

Untersuchung und quantitative Bewertung der Leistungsfähigkeit eines neuen Phased-Array-Sensors für die Pipeline-Inspektion

Martin SPIES¹, Olaf MÜLLER¹, Iryna LACHTCHOUK¹, Martin TSCHUCH¹
¹ Baker Hughes - Process & Pipeline Services, Stutensee

Kontakt E-Mail: martin.spies@bakerhughes.com

Kurzfassung. Die Phased-Array-Technik ermöglicht eine flexible Anpassung der Ultraschallprüftechnik an ein breites Spektrum von Prüfaufgaben. Durch ihre Nutzung im Bereich der Pipeline-Inspektion können unterschiedliche Inspektionsarten gleichzeitig ausgeführt werden, sodass Baker Hughes (vormals PII Pipeline Solutions) einen auf der Phased-Array-Technik basierenden Inspektionsmolch entwickelte, der seit mehr als einem Jahrzehnt erfolgreich eingesetzt wird. Um durch die Phased-Array-Technik ermöglichte weitere Prüfmodalitäten optimal nutzen zu können, insbesondere im Hinblick auf die Identifikation unterschiedlicher Defektmorphologien, wurde eine neue Generation von Phased-Array-Sensoren entwickelt.

Im Rahmen von umfangreichen Tests wurde anschließend der mit den auf Basis der Simulationen erarbeiteten Designparameter gefertigte prototypische Sensor unter anderem hinsichtlich seiner Schallfeldeigenschaften untersucht. Ziel der Untersuchungen war die Validierung der Simulationsergebnisse anhand von experimentellen Ergebnissen. Für eine ganze Reihe von unterschiedlichen Ansteuerungsmodi (Schallfeldsteuerung und -fokussierung) wurden Schallfeldprofile im Wasserbad mittels Hydrophon vermessen und den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Zur quantitativen Bewertung wurde ein Akzeptanzkriterium anhand einer ‚Performance Number‘ definiert, die für die jeweiligen Fälle ermittelt wurde.

Wir berichten in diesem Beitrag über den experimentellen Laboraufbau, das zur Validierung gewählte Akzeptanzkriterium und die erzielten Ergebnisse, die die Leistungsfähigkeit des neuen Phased-Array-Sensors belegen.

Einführung

Neue Entwicklungen im Bereich der Ultraschallprüfung basieren im Wesentlichen auf der Phased-Array-Technik, die ein Steuern und Fokussieren der Schallfelder ermöglicht. Damit besitzt sie ein erhebliches Potential zur flexiblen Anpassung der Ultraschallprüftechnik an ein breites Anwendungsspektrum. Sie stellt zudem eine leistungsfähige Alternative zu Prüftechniken mit verschiedenen konventionellen Prüfköpfen dar. Beim Einsatz im Bereich der Pipeline-Inspektion können verschiedene Prüftechniken zur Rissdetektion und zur Detektion von Materialverlust, beispielsweise durch Korrosion, gleichzeitig ausgeführt werden. Im Hinblick auf diese Vorteile hat Baker Hughes (vormals PII Pipeline Solutions) einen Inspektionsmolch auf Basis der Phased-Array-Technik entwickelt, den sogenannten UltraScan™ DUO ([1], Abbildung 1).



Abb. 1. UltraScan™ DUO - Blick auf die Sensorträger mit den Phased-Array-Prüfköpfen (links) und das Ausschleusen des Molches nach einem Inspektionslauf (rechts).

In Abbildung 2 sind die verschiedenen Inspektionsarten schematisch dargestellt, die durch die zeitverzögerte Ansteuerung der jeweils aktiven Array-Elemente ausgeführt werden können. Zur Detektion von Materialverlust werden senkrecht eingeschallte Longitudinalwellen eingesetzt, während zur Detektion von externen und internen Rissen Transversalwellen mit einem Einschallwinkel von üblicherweise 45° verwendet werden. Bei der Wanddickenmessung ist auch eine Fokussierung möglich, bei der Rissprüfung können über die Standardanwendung hinaus weitere Einschallwinkel, beispielsweise zur verbesserten Detektion von geneigten Rissen, eingesetzt werden.

