

# Anwendungen und Chancen bei der quantitativen Korrosionsdetektion mittels Nutzung des charakteristischen Phasenverhaltens geführter Ultraschallwellenmoden in Transmissionsanordnung

Patrick JÄCKEL \*, Frank NIESE \*, Christian BOLLER \*

\* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

**Kurzfassung.** Die quantitative zerstörungsfreie Prüfung dünnwandiger Strukturen in schwer zugänglichen Bereichen ist bis heute eine noch ungenügend gelöste Aufgabe.

Beispielsweise kann Oberflächenkorrosion Schäden von einer sehr flächigen, geometrisch oft komplexen und weniger tiefenbetonten Natur in sicherheitsrelevanten Bereichen hervorrufen, die durch kommerzielle Messverfahren bisher nicht zufriedenstellend erfasst werden können. Eine Beurteilung des Strukturzustandes bedarf einer Quantifizierung der Schädigung und ist somit durch die notwendige Sichtprüfung eine zeit- und kostenintensive Angelegenheit.

Mittels gezielter Ausnutzung des dispersiven Verhaltens langreichweitiger geführter Ultraschallwellenmoden in Form der Phasenauswertung bei einer Transmissionsmessung und durch Variation der Prüfparameter, wie Arbeitspunkt, Mode, Wellentyp und Spurlängende, werden umfangreiche Datensätze erhalten, die voneinander unabhängige Informationen zur Rekonstruktion der Fehlergeometrie liefern.

In diesem Beitrag werden die grundlegenden Zusammenhänge, Fehlerrekonstruktions- und Messstrategien vorgestellt und durch eine Vielzahl an Messresultaten, Beispielen und Anwendungen dargestellt.

## 1. Einführung

Sicherheitsrelevante Infrastruktur, beispielsweise Rohrleitungen in chemischen und petrochemischen Anlagen, Versorgungsleitungen für Gas und Wasser und tragende Konstruktionen wie Stützen und Pfosten, sind bei mangelnder oder fehlerhafter Isolierung der Korrosion frei ausgesetzt. Da es sich meist um für Sichtprüfungen ungeeignete und häufig auch für weitere Untersuchungsmethoden unzugängliche Positionen handelt, ist das Erkennen und Beurteilen der Schädigung schwierig. Darüber hinaus führt Oberflächenkorrosion meist zu sehr flächigen geometrisch oft komplexen und weniger tiefenbetonten Schäden, so dass kommerzielle Messverfahren an ihre Grenzen stoßen und somit keine zufriedenstellenden Aussagen zur Schädigung machen können.



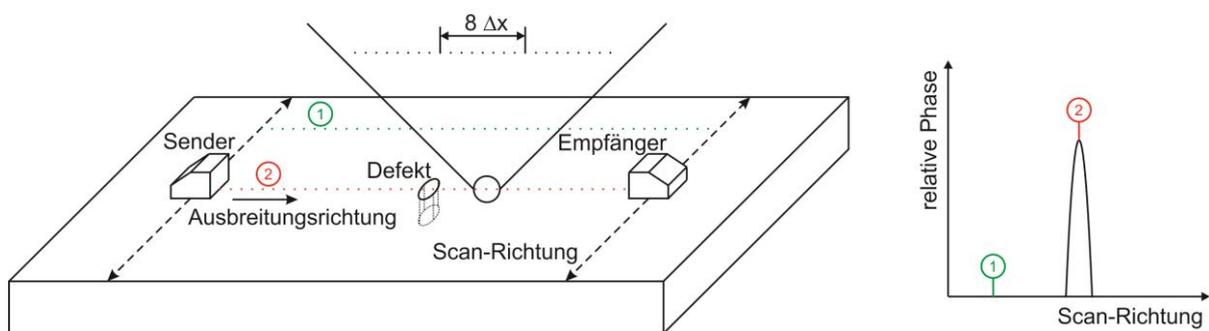
Der Einsatz von dispersiven Ultraschallwellenmoden bietet die Möglichkeit, sehr geringe Wanddickenreduktionen im Schallweg via einer Ultraschall-Transmissionsmessung zu detektieren und ist somit geeignet, auch korrosionsbedingte Schäden zu erfassen. Der Messeffekt beruht darauf, dass sich sowohl die Phasen- als auch die Gruppengeschwindigkeit des dispersiven Ultraschallwellenmodes mit der Wanddicke ändern. Über die Auswertung der Phasenlage und/oder Laufzeit sind deshalb quantitative Informationen zur Schädigung im Schallweg zugänglich.

