

# Transiente Ultraschall-Simulation mittels Sub-Apertur und Gaussian Beam Equivalent Point Source Modellierung

Martin SPIES<sup>1</sup>, Olaf MÜLLER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Baker Hughes - Process & Pipeline Services, Stutensee

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

**Kurzfassung.** Dieser Beitrag befasst sich mit zwei recheneffizienten Verfahren zur breitbandigen Ultraschall-Simulation. Bei der ‚Sub-Apertur‘ Modellierung wird die Überlagerung von Punktquellen, welche die Basis der Generalisierten Punktquellensynthese (GPSS) darstellt, durch die Überlagerung kleiner Rechteckaperturen ersetzt, um das Verhalten von Rechteckprüfköpfen zu simulieren. Bei der sogenannten ‚Gaussian Beam Equivalent Point Source‘ Methode wird ein Gaußscher Strahl so angepasst, dass er das Verhalten einer Kugelwelle möglichst exakt simuliert. In diesem Beitrag werden die wesentlichen Prinzipien der beiden Methoden vorgestellt und repräsentative breitbandige Schallfeldsimulationen im Vergleich zu GPSS-Ergebnissen und experimentellen Ergebnissen zur Validierung gezeigt.

## Einführung

Die Simulation zerstörungsfreier Prüfverfahren gewinnt zunehmend an Bedeutung für praktische Anwendungen. Dies betrifft verschiedene Aspekte, wie beispielsweise die Prüfkopf-Optimierung, aber auch die virtuelle Abbildung kompletter Prüfprozesse. Auf Basis entsprechender physikalischer Modelle helfen Ultraschall-Simulationsverfahren beim Verständnis komplexer Wellenphänomene, bei der Optimierung von Prüfparametern und bei der Interpretation experimenteller Ergebnisse.

Aus der Vielzahl der verfügbaren Verfahren bieten (halb-)analytische Verfahren den Vorteil effizienter Rechenzeiten bei hinreichender Genauigkeit. Abhängig von der Prüffrequenz und der Komplexität des Prüfzenarios erfordern transiente Simulationen allerdings unter Umständen dennoch lange Rechenzeiten. Daher befasst sich dieser Beitrag mit zwei recheneffizienten Verfahren zur breitbandigen Simulation.

Sub-Apertur Modellierung ersetzt die Überlagerung von Punktquellen, wie beispielsweise bei der bereits vielfach vorgestellten GPSS-Methode [1-3], durch die Überlagerung kleiner Rechteckaperturen, um das Verhalten von Rechteckprüfköpfen zu simulieren. Beim Einsatz der sogenannten ‚Gaussian Beam Equivalent Point Source‘ Modellierung wird ein Gaußscher Strahl so angepasst, dass er das Verhalten einer Kugelwelle möglichst exakt simuliert [4]. Auch hier wird dann ein Superpositionsansatz angewandt, bei beiden Verfahren werden die Fernfeld-Richtwirkungen für Rechteckaperturen genutzt.



In diesem Beitrag werden die wesentlichen Prinzipien dieser Methoden vorgestellt. Es werden repräsentative breitbandige Schallfeldsimulationen im Vergleich zu monochromatisch berechneten Ergebnissen und experimentellen Ergebnissen zur Validierung gezeigt. Die Verfahren werden anhand von Simulationen für verschiedene Fokus- und Steuerungsmodi eines Phased-Array-Sensors veranschaulicht, der im Hinblick auf verschiedene Pipeline-Inspektionsszenarien optimiert wurde [5].