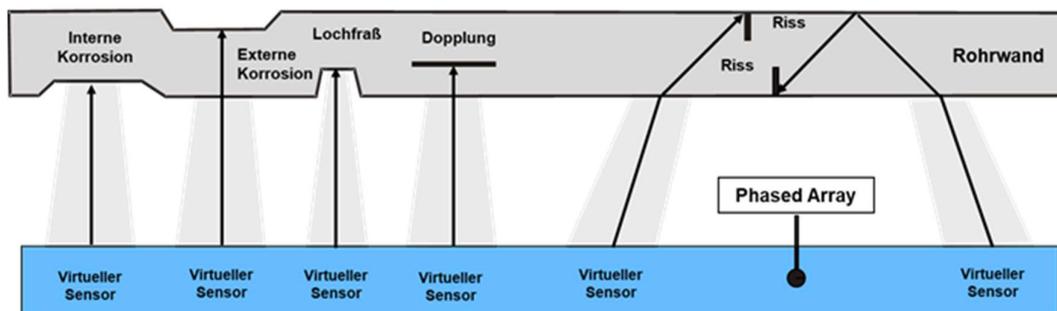


Abb. 2. Schematische Darstellung der Prüfkonfigurationen, die für die Detektion verschiedener Fehlstellen eingesetzt werden. Für die Wanddickenmessung (links) kann eine Schallfeldfokussierung hilfreich sein, während das Schallfeld bei der Rissprüfung (rechts) auf einen oder mehrere Einschallwinkel gesteuert wird.

Im Gegensatz zur vereinfachten Darstellung in Abbildung 2 sind in der Realität die Fehlermorphologien und daher die Gefahrenszenarien für Pipelines wesentlich komplexer. Risse können in Pipelines vorhanden sein, ohne dass sie eine Gefahr darstellen. Wirkt jedoch eine externe Kraft auf sie, können sie während des Betriebs wachsen. Solche Kräfte können mechanischer Natur sein (z.B. Ermüdung, Dehnung) oder umgebungsbedingt oder eine Kombination von beiden, die beispielsweise zu Spannungsrisskorrosion führt (Abb. 3). Manche Rissarten sind schwierig zu detektieren und schwierig von anderen Anomalien (z.B. geometrischen Merkmalen) zu unterscheiden, deren Größenbestimmung stellt darüber hinaus eine zusätzliche Herausforderung dar.

Es ist offensichtlich, dass Prüftechniken, die ein oder zwei Zielgrößen zur Beschreibung von geometrisch einfachen Fehlstellen nutzen, die Erfordernisse im Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit der Detektion (Probability of Detection, POD), der Identifikation

(POI) und des Sizing (POS) erfüllen. Risse können jedoch erheblich unterschiedliche Morphologien aufweisen, sodass wesentlich anspruchsvollere Prüftechniken erforderlich sind, um auch diese komplexen Fehlerarten bei der Leistungsspezifikation des Inspektionsmolches berücksichtigen zu können.

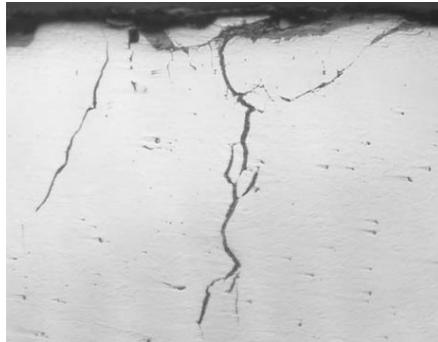


Abb. 3. Schliffbild eines typischen Spannungskorrosionsrisses [2].

Durch den Einsatz der Phased-Array-Technik können Prüftechniken mit verbessertem Leistungsvermögen entwickelt und angepasst werden, die Grundlage hierzu bildet ein Sensor mit entsprechend optimierten Design-Parametern. Im Rahmen einer simulationsbasierten Untersuchung wurde daher eine neue Generation von Phased-Array-Sensoren entwickelt, über die wir bereits auf der Jahrestagung 2019 berichtet haben [3].

