

# Simulation und Validierung eines optimierten Phased-Array-Verfahrens zur Querfehlerprüfung von SAWL-Schweißnähten in ferritischen Rohren

Thomas ORTH\*, Till SCHMITTE\*,  
Martin SPIES\*\*, Hans RIEDER\*\*, Thomas KERSTING\*\*\*

\* Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (Ehinger Str. 200, 47259 Duisburg)

\*\* Fraunhofer Institut ITWM (Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern)

\*\*\* Europipe GmbH (Pilgerstr. 2, 45473 Mülheim an der Ruhr)

**Kurzfassung.** Bei der Querfehlerprüfung von Unterpulver-Längsnahtgeschweißten (SAWL) Großrohren „reiten“ konventionelle Prüfköpfe auf der Naht. Die durch die gekrümmte Oberfläche der Nahtüberhöhung bedingte Schallfeld-Defokussierung führt zu einem Empfindlichkeitsverlauf quer zur Naht mit starken Variationen, die nicht wünschenswert sind. Eine Homogenisierung und damit Verbesserung der Querempfindlichkeit kann über einen 2D-Phased-Array Matrix-Ansatz erzielt werden. In diesem Beitrag wird über die Optimierung einer solch leistungsfähigen, aber auch komplexen Prüftechnik auf der Basis von Schallfeldberechnungen bis zum halben Sprung und der Empfindlichkeitsverteilungen in der 45°-Einschallebene quer zur Schweißnaht berichtet. Die Simulationen wurden mittels Generalisierter Punktquellensynthese (GPSS) unter Berücksichtigung der jeweiligen Fokusgesetze durchgeführt. Die Validierung erfolgte an Durchgangsbohrungen mit einem Durchmesser von 1.6 mm, die zentrisch in die Schweißnaht, im Übergangsbereich sowie äquidistant dazwischen eingebracht wurden.

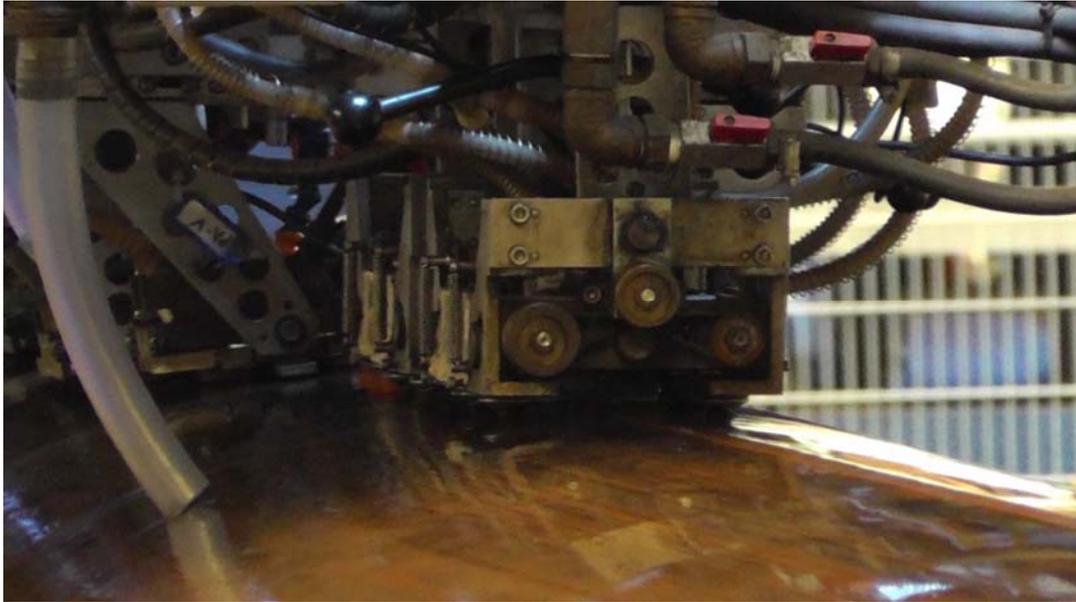
## 1. Einleitung

Für die Querfehlerprüfung bei der automatisierten Ultraschallprüfung von längsnahtgeschweißten Großrohren bei EUROPIPE werden konventionelle 4 MHz Tauchtechnikprüfköpfe mit Rechteckschwingern eingesetzt. Die Senkrechtprüfköpfe werden unter einem Einfallwinkel von ca. 19° für die 45°-Winkelschallung von Transversalwellen betrieben und "reiten" mit der Mechanik auf der Naht („riding on bead“, Abbildung 1). Dieses Verfahren der Anschallung ist in der Großrohrprüfung, neben der sogenannten X- oder K-Anordnung, relativ weit verbreitet. Die Ankopplung erfolgt bei Europipe mittels Wasserdüsen-Technik, d.h. der Prüfkopf wird ständig von einer quasi stehenden Wassersäule mit einer typischen Länge von ca. 15 mm unterspült. Der Prüfkopf selbst ist zentrisch zur Schweißnaht positioniert und ist so ausgewählt, dass möglichst das gesamte Schweißnahtvolumen durchschallt wird (Rechteckschwinger 4 MHz, 20 x 10 mm<sup>2</sup>) [1].