## 2. Phasenänderung des Ultraschallsignals

Das theoretische Modell (bereits vorgestellt in [6]) 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.

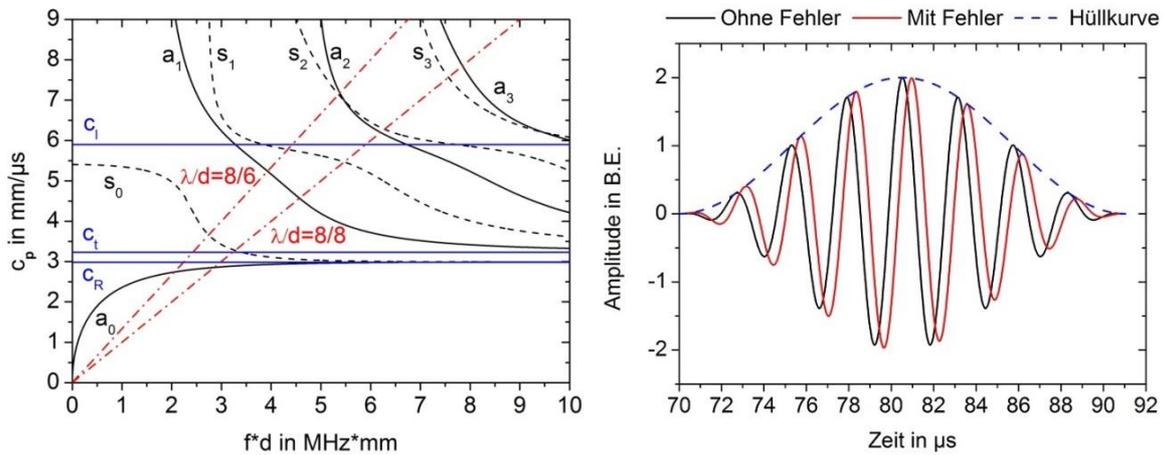
$$\Phi_{\lambda,k}^y = \underbrace{\Delta x_1 \cdot \frac{1}{c_p^1(d_1)}}_{t_p^1} + \underbrace{\Delta x_2 \cdot \frac{1}{c_p^2(d_2)}}_{t_p^2} + \dots + \underbrace{\Delta x_n \cdot \frac{1}{c_p^n(d_n)}}_{t_p^n}$$

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. Sinngemäß lassen sich die zuvor genannten Zusammenhänge auch auf die Gruppengeschwindigkeit übertragen. 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