## 1. Theoretischer Hintergrund

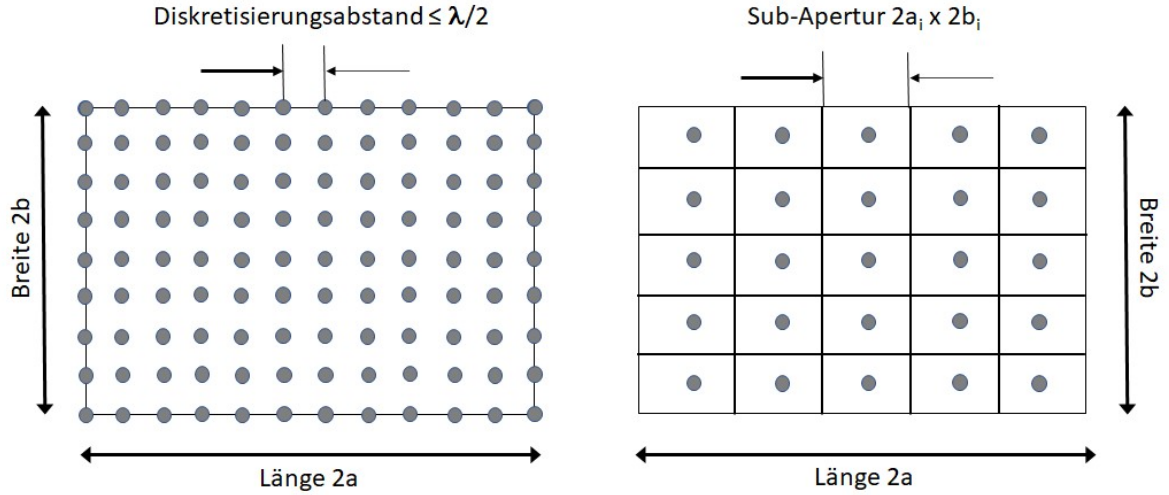
Eine ganze Reihe von analytischen, halb-analytischen und numerischen Verfahren stehen im Bereich der Ultraschallsimulation zur Verfügung. Durch die Anwendung von Näherungslösungen und anschließende Validierung lässt sich die Effektivität semi-analytischer Verfahren zusätzlich steigern. So wurde die Generalisierte Punktquellensynthese (GPSS) für isotrope und anisotrope Medien zur Schallfeldberechnung und Prüfkopfoptimierung [1,2] sowie zur Simulation der Ultraschall-Fehlerprüfung [3] entwickelt. Das Verfahren wurde vielfach im Vergleich zu Experimenten validiert, aussagekräftige Ergebnisse einer solchen Validierung sind z.B. in [3] zu finden.

Den physikalischen Hintergrund dieser Methode bildet das Huygenssche Prinzip: Jeder Punkt einer Wellenfront ist Startpunkt einer Elementarwelle, die neue Wellenfront entsteht durch Überlagerung aller Elementarwellen. Deren Ausbreitungsfunktionen werden abhängig von den jeweiligen physikalischen Randbedingungen mit den entsprechenden Punkttrichtwirkungen versehen. Die verschiedenen physikalischen Prozesse, die mit dem gestellten Prüfproblem verbunden sind, müssen entsprechend modelliert werden. Bei der Schallfeldberechnung sind dies (i) die Abstrahlung der Ultraschallwellen durch Ein- oder Mehrelement-Prüfköpfe unterschiedlicher Geometrien sowie die Ausbreitung der Wellen im jeweiligen Medium und (ii) der Reflexions- und Transmissionsprozess an der Grenzfläche zwischen Vorlaufmedium und Bauteil beim Einsatz von Winkelprüfköpfen oder bei Anwendung der Immersionstechnik.

Die numerische Berechnung der jeweiligen Oberflächenintegrale erfolgt sukzessiv auf der Basis äquidistanter Gitter unter Beachtung des Sampling-Theorems. Die transiente Modellierung von Zeitsignalen erfolgt durch Berechnung der harmonischen Wellenfelder für viele Frequenzen und deren anschließende numerische Fourier-Transformation in den Zeitbereich. Dazu wird eine geeignete Anregungsfunktion zur Charakterisierung des Prüfkopfsignals herangezogen. Alternativ kann die Berechnung auch im Zeitbereich erfolgen, dazu wird eine entsprechende Impuls-Funktion verwendet.

