

# Bildgebende Ultraschallprüfung in Prüfanlagen und manuellen Anwendungen

Michael BERKE, Johannes BÜCHLER, GE Inspection Technologies, Hürth

**Kurzfassung:** Ausgehend vom erfolgreichen Einsatz der Gruppenstrahlertechnik in automatischen Prüfanlagen findet man heute mehr und mehr Anwendungen auch bei der manuellen Prüfung. Die Miniaturisierung in der Elektronik, sowie die hohe Geschwindigkeit in der Datenverarbeitung erlaubt heute den Bau kompakter, batteriebetriebener Ultraschallprüfgeräte für bildgebende Darstellungen. Die Vorteile der „Phased Array“ Technologie liegen auf der Hand:

- Darstellung des vom Prüfkopf abgetasteten Bereiches in Echtzeit
- B- und C-Bild in Kombination mit einem Wegaufnehmer
- Leichtverständliche Prüfbefunde, auch für Nicht-Fachleute
- Die Bildgebung bietet eine direkte Bestimmung der Reflektorlage und Ausdehnung, sogar „offline“ aus den gespeicherten A-Bildern

Anwendungen und deren Ergebnisse aus der automatischen und der manuellen Prüfung mit dem Phasor XS der Firma GE Inspection Technologies werden beschrieben und mit der konventionellen Prüftechnik verglichen.

## Einführung

Die Ultraschallprüfung ist ca. 55 Jahre alt, und bis heute ist die Auswertung des A-Bildes (Echoamplitude als Funktion des Abstandes) die Grundlage für Fehlerauswertung und alle weiteren Analysen bis zur Bildgebung. Das gilt auch für die medizinische Ultraschall-Diagnostik. Jedoch hatte hier die Bildgebung einen sehr viel höheren Stellenwert und wurde bereits zu einem frühen Zeitpunkt erreicht. In der ZfP ist bis heute die Auswertung des A-Bildes Standard und wird in vielen nationalen und internationalen Normen beschrieben. Die Weiterverarbeitung von Prüfergebnissen zu Bildern stellt eine willkommene Erweiterung dar, weil jetzt die Reflektoren im Prüfobjekt, oder einem Teil davon dargestellt werden, und so auch von einem Nicht-Fachmann einfacher interpretierbar sind. Die bildgebende Darstellung erfordert jedoch einen wesentlich höheren Hardware- und Softwareaufwand, der jetzt auch in kompakten, batteriebetriebenen Geräten realisiert werden kann. Beispiele für die Anwendung der Phased Array Technologie und den „Generationswechsel“ in der Ultraschallprüfung zeigen wir im Folgenden auf.

## Geschichte

Vor der Einführung der Computertechnik für Signalverarbeitung wurden Echoamplitude und Laufzeit mit Hilfe einer Monitorblende erfasst, in proportionale Spannungen umgewandelt und entsprechend weiterverarbeitet. Schließlich erlaubte der Einsatz von Wegaufnehmern die grafische Darstellung der Amplitude, bzw. des Reflektorabstandes als Funktion der Prüfkopfposition mit einem XY-Schreiber: Das B- und C-Bild war geboren. Diese Technik ist einfach anwendbar

in allen automatischen Anwendungen: Bleche, Rohre, oder Profile werden an einem oder mehreren Prüfköpfen entlanggeführt und alle Echos als Funktion des Ortes aufgetragen. In der Medizin gab es zu dieser Zeit (~1965) bereits ein Gerät [1] mit einem B-Bild in Echtzeit, Abb. 1. Hierbei rotierte der Prüfkopf im Mittelpunkt eines Hohlspiegels, und die Echos wurden als Funktion des Drehwinkels auf dem Bildschirm des Ultraschallgerätes dargestellt, Abb. 2. Nur 4 Jahre später wurde der schwere und große Rotationsprüfkopf durch ein lineares Array ersetzt, das vom Arzt mit der Hand verwendet werden konnte. Mit den Fortschritten in der Elektronik- und Computertechnik wurde es in den 80ern möglich, das Schallfeld des Gruppenstrahlers durch zeitlich gesteuerte Anregung zu manipulieren: Die lineare Abtastung durch Multiplexen und zeitlich konstante Verzögerung der Elementgruppen ersetzt die mechanische Bewegung des Prüfkopfes. Mit speziellen Zeitverzögerungen der einzelnen Elemente lässt sich das Schallfeld schwenken oder fokussieren.