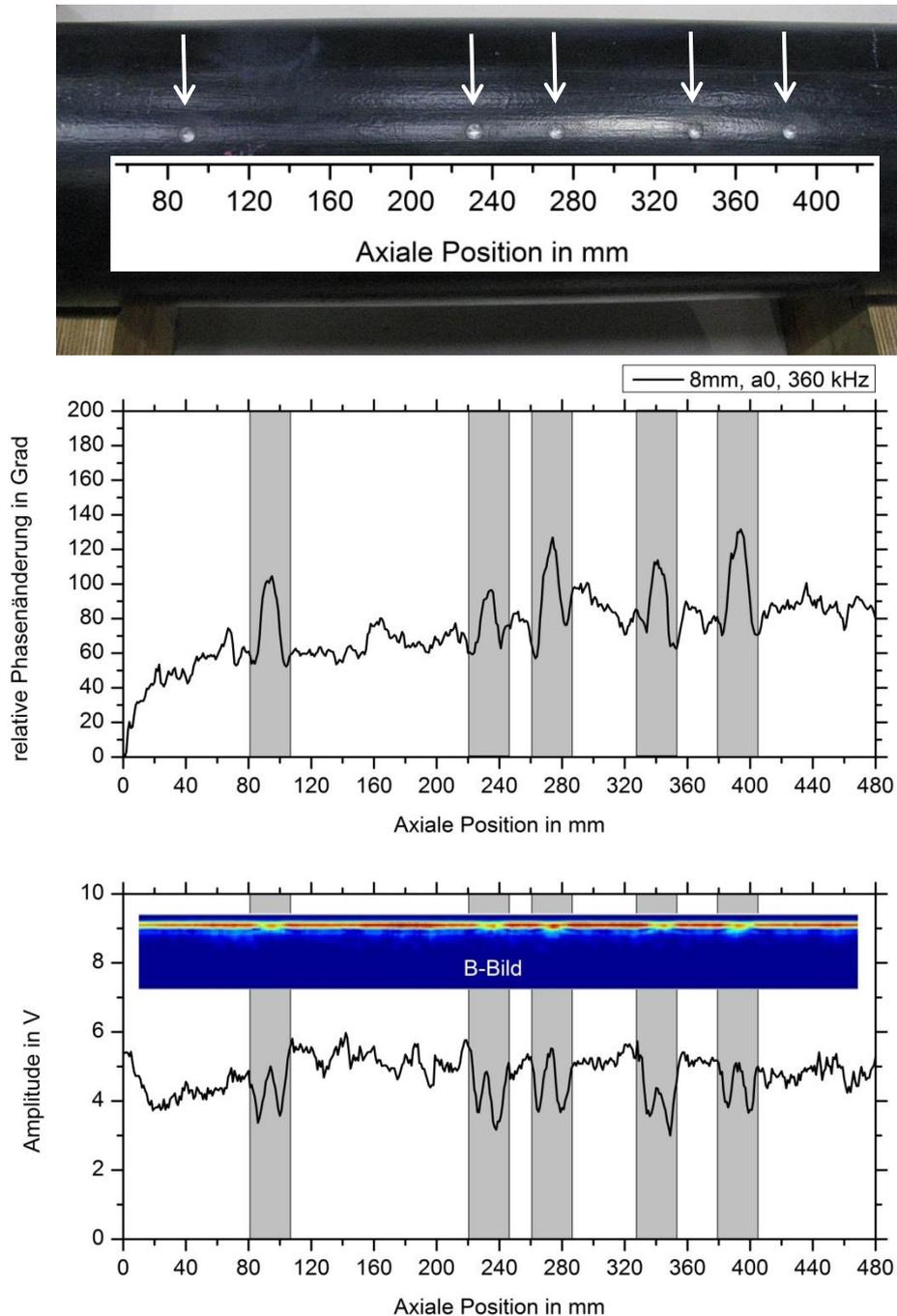
Da sich bei einer fest eingprägten Spurwellenlänge die Phasengeschwindigkeit über die Beziehung  $c_p = \left(\frac{\lambda_s}{d}\right) \cdot (f \cdot d)$  ergibt, resultiert der eindeutige Arbeitspunkt durch den Schnitt mit den Dispersionskurven des jeweiligen Modes [1-3]. Ändert sich nun die Dicke 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.

### 3. Anwendungsbeispiele

In den folgenden Beispielanwendungen werden zur Anregung und zum Empfang der möglichst modenrein geführten Wellen elektromagnetische Ultraschall-Wandler (EMUS) verwendet. EMUS-Prüfköpfe haben gegenüber der klassischen Anregung den entscheidenden Vorteil, dass die Ultraschallwandlung direkt in der Testkörperoberfläche durch magnetostriktive 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 die beschriebene Phasenmessung mit der benötigten Genauigkeit möglich, da Störeinflüsse an der Oberfläche und die Variabilität des Koppelpaltes wegfallen [6]. Durch den speziellen Prüfkopfaufbau kann räumlich periodisch eine Krafteinwirkung eingprägung werden, wodurch besonders effektiv und selektiv reine Moden geführter Ultraschallwellen angeregt werden [4]. Die Periodizität der Krafteinwirkung entspricht hier der Spurwellenlänge. 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. Einzelheiten zu diesem neuen Wandlerkonzept können [6, 7] entnommen werden. Der EMUS-Sender wird über eine speziell hierfür entwickelte Sendeelektronik gespeist und der EMUS-Empfänger wird über ein Bandpassfiltersystem in ein Oszilloskop mit sehr hoher Abtastrate geführt. Die Datenaquisition und -auswertung werden über eine eigens entwickelte Software realisiert.