Abbildung 1, links, zeigt schematisch die Zerlegung einer Rechteckapertur in Gitterpunkte, welche die Positionen der anregenden Punktquellen kennzeichnen. In der Regel beträgt der Diskretisierungsabstand weniger als eine halbe Wellenlänge, sodass sich mit steigender Prüfkopffrequenz auch die Anzahl der Gitterpunkte erhöht. Bei der transienten Modellierung steigt die Anzahl der Diskretisierungspunkte – ob im Frequenz- oder im Zeitbereich - ebenfalls mit der Frequenz, sodass sich die Berechnungszeiten entsprechend potenzieren.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Simulationsverfahren zur Schallfeldberechnung basieren auf einer Zerlegung der Rechteckapertur in kleinere Aperturen (Abb. 1, rechts) mit einer entsprechend geringeren Diskretisierungsdichte. Beide Verfahren benötigen wesentlich kürzere Berechnungszeiten im Vergleich zu GPSS und werden nachfolgend beschrieben.



**Abb. 1.** Schematische Darstellung der Zerlegung einer Rechteckapertur zur Schallfeldberechnung mittels GPSS (links) sowie den Verfahren SubAp und GBEPS (rechts). Länge und Breite der Rechteckapertur verlaufen entlang der x- bzw. y-Achse des nachfolgend verwendeten Koordinatensystems.

### 1.1 Abstrahlverhalten eines Rechteckprüfkopfes - Fernfeld-Näherung

Das Verfahren der Sub-Apertur-Modellierung (SubAp) nutzt das Abstrahlverhalten von Rechteckprüfköpfen im Fernfeld. Wird das zugrundeliegende Oberflächenintegral unter Einsatz einer Fernfeld-Näherung gelöst [6], so lässt sich der Betrag des Teilchenverschiebungsvektors im Raumpunkt  $\underline{R}$  darstellen als das Produkt der Ausbreitungscharakteristik einer durch eine Punktquelle angeregten Kugelwelle und der Richtcharakteristik der Rechteckapertur gemäß

$$|\underline{u}(\underline{R}, \omega)| \cong A \frac{\exp(jKR)}{R} \cdot \Gamma(\hat{\underline{R}}) \quad (1)$$

Für einen Rechteckprüfkopf der Länge  $2a$  und der Breite  $2b$  ergeben sich der Amplitudenfaktor  $A$  und die Richtcharakteristik  $\Gamma$  zu

$$\Gamma(\hat{\underline{R}}) = \frac{\sin(aK\hat{x}(\hat{\underline{R}}))}{(aK\hat{x}(\hat{\underline{R}}))} \cdot \frac{\sin(bK\hat{y}(\hat{\underline{R}}))}{(bK\hat{y}(\hat{\underline{R}}))}, \quad A = 4ab \quad (2)$$

$K$  bezeichnet hier die Wellenzahl,  $\hat{x}$  und  $\hat{y}$  ergeben sich aus der Projektion der Raumrichtung  $\hat{\underline{R}}$  auf die x-y-Ebene. Gemäß den Gleichungen (1) und (2) werden die Schallfelder der Sub-Aperturen (Abb. 1, rechts) berechnet, deren Überlagerung ergibt dann das Schallfeld des betrachteten Rechteckprüfkopfes.

### 1.2 Gaussian Beam Equivalent Point Source (GBEPS)

Bei der GBEPS-Methode wird ein Gaußscher Strahl so angepasst, dass er das Verhalten einer durch eine Punktquelle angeregten Kugelwelle

$$|\underline{u}_{PQ}(\underline{R}, \omega)| = \frac{\exp(jKR)}{R}, \quad R = \sqrt{\rho^2 + z^2}, \quad \rho^2 = x^2 + y^2 \quad (3)$$

möglichst exakt simuliert. Als paraxiale Näherung der Bewegungsgleichung beschreibt ein Gaußscher Strahl die Wellenausbreitung in der Nähe der akustischen Achse (hier in z-

