Ultraschall A-Bild macht sich eine derartige Phasenänderung wie in Abbildung 2 (rechts), für eine  $60^\circ$  Verschiebung gezeigt, bemerkbar.



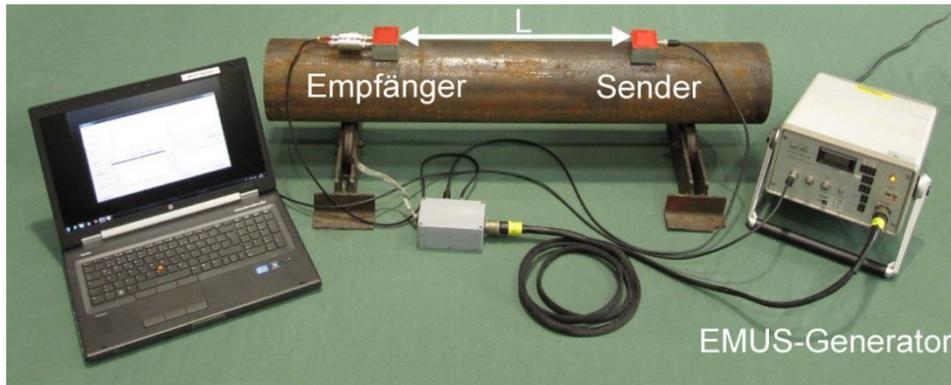
**Abbildung 2:** Flurbetrachtung (Arbeitspunktverschiebung) im Dispersionsdiagramm und A-Bild zur Darstellung einer Phasenverschiebung

Da sich bei einer fest eingepprägten Spurwellenlänge die Phasengeschwindigkeit über die Beziehung  $c_p = \left(\frac{\lambda_s}{d}\right) \cdot (f \cdot d)$  ergibt, resultiert der eindeutige Arbeitspunkt durch den Schnitt mit den Dispersionskurven des jeweiligen Modes [1-3]. Ändert sich nun die Dicke der wellenleitenden Struktur im Laufweg, so verschiebt sich auch der Arbeitspunkt der jeweiligen Mode entsprechend. So lange diese Dickenänderung klein ist, ist keine Modenkonversion der geführten Welle zu erwarten. Im vorliegenden theoretischen Modell sind die Effekte der Modenkonversion, Streuung und Beugung an Materialfehlern zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht berücksichtigt. Aber bereits ohne die Berücksichtigung dieser Effekte ist die Übereinstimmung zwischen diesen theoretischen Daten und den im Folgenden vorgestellten experimentellen Ergebnissen überzeugend.

### 3. Experimentelle Verifikation der theoretischen Resultate

Zur experimentellen Verifikation der simulierten (modellierten) Daten wurde ein Laboraufbau zur Messung der Phaseninformationen realisiert. Die Messanordnung entspricht der in Abbildung 3, in der die mechanische Halterung zur phasenstarrten Kopplung nicht gezeigt ist. Diese Kopplung ist notwendig, um den Ultraschalllaufweg, die Strecke zwischen Sender und Empfänger in der Berechnung berücksichtigen zu können. Zur Anregung und zum Empfang der möglichst modenrein geführten Wellen wurden elektromagnetische Ultraschall-Wandler (EMUS) verwendet. EMUS-Prüfköpfe haben gegenüber der klassischen Anregung den entscheidenden Vorteil, dass die Ultraschallwandlung direkt in der Testkörperoberfläche durch magnetostruktive Wechselwirkung und Lorentz-Kräfte stattfindet. Es ist eine koppelmittelfreie und berührungslose Anregung und Empfang der Ultraschallsignale möglich. Oberflächeneinflüsse werden minimiert und Ankoppelprobleme gänzlich ausgeschlossen [3]. Hierdurch wird erst eine Phasenmessung mit der benötigten Genauigkeit möglich, da Störeinflüsse an der Oberfläche und die Variabilität des Koppelspaltes wegfallen. Durch