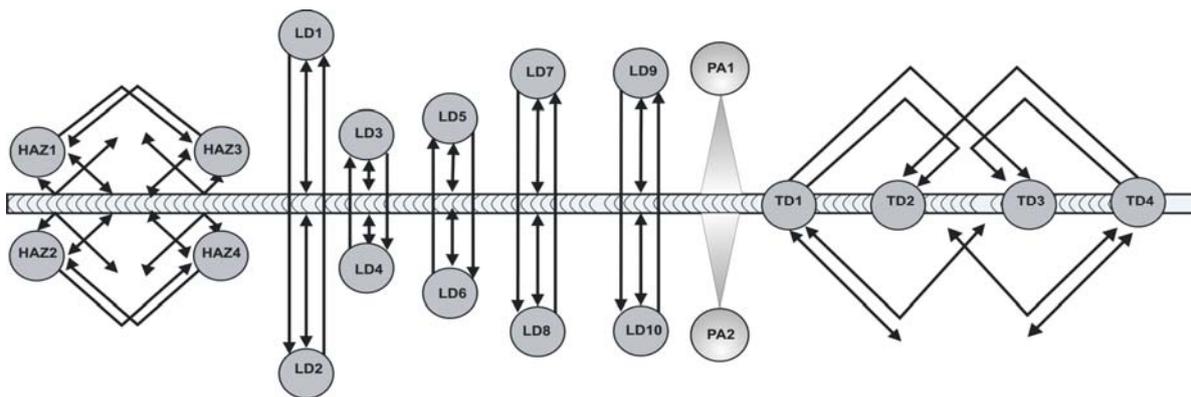
## 2. Problemstellung

Die Schweißnähte weisen, abhängig von der Wanddicke des Rohres, eine mehr oder minder ausgeprägte Schweißnahtüberhöhung an der Außen- und Innenseite des Rohres auf. Die





**Abbildung 1:** Querfehlerwagen bei der UP-Schweißnahtprüfung in der „riding on bead“-Anordnung



**Abbildung 2:** Anordnung der Prüfebenen für die Europipe-SAWL-Schweißnahtprüfung mit der Prüfung der Wärmeeinflusszone (linke Gruppe, HAZ1-HAZ4), der Längsfehler (mittlere Gruppe, LD1-LD10) und der Querfehler (rechte Gruppe, TD1-TD4) [1].

durch die gekrümmte Oberfläche bedingte Defokussierung des Schallfeldes beim Schalleintritt an der Grenzfläche Wasser/Stahl hat Konsequenzen für den Empfindlichkeitsverlauf der Querfehlerprüfung quer zur Nahtachse. Abbildung 3 zeigt die Problematik schematisch für einen der 4 Querfehlerprüfköpfe. Die Konsequenz des resultierenden Schallfeldes auf den Empfindlichkeitsverlauf quer zur Naht lässt sich anschaulich mit dem Testfehlertyp Durchgangsbohrung (TDH) 1.6 mm aufzeigen. Zu diesem Zweck wurde ein Segment aus einem Produktionsrohr der Abmessung 1066 mm x 29.6 mm herausgetrennt und in die Schweißnaht Durchgangsbohrungen 1.6 mm zentrisch und jeweils 4 mm weiter nach außen versetzt eingebracht (Abb. 4). Wertet man einen Schweißnahtscan für die Fehleramplituden im halben, ganzen und 1.5fachen Sprung aus, so erhält man das in Abbildung 5 dargestellte Ergebnis, das eine starke Empfindlichkeitsvariation quer zur Naht zeigt. Während für den halben Sprung, also bei direkter Anschallung des Bohrungsfußpunktes die um 8 mm aus dem Zentrum versetzte Durchgangsbohrung mit erhöhter Empfindlichkeit nachgewiesen wird, fallen die Kurven für den ganzen und 1.5fachen Sprung monoton mit zunehmender

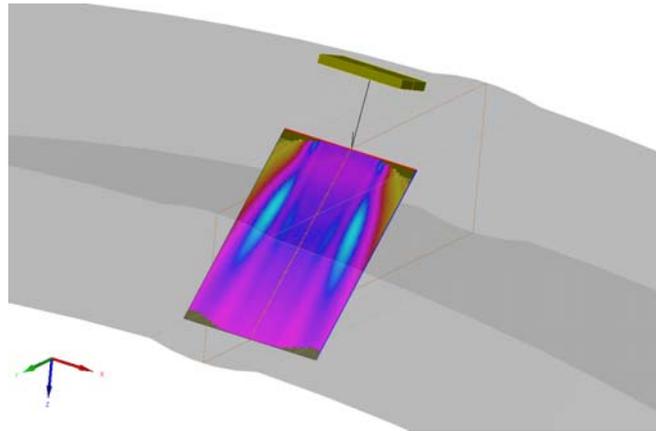


Abbildung 3: Verhältnisse bei der Querfehlerprüfung mit einem konventionellen Rechteckschwinger.