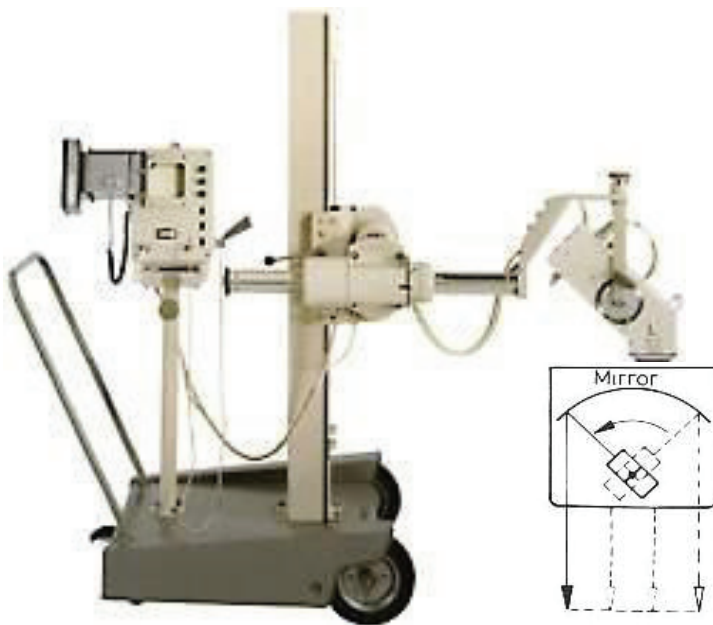


Abb. 1 Vidoson (1966)

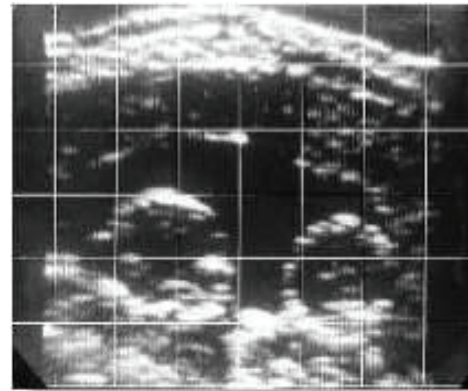


Abb. 2 Zwillingsschwangerschaft (1966)  
[2]

## Gruppenstrahler in automatischen Prüfanlagen

Das Hauptziel in der automatischen Prüfung ist die Maximierung der Produktivität, die im wesentlichen von folgenden Faktoren abhängt:

- Mechanik (Investitions- und Betriebskosten)
- Zeit (pro geprüftes Teil / für die Einrichtung der Anlage / für den Service der Anlage)

Die Verwendung der Phased Array Technik in automatischen Prüfanlagen führt zu einer drastischen Reduzierung der mechanischen Teile, der Anzahl der Prüfköpfe und der Prüfzeit, weil ein Gruppenstrahler ein sehr viel größeres Volumen überdeckt, die Prüfempfindlichkeit durch die variable Fokussierung und das Schwenken des Schallfeldes erhöht, und damit die Nachweiswahrscheinlichkeit von Materialfehlern verbessert wird.

## Rohrprüfung mit der ROWA

Sechs Gruppenstrahler (5 MHz), Abb. 3, jeder unterteilt in vier Gruppen mit je 32 Elementen (=768 Einzelschwinger) sind um das Rohr herum angeordnet, Abb. 4. Der minimale Abstand von 23 mm zur Rohroberfläche ist groß genug, um Abnutzung oder Beschädigungen durch die Bewegung des Rohres zu vermeiden. Für die Prüfung in Standardprüftechnik wären sehr viel mehr Einschwinger- oder EMUS Prüfköpfe erforderlich in direktem Kontakt mit der Prüfoberfläche, verbunden mit einem großen Verschleiß [3].