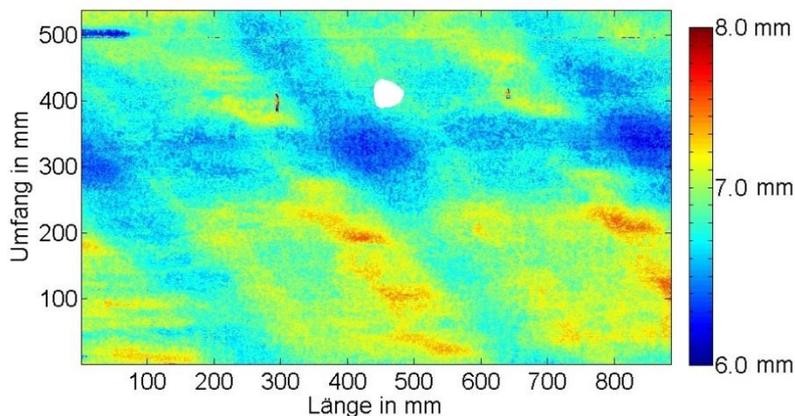
den Prüfkopfaufbau kann räumlich periodisch eine Krafteinwirkung eingeprägt werden. Dadurch können besonders effektiv und selektiv reine Moden geführter Ultraschallwellen angeregt werden [4]. Die Periodizität der Krafteinwirkung entspricht der Spurwellenlänge. Die Verwendung von EMUS-Prüfköpfen für die Anregung und den Empfang von geführten Ultraschallwellenmoden ist aus den oben genannten Gründen unverzichtbar.



**Abbildung 3:** Laboraufbau zur Messung der Phaseninformation am Rohr-Testkörper

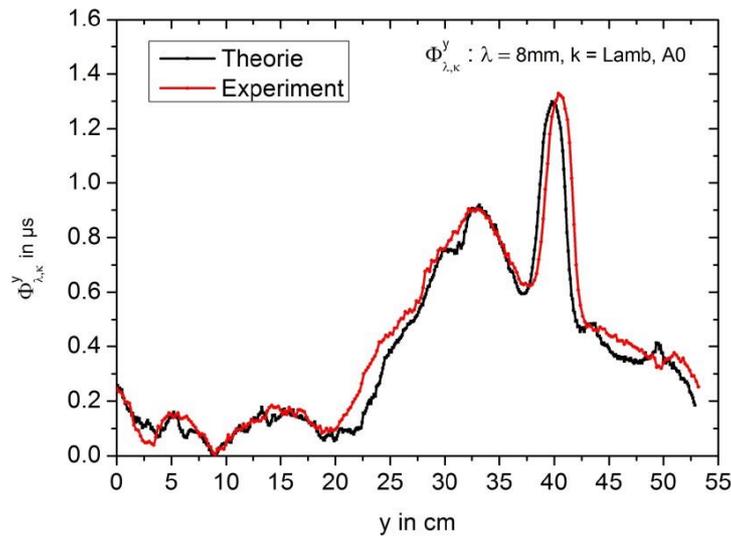
Um einen weiten Bereich an Spurwellenlängen abdecken zu können, wurden spezielle elektromagnetische Ultraschall-Wandler entwickelt, die ein Umschalten auf verschiedene Spurwellenlängen ermöglichen. Somit kann mit einem einzigen Wandler ohne Prüfkopfwechsel ein großer Parametersatz abgedeckt werden und verschiedene Arbeitspunkte im Dispersionsdiagramm gezielt angesteuert werden. Der EMUS-Sender wird über eine spezielle Sendeelektronik des Fraunhofer IZFP gespeist und der EMUS-Empfänger wird über ein Bandpassfiltersystem in ein Oszilloskop mit sehr hoher Abtastrate geführt. Datenaquisition und -auswertung werden über eine eigens entwickelte Software realisiert.