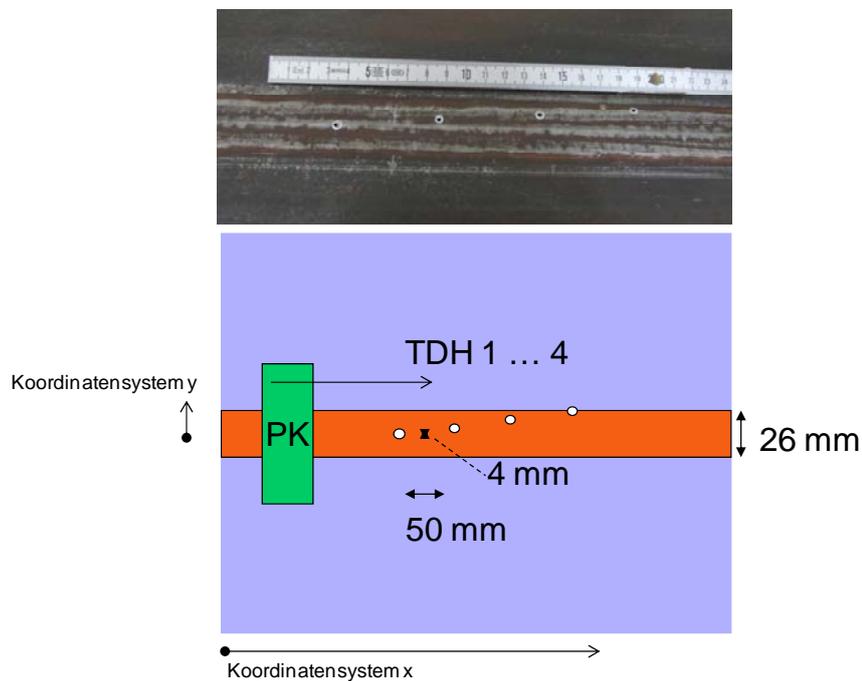


Abbildung 4: Probe mit einer realen Schweißnaht, welche mit einer Serie von azentrisch versetzten 1.6 mm Durchgangsbohrungen (TDH 1..4) versehen wurde.

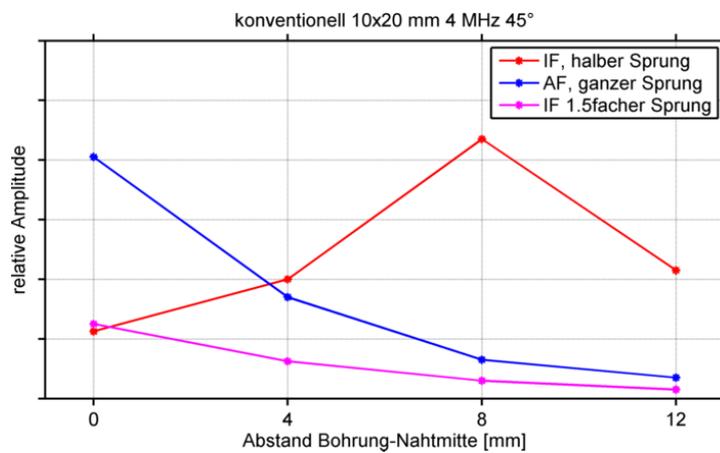
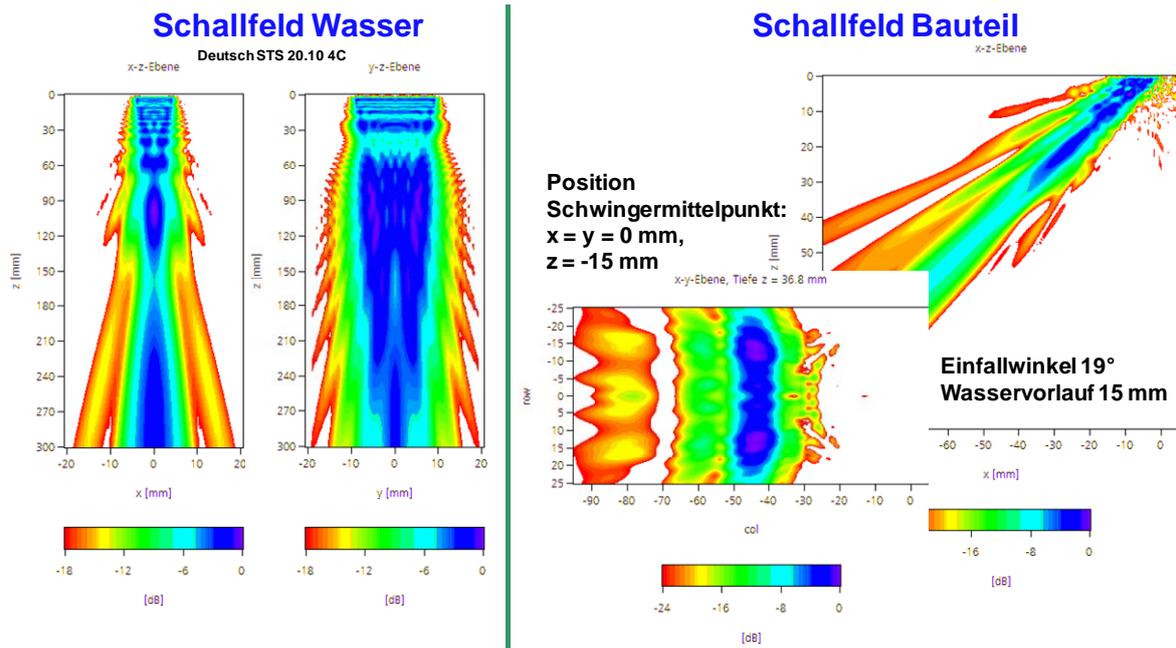