### 3.1 Lochfraßkorrosion

Es handelt sich um einen lackierten Rohrtestkörper aus Stahl mit einem Durchmesser von 150 mm mit fünf eingebrachten Bohrungen von 8 mm Durchmesser und einer Maximaltiefe von 50 % der Wandstärke, die eine lokale Lochfraßkorrosionsstelle simulieren sollen. Abbildung 4 zeigt den Testkörper und die erhaltenen Resultate in Form der Phasen- und Amplitudensignale, die durch eine scannende Prüfung in axialer Richtung erhalten wurden.



**Abbildung 3:** Lackierter Rohrtestkörper mit fünf Bohrungen; oben: Foto mit Abmessungen; mittig: relative Phasenänderung; unten: Amplitudenverhalten

Es zeigt sich, dass alle eingebrachten Fehler durch die erhaltenen Phasenkurven sicher detektiert werden können. Für die Messung wurde ein 8 mm Prüfkopf im Mode a0 und einer Wandleraperturbreite von 10 mm verwendet.

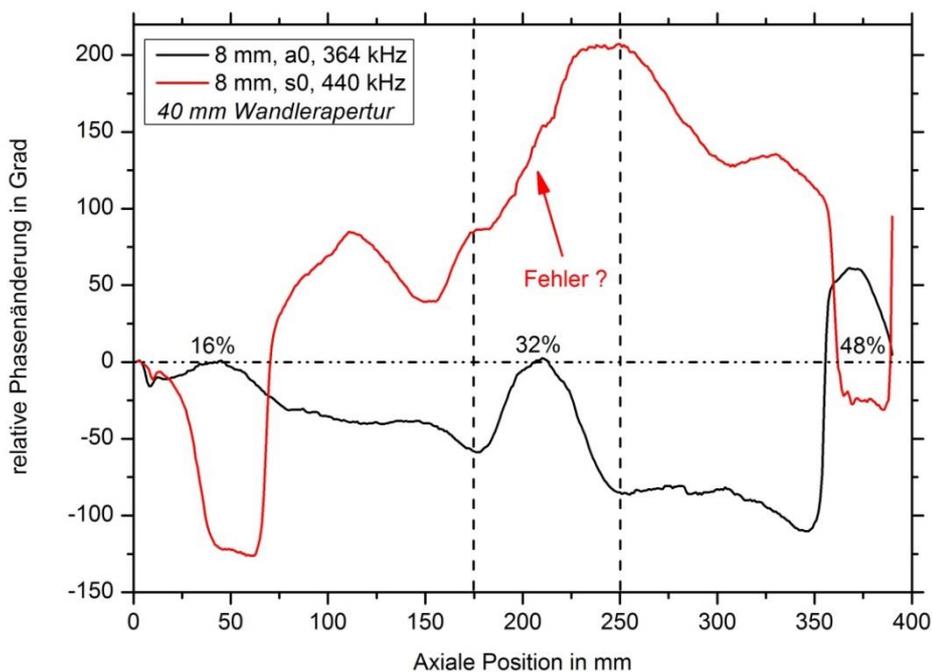
### 3.2 Oberflächenkorrosion

Es handelt sich um einen unlackierten Rohrtestkörper aus Stahl mit einem Durchmesser von 221 mm mit drei eingebrachten Flachstellen von 30x40 mm<sup>2</sup>, 42x40 mm<sup>2</sup> und 50x40 mm<sup>2</sup>, die eine Wanddickenreduktion von 16%, 32% und 48% aufweisen. Diese Fehlertypen sollen eine Oberflächenkorrosionserscheinung nachstellen. Abbildung 4 zeigt den Testkörper als CAD-Zeichnung.