Dieser Beitrag widmet sich nun der Validierung der optimierten Sensor-Eigenschaften im Hinblick auf die verschiedenen Inspektionsmodi: Schallfeldsteuerung bis zu einem Einschallwinkel von 70° für die Transversalwelle sowie Schallfeldfokussierung für die Longitudinalwelle bei der Wanddickenmessung. Wir berichten noch einmal kurz über die Optimierungsziele, die als Grundlage für die Simulationen mittels Generalisierter Punktquellensynthese (GPSS [4]) dienen. Im Anschluss zeigen wir repräsentative Ergebnisse der umfangreichen Schallfeldmessungen in Wasser, die wir zur Validierung der Simulationsergebnisse und der Sensor-Eigenschaften durchgeführt haben.

1. Sensor-Optimierung – Ziele und Vorgehensweise

Der Einsatzbereich des optimierten Phased-Array-Sensors umfasst Pipelines größeren Durchmessers mit unterschiedlichen Wandstärken. Die Optimierung wurde im Hinblick auf die Rissdetektion mittels Transversalwellen mit verschiedenen Einschallwinkeln zur weiteren Verbesserung der Amplitudenverhältnisse durchgeführt. Im Hinblick auf die Wanddickenmessung mittels Longitudinalwellen bei Senkrechteinschallung wurde die Möglichkeit zur wandstärkenabhängigen Schallfeldfokussierung auf verschiedene Tiefen berücksichtigt. Die Optimierungsprozedur umfasst verschiedene Aspekte, die schrittweise abgearbeitet wurden und im Folgenden kurz zusammengefasst sind.

1.1 Unterdrückung von Grating Lobes

Ein bekanntes Problem bei der Konfiguration von Phased-Array-Sensoren betrifft die Ausbildung von Nebenkeulen höherer Ordnung, den sogenannten Grating Lobes. Diese entstehen durch Interferenzeffekte beim Steuern und Fokussieren durch die zeitverzögerte Anregung der einzelnen Array-Elemente unter Ausnutzen der Verzögerungsgesetze. Eine ungünstige Konfiguration des Prüfkopfes kann zur Ausbildung von Grating Lobes führen, deren Amplitude unter Umständen noch über derjenigen der Hauptkeule liegt.

1.2 Homogene Ausbildung des Schallfelds in der Rohrwand

Ein weiteres Problem betrifft die Ausbildung des Schallfeldes im Bauteil in Abhängigkeit der Wasservorlaufstrecke. Liegt die Oberfläche des Bauteils beispielsweise im extremen Nahfeld des Prüfkopfes, so weist das Schallfeld die bekannte Interferenzstruktur auf, die im Hinblick auf die Detektion von Fehlern und deren Größenbestimmung vermieden werden sollte. Zur Anpassung der Nahfeldlänge eignet sich die Variation der Frequenz/Wellenlänge sowie die Reduktion der Anzahl und der Länge der aktiven Elemente.

1.3 Schallfeldoptimierung hinsichtlich der Prüfspezifikation

Neben diesen beiden Optimierungszielen musste ein weiterer Aspekt berücksichtigt werden, sodass der Optimierungsprozess iterativ erfolgte. Um während der Inspektion den Prüfbereich optimal abzudecken, werden Mindestanforderungen an Breite und Höhe der Echodynamikkurven für externe und interne Nuten unterschiedlicher Tiefen gestellt. Weitere wichtige Aspekte betreffen die Sensitivität des Sensor-Schallfeldes hinsichtlich eines Verkippens des Prüfkopfes in der Pipeline, beispielsweise beim Überfahren von Schweißnahtüberhöhungen.

Die Leistungsfähigkeit des auf diese Weise optimierten Sensors wurde in [3] anhand repräsentativer Ergebnisse für die Schallfelder und die Echodynamikkurven illustriert. Im Folgenden zeigen wir eine Auswahl von Validierungsergebnissen im Hinblick auf die Effektivität der verschiedenen Ansteuerungsprozeduren.