Abbildung 5: Empfindlichkeitsverlauf für den Nachweis der versetzten Durchgangsbohrungen in verschiedenen Sprungabständen für einen Schweißnahtscan aus Abbildung 4.

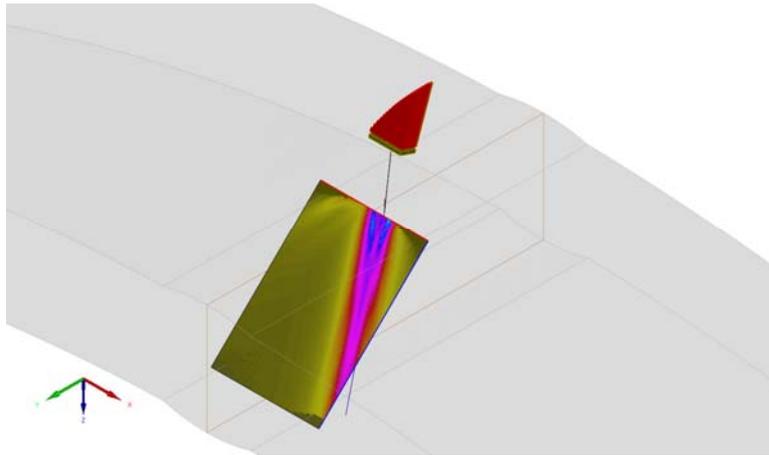


**Abbildung 6:** GPSS-Simulation für das Schallfeld des verwendeten Querfehlerprüfkopfes im Wasser (links) und im Bauteil (rechts).

Außenlage ab. Dieser Umstand lässt sich direkt mit dem in Abbildung 6 gezeigten Schallfeldverlauf des eingesetzten Prüfkopfes erläutern. Das Simulationsergebnis für das Schallfeld im Wasser offenbart, dass eine Ankopplung bei 15 mm Wasservorlaufstrecke deutlich im Nahfeld des Prüfkopfes erfolgt, sodass sich die komplexe Schallfeldstruktur in das Bauteil überträgt und durch die defokussierende Wirkung der Schweißnahtüberhöhung weiter verstärkt wird. Das Schallfeld im Stahl ist im rechten Teil von Abbildung 6 dargestellt. Die Draufsicht auf die Schalldruckverteilung in 15 mm Tiefe im Stahl offenbart zwei symmetrische Empfindlichkeitsmaxima, die zum Nahtzentrum versetzt sind. Dies verursacht den besseren Nachweis der um 8 mm versetzten Durchgangsbohrung. Danach erfolgen die Reflexionen in der Schweißnahtwurzel und folgend in der Schweißnahtüberhöhung mit einer jeweils fokussierenden Wirkung. Dies erklärt die starke Abnahme der Empfindlichkeitskurven in Abbildung 5 für die größeren Sprungabstände. Die Schallausbreitung wird immer weiter in die Schweißnahtmitte gezwungen. Versuche, diesen Effekt durch eine Vorsatzlinse zu minimieren, bringen nur einen bedingten Erfolg.