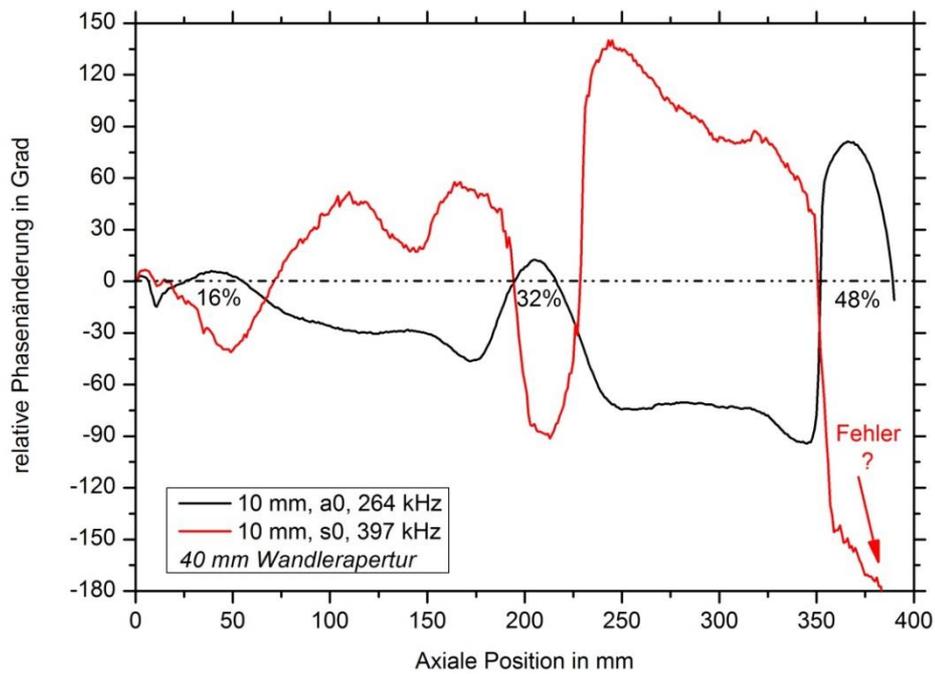


**Abbildung 4:** Rohrförmiger Testkörper mit Wanddickenreduktionen von 16%, 32% und 48%

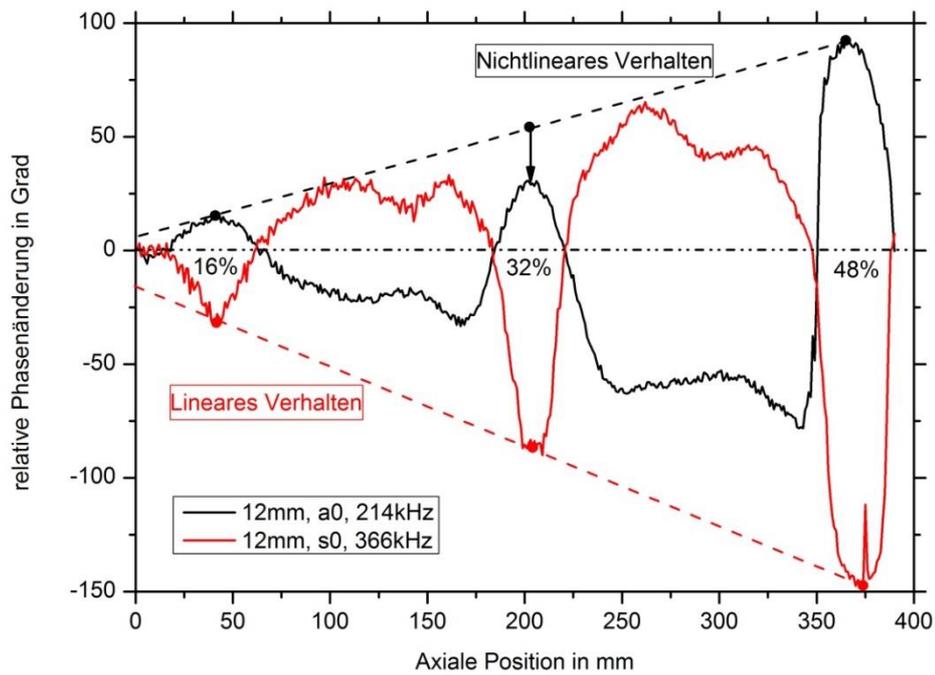
Die in Kapitel 2 beschriebenen Phasenkurven werden hier in vier Arbeitspunkten zu je zwei Moden (a0, s0) bestimmt. Hierzu werden EMUS-Wandler mit den Wellenlängen 8 mm, 10 mm, 12 mm und 16 mm verwendet. Die Abbildungen 5-8 zeigen die Ergebnisse in Form von Diagrammen.