2. Schallfeldsimulation und Validierung

2.1 Messaufbau und Datenauswertung

Die Basis für die Entwicklung des neuen Sensor-Designs bildeten Simulationen, daher wurden Schallfeldmessungen in Wasser zur Validierung durchgeführt. Dazu wurden zweidimensionale Scans in verschiedenen Abständen zum Sensor mit Hilfe eines kommerziell verfügbaren Messsystems aufgenommen. Das System besteht aus einer Wanne, in einem x-y-z-Manipulator, einem Hydrophon als Empfänger, einem Oszilloskop und einem Ultraschallgerät. Die Wanne und die Sensor-Manipulationseinheit sind in Abbildung 4 zu sehen. Die Messungen wurden für eine Reihe unterschiedlicher Steuerungs- und Fokussierungsmodi durchgeführt.

Die gemessenen und die simulierten Schallfeldprofile haben wir verglichen und quantitativ bewertet. Für diesen Vergleich wurden Linienprofile aus den zweidimensionalen Schallfelddaten extrahiert. Bedingt durch den experimentellen Aufbau sind die aufgenommenen Datensätze im Vergleich zu den simulierten leicht verschoben. Daher wurden die simulierten und die experimentellen Profile überlagert und in Schritten von 0.2 mm (Messauflösung) gegeneinander verschoben bis der mittlere Fehler der Summe der quadratischen Fehler der einzelnen Messpunkte minimal wurde. Dieser minimale Fehler, skaliert in [dB], charakterisiert dann das Maß der Übereinstimmung von Simulation und Messung. Betrachten wir N Datenpunkte der i-ten Überlagerung der beiden Profile, dann ergibt sich der Fehler gemäß

$$e_i = \sum_1^N (A_n - \bar{A}_n)^2 / N$$

wobei e_i : durchschnittlicher Fehler für jede Überlagerung der Linienprofile,

A_n : Amplitude des gemessenen Datenpunkts,
 \bar{A}_n : Amplitude des simulierten Datenpunkts.

Daraus haben wir die Güte oder ‚Performance Number‘ s in [dB] ermittelt gemäß

$$s = \sqrt{\min e_i}.$$

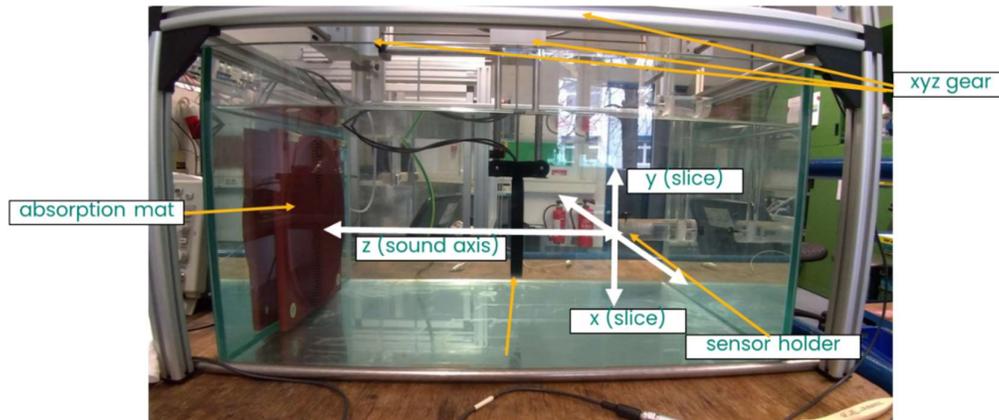


Abb. 4. Aufbau zur Schallfeldvermessung in Wasser.

2.2 Ergebnisse

Die experimentelle Validierung im Rahmen der Qualifizierung des neuen Sensors adressierte eine ganze Reihe von Inspektionsmodi. Dazu zählen die Schallfeldsteuerung auf Einschallwinkel im Bereich von 30° bis 70° für Transversalwellen in der Rohrwand, dies entspricht einem Einschallwinkel bis zu 25° in Wasser. Im Hinblick auf die Fokussierungseigenschaften des Sensors wurde bei Senkrechteinschallung auf unterschiedliche Tiefen fokussiert. Die Schallfeldprofile wurden jeweils in unterschiedlichen Abständen zum Sensor gemessen und mit den Simulationsergebnissen verglichen.