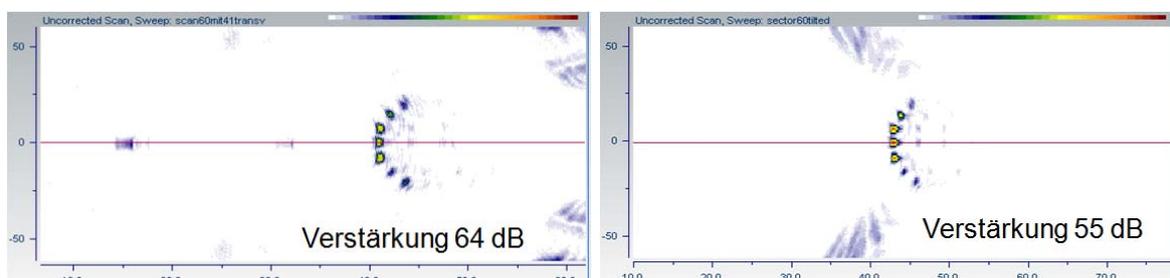
### 3. Applikationsmöglichkeiten eines 2D-Matrixarrays

Die vorab beschriebene Prüftechnik lässt sich hinsichtlich der Prüfempfindlichkeit quer zur Naht nur begrenzt optimieren, da sowohl die Wahl der Wasservorlaufstrecke, als auch die Schwingergöße und Frequenz nur sehr begrenzt variierbar sind. Eine Alternative zu der konventionellen Technik bieten kommerziell verfügbare Matrix-Phased-Arrays. Deren zweidimensionale Strukturierung erlaubt ein zusätzliches, gezieltes ‚Schielen‘ des Prüfkopfes kombiniert mit einer Fokussierung nach beiden Seiten und damit die grundsätzliche Möglichkeit, eine weitere Homogenisierung der Empfindlichkeitsverteilung quer zur Naht zu erzielen.

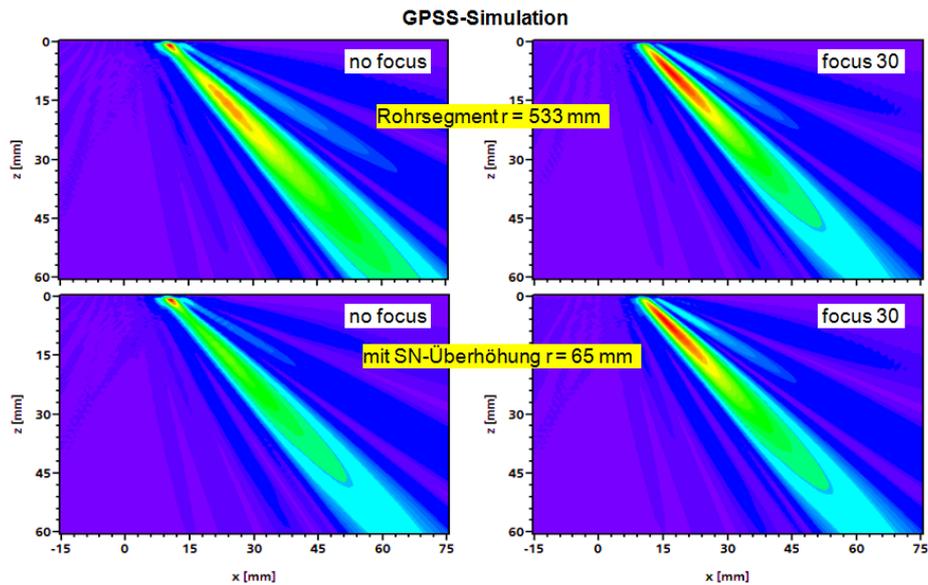


**Abbildung 7:** Anwendungsmöglichkeit eines 2D-Matrixarrays mit einem kombinierten Schwenken und Fokussieren des Schallstrahls quer zu Naht.

Für die Experimente stand ein 2D-Matrix-Array mit 16x16 Elementen und einem isotropen Pitch von 0.6 mm bei 5 MHz zur Verfügung. Von diesem Array wurde ein Subarray von 16x8 Elementen genutzt, welches final für die 45°-Transversalwelleneinschallung über Snellius im Wasser um ca. 19° angestellt wurde. Die 16 Elemente wurden quer zur Naht ausgerichtet, sodass auf diese Weise alle 128 Elemente zum Schwenken und Fokussieren genutzt werden konnten. Bei der Phased-Array Elektronik handelt es sich um ein PeakNDT Micropulse 5PA, welches über 128 Parallelkanäle verfügt, die bis zu einer Pulswiederholrate von 20 kHz angesteuert werden können. Für einen ersten Test wurden in das Ausgangs-Grobblech von 29.6 mm Wanddicke 7 Durchgangsbohrungen (Ø 1.6 mm) in einer Linie mit einem Abstand von 7 mm eingebracht. Die 45°-Winkelschallung wurde sowohl elektronisch über die 8 senkrecht zur Bohrungskette liegenden Elemente, als auch mechanisch über Snellius realisiert und die Fußpunkte der Bohrungen direkt angeschallt. Abbildung 8 zeigt für beide Fälle den unkorrigierten Sektorscan von -60° bis +60°. Die 7 Bohrungen können eindeutig, wenngleich mit einer für große Schwenkwinkel abfallenden Empfindlichkeit zu den Außenbohrungen hin, nachgewiesen werden. Die Ergebnisse für die elektronische und die über mechanische Anstellung realisierte Winkelschallung unterscheiden sich im Wesentlichen nur in einer höheren Amplitude für die Snellius-Einschallung. Dieses Ergebnis bildet die Grundlage für die Messungen an der realen Schweißnahtrohrprobe gleicher Wanddicke.