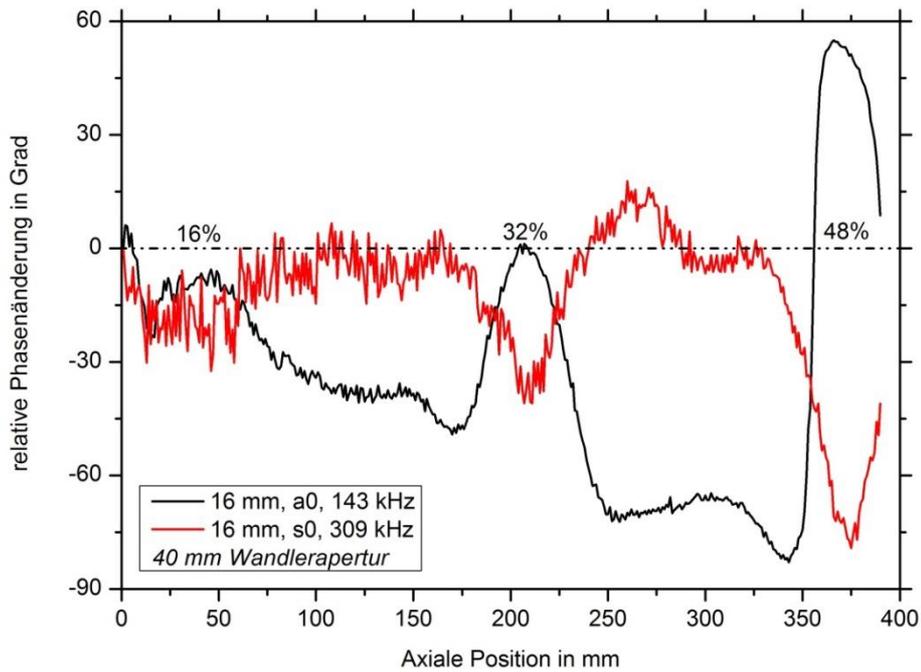
**Abbildung 5:** Rohrförmiger Testkörper mit Wanddickenreduktionen von 16%, 32% und 48%; Lamb Welle mit 8 mm Spurwellenlänge; a0 bei 364 kHz, s0 bei 440 kHz



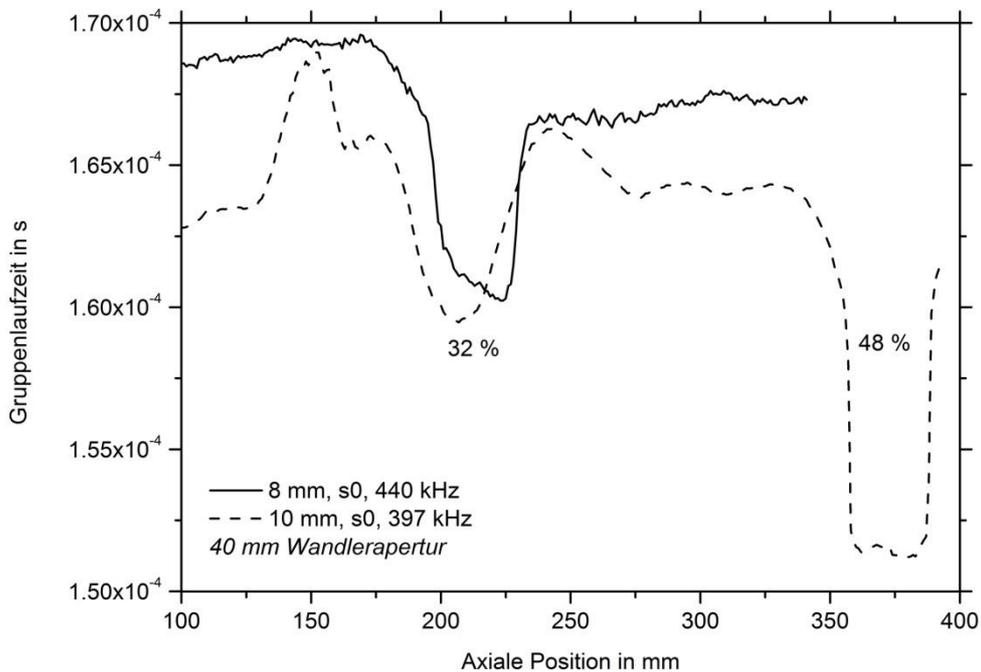
**Abbildung 6:** Rohrförmiger Testkörper mit Wanddickenreduktionen von 16%, 32% und 48%; Lamb Welle mit 10 mm Spurwellenlänge; a0 bei 264 kHz, s0 bei 397 kHz