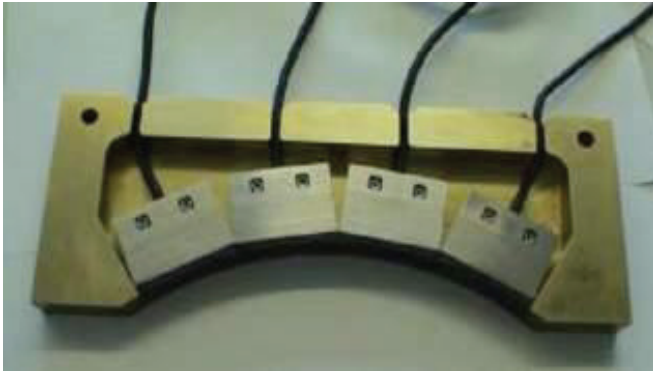


Abb. 3 ROWA Prüfkopf (4x32 Elemente)

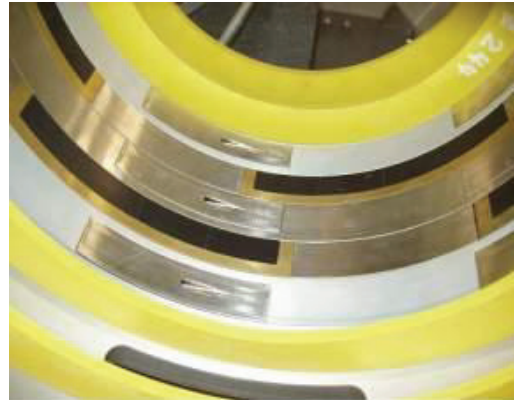


Abb. 4 ROWA Prüfkammer

Der patentierte, rotierende Wassermantel in der Prüfkammer gewährleistet die konstante Ankopplung mit sehr kurzen ungeprüften Enden. Für den Dimensionswechsel werden lediglich die beiden Gummilippen ausgetauscht, eine neue Geräteeinstellung geladen und mit dem Testrohr die Prüfempfindlichkeit kontrolliert. Im Block 1 werden Rohre mit Durchmessern von 177 bis 250 mm geprüft. Für größere Durchmesser (240 bis 339 mm) wird der Block 2 in den Rollgang geschoben, Abb. 5.



Abb. 5 ROWA Prüfkammern

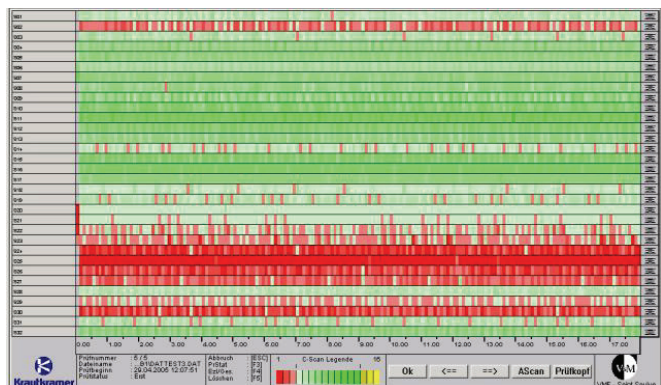


Abb. 6 ROWA Prüfbericht

Die virtuelle Apertur kann zwischen 1 und 32 Elemente eingestellt werden. In der praktischen Anwendung werden zwischen 5 und 8 Elemente (= 9 mm x 14.4 mm) verwendet, mit einer Nahfeldlänge von 67 mm (in Wasser). Der Elementabstand (Pitch) beträgt 1.31 mm in Block 1, bzw. 1,8 mm in Block 2. Das Schallfeld wird in 42 Zyklen um das Rohr herum bewegt. Nach einem Dimensionswechsel wird ein Datensatz mit neuen Verzögerungen geladen. Anschließend wird

die Prüfeempfindlichkeit mit Hilfe eines Testrohres für alle 6 Prüfköpfe normalisiert, was ca. 5 Minuten in Anspruch nimmt. Im Prüfbetrieb wird eine Vorschubgeschwindigkeit von maximal 1 m/s erreicht, die Wanddicke wird mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.05$  mm gemessen, und Fehler ab ERG 6,3mm erfasst, Abb. 6.

### Radsatzprüfung (Deutsche Bahn)

Ein weiteres Beispiel, bei dem die Phased Array Technik die optimale Lösung darstellt, ist die wiederkehrende Prüfung von Radsätzen bei der Deutschen Bahn, weil hier die Flächen für die Prüfkopfankopplung aufgrund der beiden Räder und der drei Bremsscheiben sehr eingeschränkt sind. Nur mit Gruppenstrahlern werden die Prüfvolumina (Schrumpfsitze) vollständig erfasst und die Prüfung wird in akzeptabler Zeit durchgeführt. Es werden 4 Gruppenstrahler mit 2,7 MHz und 14 Composite-Schwingern auf einem angepassten Vorlaufkeil verwendet, die einen Winkelbereich von  $25^\circ$  bis  $75^\circ$  überdecken [4]. Die beiden mittleren Prüfköpfe können um  $180^\circ$  gedreht werden, um auch den Bereich der mittleren Bremsscheibe zu prüfen, Abb. 7.