**Abbildung 8:** Unkorrigierte Sektorscans (-60°, +60°) für die direkte 45° Transversalwellen-Anschallung der 7 Durchgangsbohrungen im Grobblech (Wanddicke 29.6 mm) mit einer elektronischen Winkelschallung (links) und einer mechanischen Winkelschallung (rechts). Die Wasservorlaufstrecke betrug 30 mm in Immersionstechnik und für die Delay-Laws wurde eine Fokussierung von 40 mm gewählt.



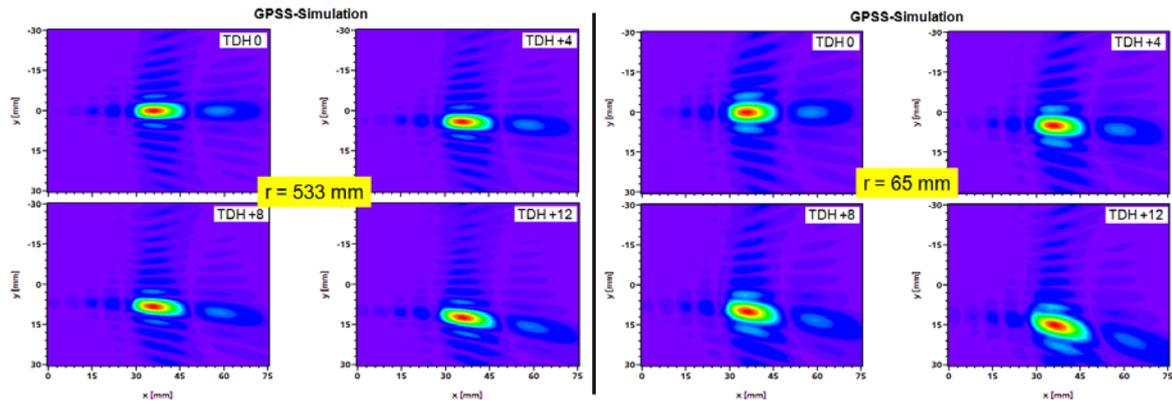
**Abbildung 9:** GPSS-Simulation des Schallfeldes im Schweißnahtzentrum, berechnet für die Oberflächenkrümmungen des Rohres und der Schweißnahtüberhöhung, mit und ohne Fokussierung (lineare Darstellung).

#### 4. GPSS-Simulation der Schallfelder

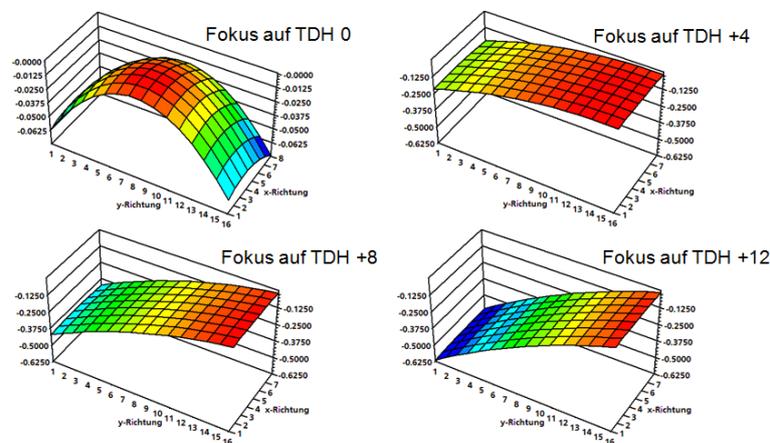
Zum effektiven Einsatz des 2D-Matrix-Array für die Querfehlerprüfung muss theoretisch analysiert werden, inwieweit eine Homogenisierung der Querempfindlichkeit unter Berücksichtigung der Rohr- und Schweißnahtkrümmungen überhaupt möglich ist. Zu diesem Zweck wurden am Fraunhofer ITWM Simulationen mittels Generalisierter Punktquellensynthese (GPSS) durchgeführt. Dieses in [2,3] detailliert beschriebene Verfahren erlaubt, im Gegensatz zu kommerziell erhältlichen Softwarepaketen, eigene Optimierungsalgorithmen anzukoppeln.