Richtung) des Prüfkopfes, d.h. für den Fall, dass  $\rho \ll z$  ist. Somit ergibt sich folgende Näherung für  $R$

$$R = z \sqrt{1 + \frac{\rho^2}{z^2}} \cong z \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{z^2} \right) \quad (4)$$

und damit

$$|\underline{u}_{PQ}(\underline{R}, \omega)| \cong \frac{1}{z} \exp\left(jK \frac{\rho^2}{2z}\right) \exp(jKz) \quad (5)$$

Vergleicht man nun Gleichung (5) mit der Darstellung eines Gaußschen Strahls

$$|\underline{u}_{GB}(\underline{R}, \omega)| = \frac{A(-jK/2B)}{(z - jK/2B)} \exp\left(\frac{jK\rho^2}{2(z - jK/2B)}\right) \exp(jKz) \quad (6)$$

dann folgen aus der Gleichheitsbedingung

$$|\underline{u}_{GB}(\underline{R}, \omega)| = |\underline{u}_{PQ}(\underline{R}, \omega)| \quad \text{if} \quad \left| \frac{K}{2B} \right| \ll z, \quad A(-jK/2B) = 1 \quad (7)$$

die beiden Voraussetzungen, welche die den Strahl charakterisierenden Koeffizienten  $A$  und  $B$  erfüllen müssen. Die Werte

$$A = 10.51 + j 9.11, \quad B = 96.67 - j 111.5 \quad (8)$$

wurden in [4] für Wasser und eine Frequenz von 5 MHz ermittelt. Die Werte für andere Frequenzen lassen sich durch entsprechende Skalierung bestimmen.

Für die GBEPS-Berechnungen werden diese Koeffizienten zur Beschreibung des Gaußschen Strahls und die Richtcharakteristiken gemäß Gleichung (2) verwendet. Wie oben beschrieben werden auch bei dieser Methode die Schallfelder der Sub-Aperturen berechnet und überlagert.

## 2. Schallfeldsimulation und Validierung

### 2.1 Prüfkopf, Messaufbau und Datenauswertung

In [7] wurde bereits über die quantitative Bewertung der Leistungsfähigkeit eines neuen, für die Pipeline-Inspektion optimierten Phased-Array-Sensors berichtet. Zur Validierung wurden Schallfeldmessungen in Wasser durchgeführt. Dazu wurden zweidimensionale Scans in der x-y-Ebene in verschiedenen Abständen zum Sensor mit Hilfe eines kommerziell verfügbaren Messsystems aufgenommen. Die Messungen wurden für eine Reihe unterschiedlicher Steuerungs- und Fokussierungsmodi durchgeführt.

Die gemessenen und die monochromatisch berechneten Schallfeldprofile wurden verglichen und quantitativ bewertet. Für diesen Vergleich wurden Linienprofile aus den zweidimensionalen Schallfelddaten extrahiert. Da die experimentell ermittelten Datensätze aufgrund des Messaufbaus im Vergleich zu den simulierten leicht verschoben sein können, wurden die 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], ist 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] gemäß

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

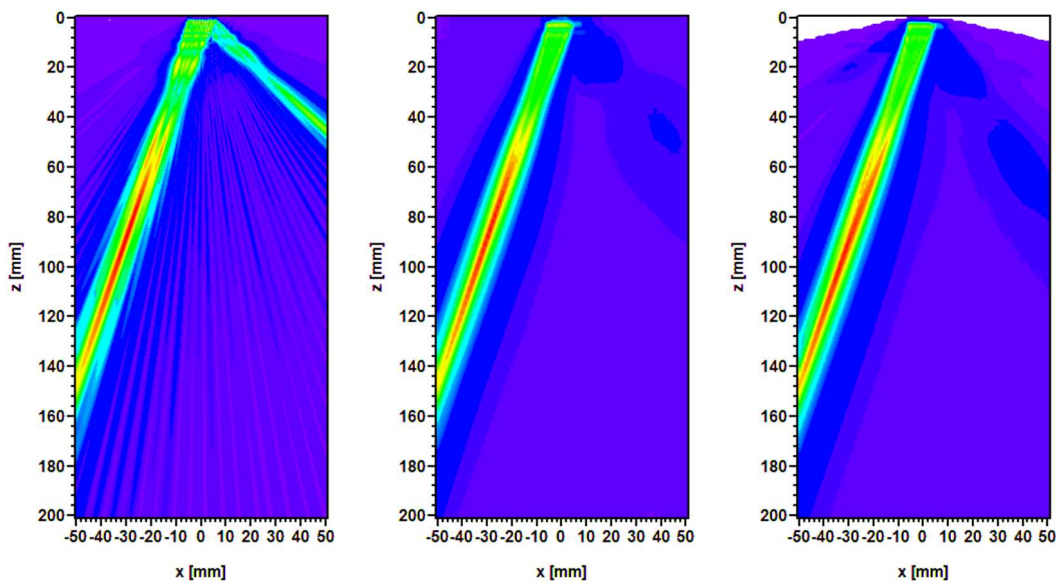
ermittelt. Diese Vorgehensweise wurde im Rahmen dieser Untersuchung auch auf die breitbandig berechneten Schallfeldprofile angewandt.