Um die Einsatzfähigkeit auch an komplexen Fehlergeometrien zu zeigen, wurde ein rohrförmiger Testkörper mit großen Wanddickenschwankungen über der gesamten Fläche mit einem keilförmigen Fehler versehen, der eine maximale Wanddickenreduktion von 50 Prozent hat. Um das theoretische Phasensignal bestimmen zu können, wurde eine Ultraschall-Wanddickenmessung an der gesamten Rohroberfläche durchgeführt, das Ergebnis ist in Abbildung 4 als Wanddickenkarte gezeigt. Um die Wanddickenschwankungen besonders zum Ausdruck zu bringen, wurde der Fehler (weiß) aus dieser Darstellung ausgeblendet.



**Abbildung 4:** Wanddickenkarte für den Rohr-Testkörper mit einer 50% Wanddickenreduktion; Fehler in weiß dargestellt

Werden diese Ergebnisse mit dem entwickelten Algorithmus weiterverarbeitet, so erhält man die in der Abbildung 5 (schwarz) gezeigte Phasenkurve. Es wurden Lamb-Wellen ( $a_0$ -Mode) mit einer Spurwellenlänge von 8 mm zugrunde gelegt. Unter Annahme der Wandler-Position an den Bildrändern in Abbildung 4 (links und rechts) und der Schalllaufrichtung in X-Richtung. Die unter den gleichen Parametern experimentell bestimmte Phasenverschiebung ist in Abbildung 5 (rot) dargestellt. Der direkte Vergleich der beiden Phasenkurven zeigt die sehr gute Übereinstimmung, die oben beschriebene Theorie ist somit verifiziert.

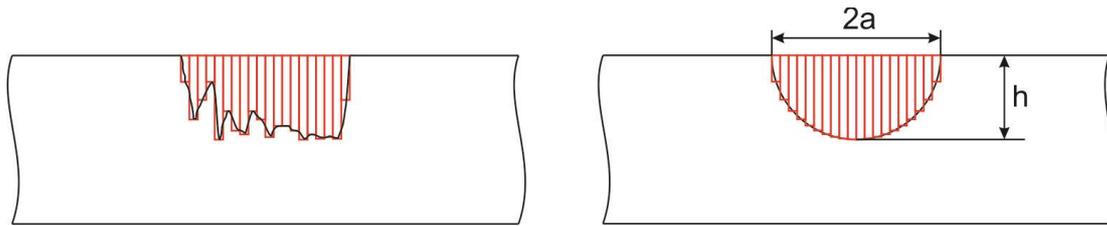


**Abbildung 5:** Theoretisch und experimentell ermittelte Phaseninformation

Es zeigt sich, dass dieses Messverfahren sehr sensitiv auf Wanddickenänderungen im Ultraschalllaufweg reagiert. Zur reinen Fehlerdetektion bei relativ großen Wanddickenschwankungen lässt sich der Fehler durch Gradientenbildung (zweidimensional) oder durch Berechnung der Steigung der Phasenkurve abbilden. Viel wichtiger ist, dass das Verfahren quantitative Aussagen über die Fehlergeometrien ermöglicht, da die Gesamt-Phasenkurve die Integration der „Slowness“ (reziproke Phasengeschwindigkeit) über einen US-Laufweg darstellt. Liegen Phasenkurven zu unterschiedlichen Parametersätzen vor, so können wie im nächsten Abschnitt gezeigt quantitative Fehlerdaten extrahiert werden.

#### 4. Rekonstruktion der Fehlerdaten

Untersuchungen an realen korrosionsgeschädigten Bauteilen haben gezeigt, dass die natürlich entstandene Fehlergeometrie durch einfachere geometrische Formen (z.B.: Kreisbogen, Dreieck, Rechteck) angenähert werden kann, wenn die Fehlertiefenkontur wie in Abbildung 6 gezeigt diskretisiert und symmetrisch umorganisiert wird. Dieses Vorgehen ist bei realen Fehlerprofilen stets möglich. Dadurch wird erreicht, dass die angenäherten Fehlergeometrien lediglich mit zwei unabhängigen Parametern vollständig beschrieben werden können. Sinnvollerweise werden als Parameter die Fehlerlänge und die maximale Tiefe gewählt, da diese beiden Werte für eine spätere Anwendung die höchste Relevanz besitzen.