Aus der Fülle der experimentellen Validierungsergebnisse zeigen wir zwei repräsentative Fälle für die Schallfeldsteuerung und die Schallfeldfokussierung. Die Ergebnisse werden jeweils illustriert anhand des zweidimensionalen Plots des simulierten Schallfelds in Wasser (x-z-Ebene), des zweidimensionalen Plots (x-y-Ebene) der Simulation und der Messung im jeweiligen Abstand zum Prüfkopf sowie den Vergleich der zur quantitativen Bewertung ausgewählten Lateralprofile.

2.2.1 Fall 1 – Einschallwinkel 19°, unfokussiert, Profil bei $z = 28\text{ mm}$

Der Einschallwinkel von 19° in Wasser generiert eine Transversalwelle von 45° im Stahl und wurde daher als Beispiel ausgewählt. Die x-y-Plots sind logarithmisch skaliert und zeigen qualitativ übereinstimmende Merkmale (Abb. 5). Da die Simulationen für monochromatische Anregung durchgeführt wurden, sind die jeweiligen Merkmale höher aufgelöst. Demgegenüber wurden die Messungen mittels Impulsanregung durchgeführt, daher erscheint das gemessene Schallfeld geglättet. Für den quantitativen Vergleich wurden Linienprofile aus den 2D-Plots ausgewählt. Die y-Position der ausgewählten Linienprofile sind jeweils durch die schwarzen Linien in den gemessenen Plots gekennzeichnet.

Für den quantitativen Vergleich wurden in diesem Fall nur Datenpunkte mit Amplitudenwerten über -9 dB herangezogen, da die Güte der Messung unterhalb dieser Schwelle durch Rauschen beeinträchtigt ist (Abb. 6). Die Schallfeldsimulation in der x-z-Ebene (Abb. 5) zeigt die Ausbildung einer Grating Lobe, allerdings unter einem Winkel, der an der Rohroberfläche zur Totalreflexion führt. In unserer Auswertung haben wir uns auf die Hauptkeule konzentriert. Für den Vergleich wurden die Lateralprofile an den y-Positionen 9.2 mm und 11.2 mm (Abb. 6) verwendet, die ermittelten Werte für die Performance Number s betragen 1.87 dB und 1.5 dB

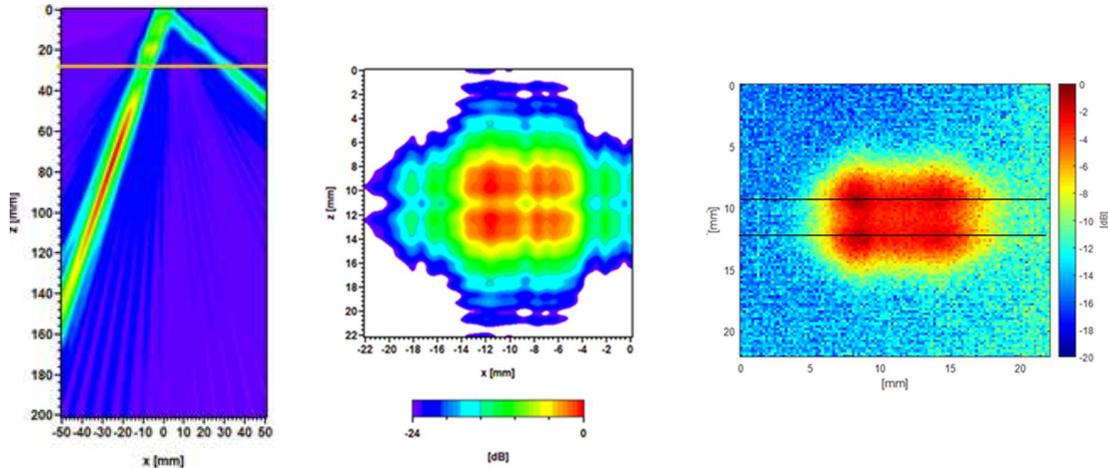


Abb. 5. Fall 1: Simuliertes Schallfeld in Wasser in der x-z-Ebene (lineare Skala, links). Die simulierten (Mitte) und gemessenen (rechts) Schallfelder in der x-y-Ebene sind logarithmisch skaliert. Die für den quantitativen Vergleich ausgewählten Linienprofile sind durch die schwarzen Linien im Bild gekennzeichnet.