## 2.2 Ergebnisse

Die Schallfelduntersuchungen in Wasser wurden für eine ganze Reihe von Inspektionsmodi durchgeführt. Aus der Fülle der Ergebnisse zeigen wir zwei repräsentative Fälle für die Schallfeldsteuerung und die Schallfeldfokussierung. Die Ergebnisse werden 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 des Vergleichs der zur quantitativen Bewertung ausgewählten Lateralprofile illustriert.

Jedes Element der virtuellen Apertur des Phased-Array-Sensors wurde wie oben beschrieben in kleine Rechtekaperturen zerlegt und mit den entsprechenden Verzögerungszeiten für die Steuerung bzw. Fokussierung anregt. Für beide Simulationsverfahren wird die gleiche Zerlegung verwendet. Für die breitbandige Simulation wurde die Ausbreitung eines RC3-Impulses im interessierenden Berechnungsgebiet betrachtet. Aus diesen transienten Daten wurden die zugehörigen Prüfkopf-Schallfelder mittels Bestimmung der Maximalamplitude der Teilchenverschiebung an jedem Raumpunkt ermittelt.

### 2.2.1 Fall 1 – Einschallwinkel 19°, unfokussiert, Profil bei z = 28 mm

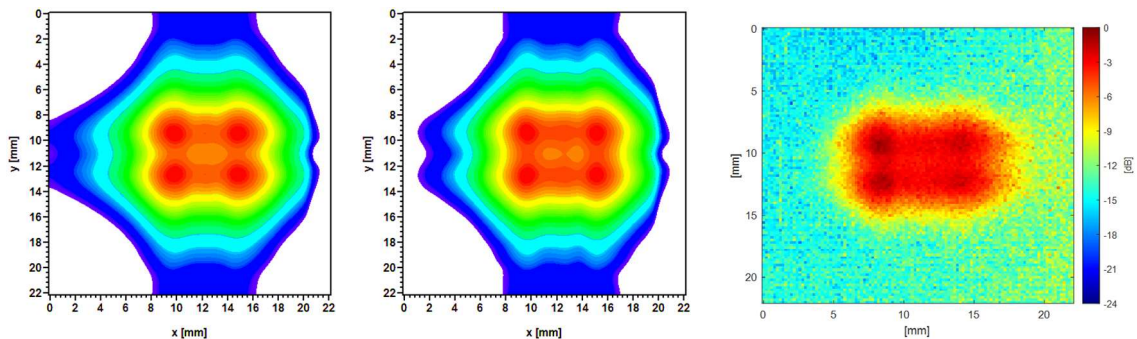


**Abb. 2.** Fall 1: Simulierte Schallfelder in Wasser in der x-z-Ebene (lineare Skala): links GPSS monochromatisch, Mitte SubAp, rechts GBEPS.