Abbildung 9 zeigt die Schallfeldsimulationen unter Berücksichtigung der Krümmung der Rohroberfläche bzw. der Schweißnahtüberhöhung. Im letzten Fall wurde ein Kreissegment mit einem Radius von 65 mm und einer Kreissegmenthöhe über Rohroberfläche von 2 mm angenommen. Der dargestellte Auswertebereich liegt zentrisch in der Schweißnaht mit der Auswertebene parallel zur Rohrachse. Betrachtet man die beiden Ergebnisse in Abbildung 9, links, so erkennt man, dass durch die Krümmung der Schweißnahtüberhöhung auch hier die defokussierende Wirkung beim Schalleintritt zu einem Verlust der Schallenergie in der Auswertebene führt. Anders als im konventionellen Fall können aber jetzt die 16 Elemente (senkrecht zur x-z-Ebene) des Array-Prüfkopfes zur Fokussierung (hier 30 mm) genutzt werden, um diesen Verlust wieder auszugleichen (Abb. 9, rechts). Dies funktioniert für beide Oberflächenkrümmungen gleichermaßen.

Mit diesem Ansatz wurden für beide Rohrkrümmungen weitere GPSS-Berechnungen durchgeführt. Dabei wurde über einen Optimierungsalgorithmus der Fokus auf den Winkelspiegel der Bohrungsfußpunkte maximiert. Die resultierenden Energieverteilungen an der Rohrrückwand (Abb. 10) zeigen, dass die gleiche Nachweisempfindlichkeit für alle Bohrungen erzielt werden kann. Diese Aussage gilt für die Rohrkrümmung (links), als auch für die Krümmung der Schweißnahtüberhöhung, hier mit einer Einbuße in der Amplitude von lediglich 1 dB. Die nachfolgende Abbildung 11 zeigt die resultierenden Delay-Gesetze für alle Bohrungen. Es ist klar zu erkennen, wie neben dem Schwenken des Winkels alle Elemente des 2D-Arrays zum Fokussieren benutzt werden; die Elemente in Nahtachse allerdings deutlich schwächer als quer zur Naht.



**Abbildung 10:** GPSS-Simulation der Energieverteilungen bei Fokussierung auf den Fußpunkt der versetzten Durchgangsbohrungen, vergleichend berechnet für beide Oberflächenkrümmungen.



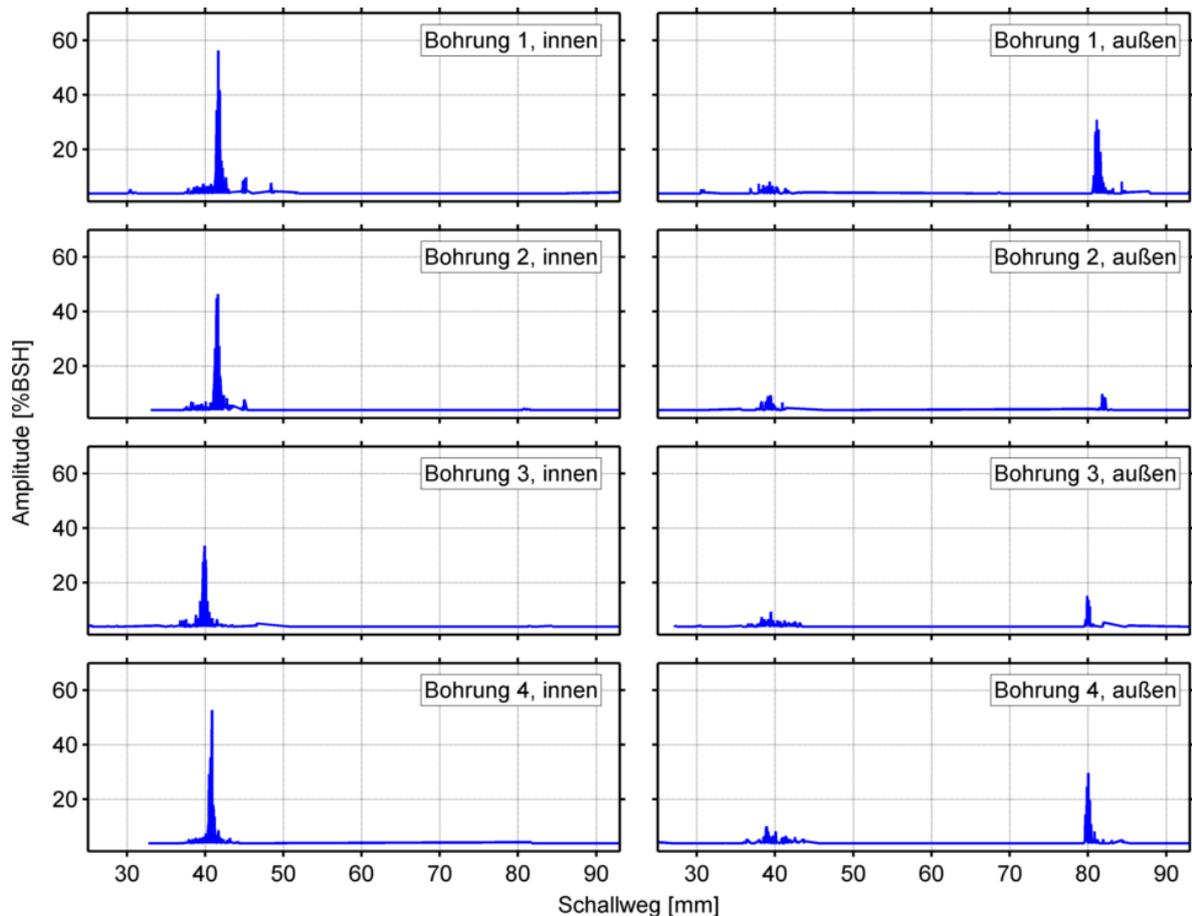
**Abbildung 11:** Delay-Laws bei Maximierung des Winkelspiegeleffektes für alle versetzten Bohrungen (man beachte die um den Faktor 10 geringere Zeitskala bei TDH 0). Die Werte stimmen quantitativ sehr gut mit denen der geräteeigenen Software des Micropulse-Gerätes überein.