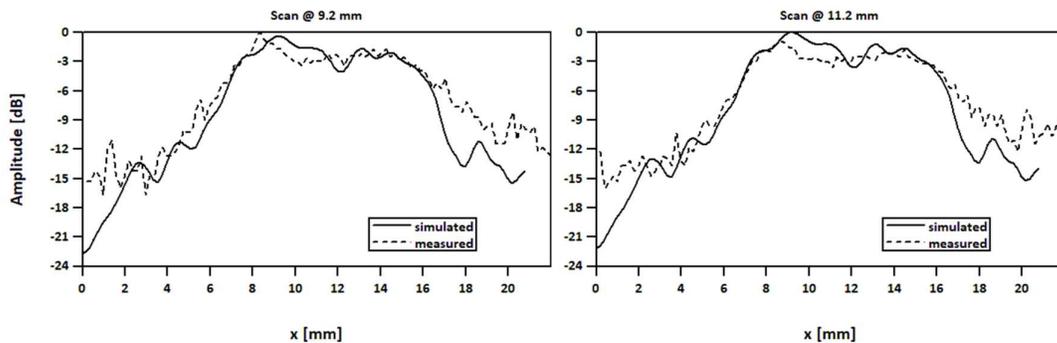


Abb. 6. Fall 1: Simulierte und gemessene Linienprofile bei $y = 9.2$ mm und $y = 11.2$ mm für den quantitativen Vergleich.

2.2.2 Fall 2 – Einschallwinkel 0° , fokussiert auf $z = 60$ mm, Profil bei $z = 60$ mm

Wie im vorhergehenden Fall stimmen die simulierten und die gemessenen Profile quantitativ gut überein (Abb. 7). Für den qualitativen Vergleich wurde das Profil bei der Position $y = 12$ mm im gemessenen Schallfeld ausgewählt (Abb. 8). Für die Auswertung wurden Datenpunkte mit einer Amplitude oberhalb von -12 dB verwendet, die berechnete Performance Number s beträgt in diesem Fall 0.98 dB.

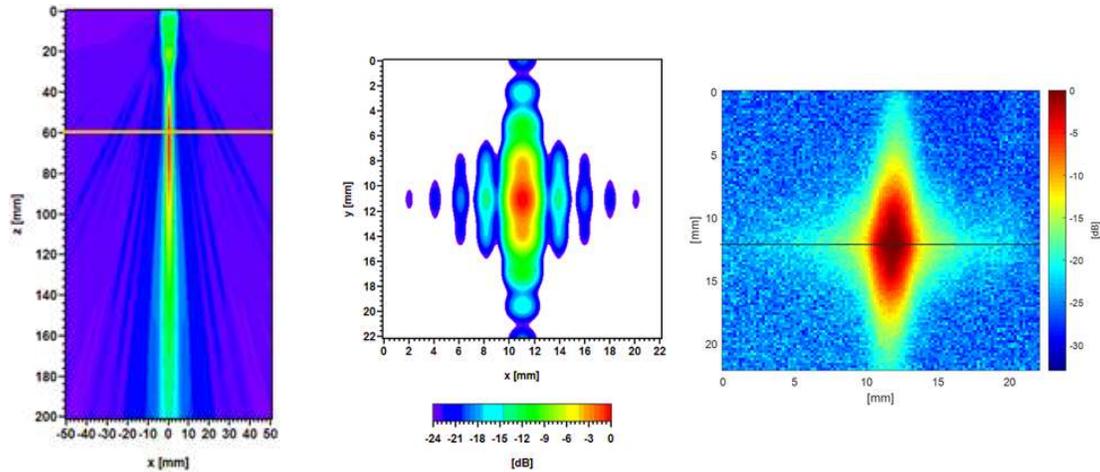


Abb. 7. Fall 2: Simuliertes Schallfeld in Wasser in der x-z-Ebene (lineare Skala, links). Die simulierten (Mitte) und gemessenen (rechts) Schallfelder in der x-y-Ebene sind logarithmisch skaliert. Das für den quantitativen Vergleich ausgewählte Linienprofil ist durch die schwarze Linie im Bild rechts gekennzeichnet.