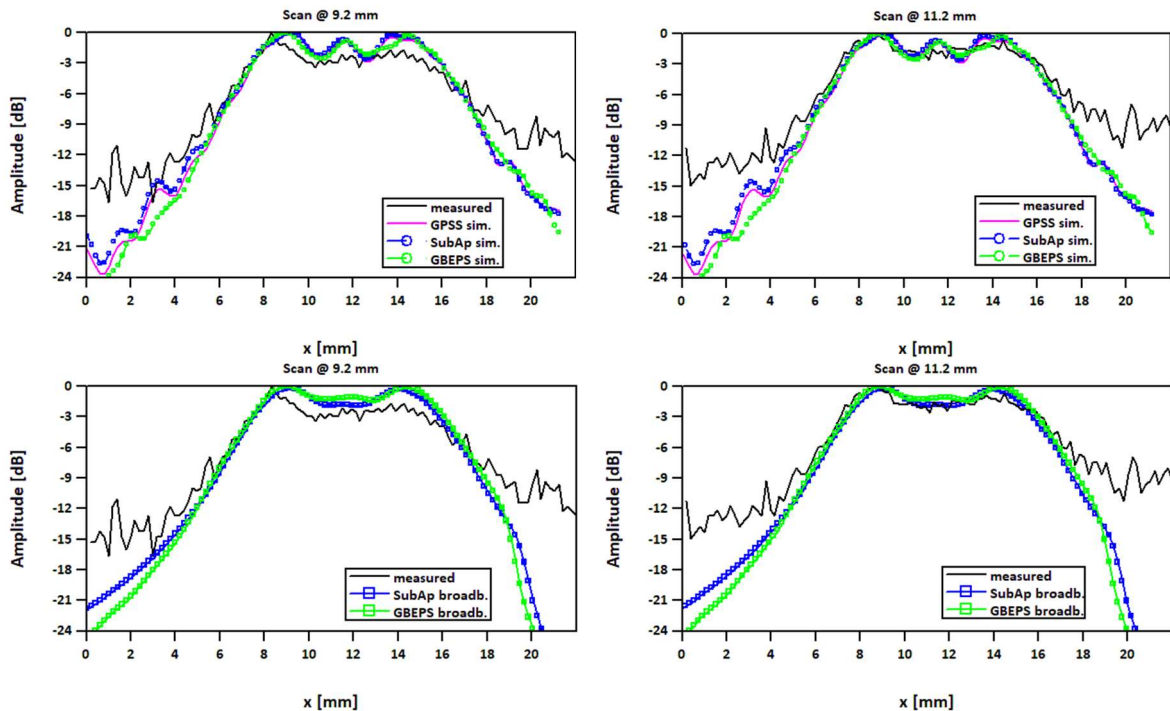


Der Einschallwinkel von  $19^\circ$  in Wasser generiert eine Transversalwelle von  $45^\circ$  im Stahl und wurde daher als Beispiel ausgewählt. Abbildung 2 zeigt zunächst die Schallfelder in der x-z-Ebene im Vergleich. Die monochromatische GPSS-Simulation zeigt die Ausbildung einer Nebenkeule höherer Ordnung, ein Interferenzphänomen das aufgrund der RC3-Impulsanregung bei den transient berechneten Schallfeldern erwartungsgemäß eine nur noch geringe Amplitude aufweist.

Die x-y-Plots in Abb. 3 sind logarithmisch skaliert und zeigen qualitativ übereinstimmende Merkmale. Für den quantitativen Vergleich wurden Linienprofile aus den 2D-Plots ausgewählt, die durch die Maxima der Plots verlaufen (Abb. 4). 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. Für den Vergleich wurden die Lateralprofile an den y-Positionen 9.2 mm und 11.2 mm (Abb. 4) verwendet, die ermittelten Werte für die Performance Number betragen 1.97 dB und 1.75 dB und sind vergleichbar mit Werten, die für die monochromatisch berechneten Profile ermittelt wurden [7].