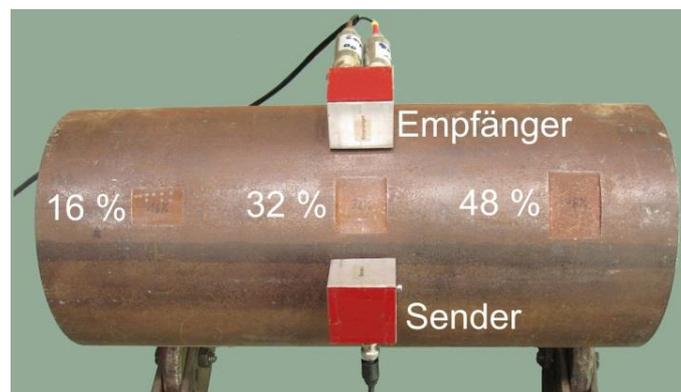


**Abbildung 6:** Symmetrisierung der Fehlergeometrie am Beispiel eines Kreisbogens;  
links: realer Fehler; rechts: umsortierter und symmetrisierter Fehler

Mit Hilfe eines schnellen iterativen Rekonstruktionsalgorithmus können aus den gemessenen Phaseninformationen die unabhängigen Parameter der angenäherten Fehlergeometrie (Länge und maximale Tiefe) ermittelt werden. Da die angenäherten Fehlergeometrien durch zwei unbekannte Größen vollständig bestimmt sind, werden auch mindestens zwei unabhängige Phasenmessungen zur Ermittlung der interessierenden Daten benötigt. Jede gemessene Phasenkurve  ${}^{Messung}_1\Phi_{\lambda,k}^y$  wird mit dem theoretischen Phasenverlauf  ${}^{Theorie}_1\Phi_{\lambda,k}^y$ , der unter Einbeziehung des Parametersatzes und der zu iterierenden Fehlerdaten bestimmt wird, für die o.g. geometrischen Formen abgeglichen. Wird eine zuvor festgelegte akzeptable Fehlerschwelle ( $\varphi$ ) unterschritten, so sind die genäherten Fehlerparameter mit hinreichender Genauigkeit bestimmt.

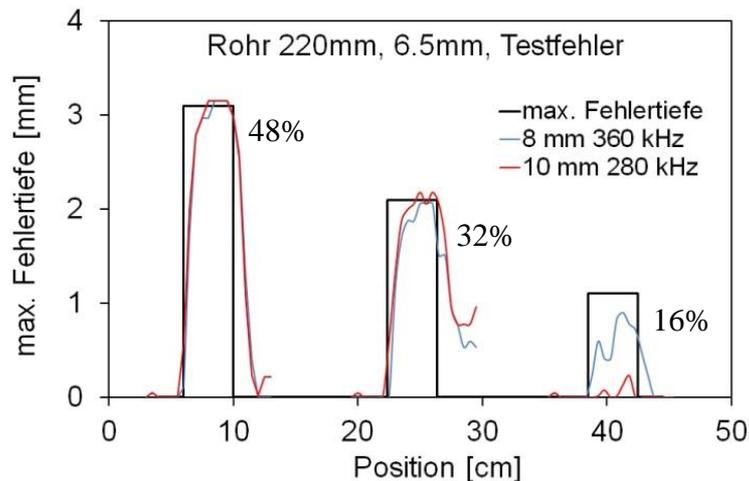
$$|{}^{Messung}_1\Phi_{\lambda,k}^y - {}^{Theorie}_1\Phi_{\lambda,k}^y| \leq \varphi$$

Das Verfahren kann nochmals beschleunigt werden, wenn auswertbare Laufzeitinformationen der beiden Reflexionssignale vorliegen. Hierzu ist erforderlich, dass jeder EMUS-Wandler sowohl als Sender als auch als Empfänger genutzt werden kann. Somit kann die Länge des Fehlers ( $^0a$ ) abgeschätzt werden und dadurch eine Startgröße für den folgenden Iterationsmechanismus genauer vorgegeben werden. Der Rekonstruktionsalgorithmus wurde an verschiedenen Testkörpern erprobt. Abbildung 7 zeigt exemplarisch einen rohrförmigen Testkörper (Durchmesser: 220 mm; Wanddicke: 6,5 mm) mit unterschiedlich tiefen Flachstellen (16%, 32% und 48% Wanddickenreduktion). Die Scan-Richtung war in axialer- und die Schallrichtung in Umfangsrichtung.