## 5. Messungen an einer realen Schweißnahtprobe mit einem 2D-Matrixarray

Mit den aus den Simulationsergebnissen abgeleiteten Phased-Array Einstellparametern wurde die reale Probe aus Abbildung 4 mit dem um  $19^\circ$  angestellten 2D-Matrix-Subarray abgescannt. Aus den unkorrigierten Sektorscans wurden spaltenweise Echodynamiken (Momentaufnahmen) für den halben und ganzen Sprung gebildet, die nachfolgend dargestellt sind. Durch den Schwenk/Fokus-Modus des 2D-Arrays können selbst die an der Nahtflanke eingebrachten Bohrungen bis zum ganzen Sprung mit hoher Empfindlichkeit nachgewiesen werden. Die Empfindlichkeitsvariationen wurden deutlich minimiert. Abweichungen (Bohrung 2 und 3, ganzer Sprung) können durch die Geometrievariationen der realen Schweißnaht erklärt werden.

## 6. Zusammenfassung

Die mit dem 2D-Matrix-Array erzielten Ergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung der Querempfindlichkeit gegenüber der konventionellen Technik mit einem angestellten Normalprüfkopf. Es hat sich gezeigt, dass zur erfolgreichen Konfigurierung solch anspruchsvoller Prüfverfahren der Einsatz geeigneter Simulationsverfahren unerlässlich ist.



**Abbildung 12:** Über den Sektorscan integrierte Echodynamikkurven bei Nachweis der Bohrungen im halben (links) und ganzen (rechts) Sprung bei Einsatz eines 2D-Matrixarrays. Für die Lage der Bohrungen (TDH) vergleiche Abbildung 4.

In der Regel sind hierfür umfangreiche Simulationen der Fehlersignale notwendig. Die in diesem Beitrag betrachtete Aufgabenstellung konnte dagegen bereits durch die Berechnung und Optimierung der Prüfkopf-Schallfelder erfolgreich gelöst werden. Der 2D-Matrixansatz ist deutlich flexibler zur Anpassung an unterschiedliche Schweißnaht- und Bauteilgeometrien. Die Ergebnisse legen eine mögliche Reduzierung auf eine 1D-Phased-Array Technik nahe, sodass höhere Kosten für die Elektronik und Prüfköpfe im Rahmen gehalten werden können. Eine Betriebsanwendung wäre voraussichtlich eine Kombination aus den hier vorgestellten Sektor/Fokus-Scans und einem elektronischen Scannen quer zur Naht, um auch rissartige Fehler verlässlich nachzuweisen. Offen ist die Frage nach der zu realisierenden Prüfgeschwindigkeit, da typischerweise eine Prüfgeschwindigkeit von etwa 0.7 m/s bei einer Auflösung von 1 mm in Längsrichtung betrieblich gefordert wird. Dieser Thematik muss mit weitergehenden Untersuchungen nachgegangen werden.

## Referenzen

- [1] T. Kersting, S. Schuster, L. Oesterlein, K. Fliescher, F. Kahmann, Gerhard Finger: „Praktische Erfahrungen mit der Phased Array Prüftechnik an Großrohren bei der automatischen Ultraschall Schweißnahtprüfung bei EUROPIPE“, DGZfP Jahrestagung (2011), Bremen.
- [2] M. Spies: „Semi-analytical elastic wave-field modeling applied to arbitrarily oriented orthotropic media“, *Journal of the Acoustic Society of America.*, **110** (1), pp 68-79 (2001) .
- [3] M. Spies: „Efficient optimization of single and multiple element transducers for the inspection of complex-shaped components“, *NDT&E international*, 37, pp 455-459 (2004).