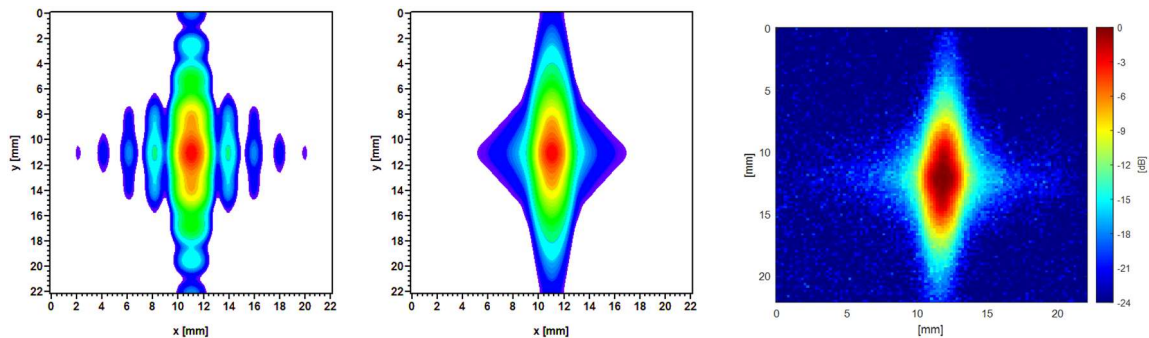
**Abb. 3.** Fall 1: Mittels SubAp (links) und GBEPS (Mitte) simulierte Schallfelder im Vergleich zum gemessenen (rechts) Schallfeld in der x-y-Ebene (logarithmisch skaliert, 0 bis -24 dB). Für den quantitativen Vergleich wurden die durch die Maximalamplituden verlaufenden Linienprofile ausgewählt.



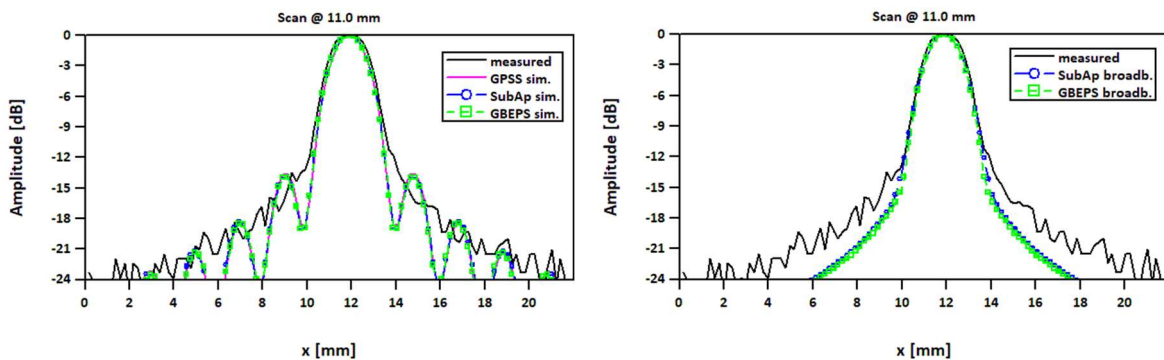
**Abb. 4.** Fall 1: Simulierte und gemessene Linienprofile bei  $y = 9.2$  mm und  $y = 11.2$  mm: monochromatisch (oben) und breitbandig (unten) berechnete Profile im Vergleich zu den gemessenen.

### 2.2.2 Fall 2 – Einschallwinkel $0^\circ$ , fokussiert auf $z = 60$ mm, Profil bei $z = 60$ mm

Wie im vorhergehenden Fall stimmen die simulierten und die gemessenen Profile qualitativ gut überein (Abb. 5). Analog zur Grating Lobe im Fall 1 weist das monochromatisch berechnete Profil eine ausgeprägte, interferenzbedingte Nebenkeulenstruktur auf, die sich bei Impulsanregung nicht mehr ausbildet. Für den quantitativen Vergleich wurde das Profil bei der Position  $y = 11$  mm im gemessenen Schallfeld ausgewählt (Abb. 6). Für die Auswertung wurden Datenpunkte mit einer Amplitude oberhalb von  $-12$  dB verwendet, die berechnete Performance Number beträgt in diesem Fall  $0.96$  dB.