**Abbildung 7:** Rohrförmiger Testkörper mit Wanddickenreduktionen von 16%, 32% und 48%; Lamb Welle mit 12 mm Spurwellenlänge; a0 bei 214 kHz, s0 bei 366 kHz



**Abbildung 8:** Rohrförmiger Testkörper mit Wanddickenreduktionen von 16%, 32% und 48%; Lamb Welle mit 16 mm Spurwellenlänge; a0 bei 143 kHz, s0 bei 309 kHz



**Abbildung 9:** Rohrförmiger Testkörper mit Wanddickenreduktionen von 32% und 48%; Lamb Welle mit 8 mm Spurwellenlänge, s0 bei 440 kHz und Lamb Welle mit 10 mm Wellenlänge, s0 bei 397 kHz

Es fällt auf, dass sämtliche Fehler in allen acht Arbeitspunkten eindeutig detektiert werden, mit der Ausnahme bei einer Wellenlänge von 8 mm im Mode s0 und einer Wanddickenreduktion von 32 %. Siehe hierzu Abbildung 5. Weiter fällt auf, dass bei einer Wellenlänge von 10 mm der Fehler im Mode s0 bei einer Wanddickenreduktion von 48%

keinen Sprung in die Ausgangslage mehr macht. Ursache dieser beiden Besonderheiten ist die Lage der Arbeitspunkte im Dispersionsdiagramm für die Phasengeschwindigkeit. In dem gegebenen Falle befindet sich der Arbeitspunkt im steilen Bereich der Phasengeschwindigkeit. Resultat ist, dass die starke Differenz der Geschwindigkeiten dazu führt, dass die Phase einen Sprung von mehr als 360 Grad vollführt und damit nicht mehr ohne weiteres verfolgt werden kann. Es wird der nächste passende Phasenpunkt eingefangen. Eine solche Situation führt aber nicht dazu, dass ein Fehler unentdeckt bleibt! Parallel zur Auswertung muss die Gruppenlaufzeit berücksichtigt werden, denn in ungünstigen Situationen der Phasengeschwindigkeit führt die Auswertung der Gruppenlaufzeit zu eindeutigen Resultaten (Abbildung 9).

#### **4. Zusammenfassung**

In diesem Beitrag wurden Untersuchungen mit einem Ansatz zur Phasenauswertung an rohrförmigen Testkörpern mit Fehlern, die Lochfraß- und Oberflächenkorrosion simulieren sollen durchgeführt. Durch den Einsatz geführter Ultraschallwellen mit gezielter Anwendung unterschiedlicher dispersiver Moden und Arbeitspunkten konnte gezeigt werden, dass beide Fehlertypen in verschiedenen Fehlerintensitätsgraden zuverlässig gefunden werden konnten und ein direkter Zusammenhang zur Fehlerquantität besteht. Weiter wurde gezeigt, dass es Situationen geben kann, in denen kein eindeutiges Phasensignal auftritt und dass dann Gruppeninformationen aussagekräftig den Fehler aufzeigen.

#### **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
- [6] Jäckel, P., Niese, F.: „Neue Ansätze in der quantitativen Korrosionsdetektion unter gezielter Ausnutzung des dispersiven Verhaltens geführter Ultraschallwellenmoden“, DGZfP-Jahrestagung 2013
- [7] Niese, F., Jäckel, P.: „Innovative EMUS-Wandlerentwicklungen für neue Prüfaufgaben“, DGZfP-Jahrestagung 2014