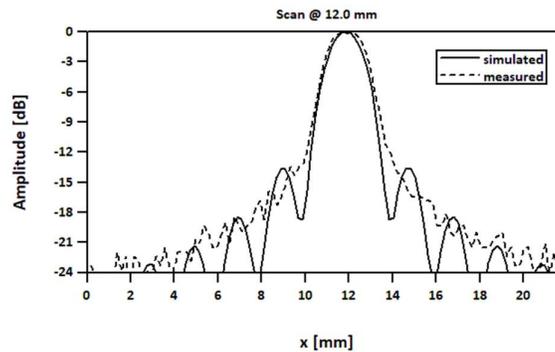


Abb. 8. Fall 2: Simuliertes und gemessenes Linienprofil bei $y = 12$ mm für den quantitativen Vergleich.

2.2.3 Bewertung

Üblicherweise liegt die Reproduzierbarkeit von Ultraschallmessungen im Bereich von 1 bis 2 dB. Aufgrund von vielen Vergleichen in der Vergangenheit kann man die gleiche Übereinstimmung zwischen experimentellen und simulierten Ergebnissen erwarten. Für alle im Rahmen dieser Untersuchung ausgewerteten Schallfeldprofile resultierten Performance-Zahlen von weniger als 2 dB. Wir betrachten dies als ein akzeptables Ergebnis, um die Übereinstimmung von Simulation und Messung zu belegen. Weiterhin sehen wir dies als einen Beleg für die Leistungsfähigkeit des neuen Sensor-Designs im Hinblick auf seine Schallfeldsteuerungs- und -fokussierungseigenschaften.

3. Zusammenfassung

In diesem Beitrag haben wir Ergebnisse weiterer Untersuchungen zu dem für die Pipeline-Inspektion optimierten Phased-Array-Sensor vorgestellt. Dieser stellt die Basis für die Implementierung und den Einsatz verschiedener Prüftechniken dar, deren Leistungsfähigkeit über diejenige von Standard-Prüfmethoden hinausgeht. Der gleichzeitige Einsatz mehrerer dieser Verfahren in einem Inspektionslauf erlaubt es, wesentlich mehr Informationen aus den aufgezeichneten Daten zu extrahieren, insbesondere im Hinblick auf die Detektion, Identifikation und die Größenbestimmung komplexer Fehlermorphologien.

Der stetige Entwicklungsfortschritt im Bereich der Computer-Technologie regt inzwischen sogar dazu an, über den Einsatz von speziell angepassten Phased-Array Imaging-Verfahren nachzudenken, wie beispielsweise das sogenannte Plane Wave Imaging. Entsprechende Untersuchungen und Implementierungen wurden bereits durchgeführt [5] und werden zum gegebenen Zeitpunkt weiter betrachtet werden.

Referenzen

- [1] A. Hugger, et al.; Ultrasonic Phased Array Crack Detection Update; 4th Pipeline Technology Conference 2009
- [2] P.G. Fazzini, J.L. Otegui; Experimental Determination of Stress Corrosion Crack Rates and Service Lives in a Buried E.R.W. Pipeline; International Journal of Pressure Vessels and Piping (2007)
- [3] M. Spies, H. Rieder, I. Lachtchouk, M. Tschuch; Applikationsspezifische Optimierung eines Phased-Array-Sensors am Beispiel der Pipeline-Inspektion; DACH-Jahrestagung 2019, DGZfP-Berichtsband BB 171, ISBN 978-3-947971-02-2 (2019)
- [4] M. Spies; Efficient Optimization of Single and Multiple Element Transducers for the Inspection of Complex-shaped Components; NDT&E International, **37**, 455-459 (2004)
- [5] R.K. Rachev, et al.; Plane Wave Imaging Techniques for Immersion Testing of Components with Nonplanar Surfaces; IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, **67**, 1303-1316 (2020), doi: 10.1109/TUFFC.2020.2969083.