**Abb. 5.** Fall 2: Monochromatisch (links) und breitbandig (Mitte) berechnete Schallfelder in der x-y-Ebene im Vergleich zur Messung (rechts). Die Plots sind logarithmisch skaliert von 0 bis  $-24$  dB.



**Abb. 6.** Fall 2: Simulierte und gemessene Linienprofile bei  $y = 11.0$  mm: monochromatisch (links) und breitbandig (rechts) berechnete Profile im Vergleich zu dem gemessenen.

### 2.2.3 Bewertung

Die Reproduzierbarkeit von Ultraschallmessungen liegt in der Regel 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. Die ermittelten Werte sind ähnlich zu denen, die für die monochromatisch berechneten Schallfeldprofile ermittelt wurden [5]. Im Hinblick auf die Betrachtung von Phased-Array-Sensoren besteht ein wesentlicher Vorteil der breitbandigen Simulation in der dadurch ermöglichten Bewertung des Einflusses von Nebenkeulen höherer Ordnung auf die jeweilige Prüfanwendung.

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden zwei Verfahren zur transienten Ultraschall-Simulation vorgestellt und anhand experimenteller Ergebnisse validiert. Beide Verfahren zeichnen sich durch einen erheblichen Rechenzeitvorteil gegenüber der GPSS-Methode aus. Während bei der letzteren ein Element des hier betrachteten Array-Prüfkopfes mit mehr als 300 Punktquellen ‚belegt‘ wurde, reichte bei den Verfahren SubAp und GBEPS eine Zerlegung eines Elements in 10 Rechteckaperturen aus. Wie die in Abb. 6 dargestellten monochromatisch berechneten Profile zeigen, liefern die beiden Verfahren im Vergleich zu GPSS identische Ergebnisse, allerdings bei einer etwa um den Faktor 30 geringeren Rechenzeit.

Mit Blick auf die Prüfung von Bauteilen mittels Immersionstechnik und die Berechnung von Schallfeldern im Prüfobjekt muss untersucht werden, inwieweit die Sub-Aperture-Methode ein geeignetes Verfahren darstellt. Insbesondere müssen der Gültigkeitsbereich der Methode und die Genauigkeit der zu erzielenden Ergebnisse betrachtet werden. Das GBEPS-Verfahren bietet dagegen die Möglichkeit, die Ultraschallausbreitung im Bauteil unter Nutzung analytischer Formulierungen zu simulieren [4]. Allerdings muss beachtet werden, dass dieses Verfahren auf einer paraxialen Näherung basiert und damit ebenfalls gewissen Einschränkungen unterliegt.

### Referenzen

- [1] M. Spies. Modeling Transient Radiation of Ultrasonic Transducers in Anisotropic Materials Including Wave Attenuation. in: Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 21, Melville, New York, American Institute of Physics (AIP Conference Proceedings CP509), 807-814 (2002)
- [2] M. Spies. Efficient Optimization of Single and Multiple Element Transducers for the Inspection of Complex-Shaped Components. NDT&E International, **37**, 455-459 (2004)
- [3] M. Spies. Validierung semi-analytischer Simulation der Fehlerprüfung an ebenen und gekrümmten Bauteilen anhand des internationalen UT Benchmarks 2007. DGZfP Berichtsband 113-CD DACH-Jahrestagung (2008), P35
- [4] L.W. Schmerr, R. Huang, A. Sedov; The Simulation of Ultrasonic Beams with a Gaussian Beam Equivalent Point Source Model; Chinese Journal of Acoustics, **29**, 97-106 (2010)
- [5] 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)
- [6] H. Stenzel, O. Brosze; Leitfaden zur Berechnung von Schallvorgängen; Neuauflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-662-12261-7 (2013)
- [7] M. Spies, O. Müller, I. Lachtchouk, M. Tschuch; Untersuchung und quantitative Bewertung der Leistungsfähigkeit eines neuen Phased-Array-Sensors für die Pipeline-Inspektion; DGZfP-Jahrestagung 2021, DGZfP-Berichtsband BB 176, ISBN 978-3-947971-18-3 (2021)