**Abbildung 7:** Rohr-Testkörper mit einer 16%, 32% und 48% Wanddickenreduktion

Es wurden Lamb-Wellen mit einer Spurwellenlänge von 8 mm und 10 mm mit je einem Ultraschallwellenmode verwendet. Abbildung 8 zeigt, dass bereits ohne weitere Parametervariation (Wellentyp, Mode und Arbeitspunkt) eine gute Übereinstimmung zwischen rekonstruierter und realer Fehlertiefe erreicht werden kann.



**Abbildung 8:** Rekonstruierte Fehlergeometrie

Die Geometrie des Fehlers mit einer 48%igen Wanddickenreduktion wurde im Rahmen der gesetzten Genauigkeit befriedigend rekonstruiert. Auch die Fehlerbreite und maximale Fehlertiefe des 32%igen Fehlers liegen bei der gewünschten Genauigkeit, allerdings liegt eine rekonstruierte Asymmetrie des Fehlers vor. Es wird eine unbekannte Materialungänze im Stahl angenommen, die hierzu führte, da an dieser Position auch die Phasensignale eine derartige Annahme rechtfertigen. Der 16%ige Fehler wurde mit der vorgestellten Methode detektiert, konnte aber nur mit minderer Qualität rekonstruiert werden, da bei diesem Fehler die Sensitivität des verwendeten Modes und der Arbeitspunkt nicht optimal gewählt waren. Insgesamt zeigt sich, dass die Vorgehensweise ein erhebliches Potential zur effektiven Detektion und zur quantitativen Charakterisierung von Materialschädigungen selbst bei sehr geringen Wanddickenreduktionen und großen Distanzen zwischen Sender und Empfänger besitzt.

## 5. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden die ersten Untersuchungen mit einem neuartigen Ansatz zur Bestimmung der Fehlergrößen vorgestellt. Durch den Einsatz verschiedener Ultraschall-Wellentypen (geführte SH-Wellen und Lamb-Wellen) mit gezielter Anwendung unterschiedlicher dispersiver Moden und Arbeitspunkten konnten quantitative Aussagen zur Fehlergeometrie getroffen werden. Ausgewertet wurden mit Ungängen sehr empfindlich interagierende Signale, sogenannte Phasensignale.

Um zuverlässig auswertbare Signale anregen und empfangen zu können, müssen elektromagnetisch arbeitende Ultraschallprüfköpfe (EMUS) zum Einsatz kommen. Speziell hierfür wurden EMUS-Prüfköpfe entwickelt, die verschiedene Spurwellenlängen einprägen und empfangen und damit unterschiedliche Arbeitspunkte modenrein anregen und empfangen können.

Weiterhin wurde ein Rekonstruktionsalgorithmus vorgestellt, der aus den Phasensignalen die Fehlergeometrie berechnet und die wichtigen Fehlergrößen, wie Fehlerlänge, -tiefe und -breite bestimmt.

## Referenzen

- [1] Viktorov, I. A., "Rayleigh and Lamb Waves", Plenum Press, New York, 1967
- [2] Achenbach, J. D., "Wave Propagation in Elastic Solids", North-Holland Publishing Company, Amsterdam, London, 1973
- [3] Hirao, M.; Ogi, H.: "EMATs for Science and Industry: Noncontacting Ultrasonic Measurements"; Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003
- [4] Salzburger, Hans Jürgen; Niese, Frank; Dobmann, Gerd: "Emat Pipe inspection with guided Waves"; Welding in the world. 56 (2012), 5-6, S. 35-43
- [5] Niese, F.; Salzburger, H.-J.; Zenner, J.: „Scannende Prüfung auf Außenkorrosion an Rohrleitungen mittels umlaufenden geführten Wellen“, DGZfP-Jahrestagung 2007, Vortrag 65