Die Berechnung der Verzögerungen, die Prüfung und die Bilderstellung wird vom 64-kanaligen COMPAS-System erledigt. Nach einer Umdrehung ist der Radsatz geprüft, und die Prüfergebnisse zweier Prüfköpfe werden als TD-Bild dargestellt, eine volumenkorrigierte Abwicklung. Die durchgehenden Linien repräsentieren Kantenechos von Durchmesseränderungen, einzelne Anzeigen gehören zu Fehlern oder Bohrungen, Abb. 8.

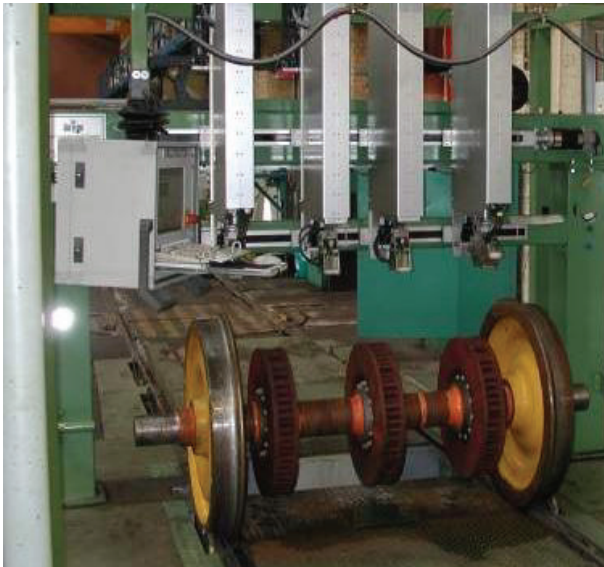


Abb. 7 Radsatzprüfanlage (DB)

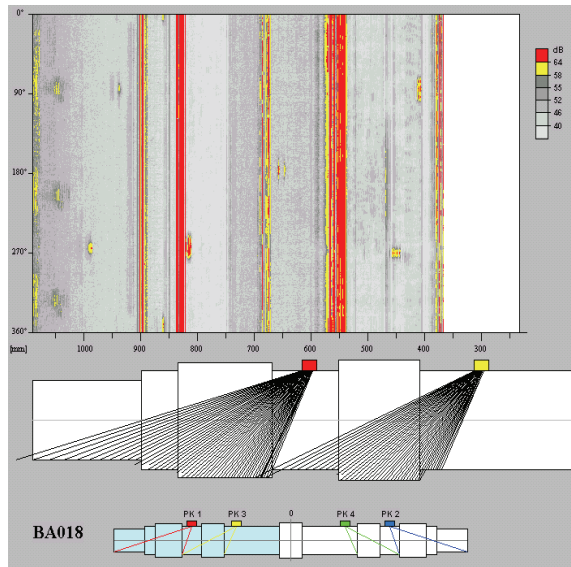


Abb. 8 Prüfergebnis (linke Seite)



## **Phased Array in der manuellen Prüfung**

Verglichen mit automatischen Prüfanlagen hat sich die Phased Array Technik in der manuellen Prüfung sehr viel langsamer entwickelt. Die Gründe sind nicht nur in den höheren Investitionskosten zu sehen, sondern auch weil

- viele Standardanwendungen ökonomisch mit Einschwingerprüfköpfen gelöst werden,
- die Prüfer die Standardtechnik gut beherrschen und geübt sind in der Auswertung des A-Bildes,
- diese Anwendungen in Normen und Prüfanweisungen klar beschrieben sind, und schließlich,
- die Phased Array Technik in festen Körpern viel komplexer ist, als in organischem Gewebe. Kenntnisse und Erfahrungen aus der Medizin können nicht ohne weiteres auf die ZfP übertragen werden.

Mit den batteriebetriebenen, kompakten Phased Array Prüfgeräten werden die Erfolge der automatischen Prüfung in die manuelle Prüfung übertragen, insbesondere dort, wo die bildhafte Darstellung der Prüfergebnisse gefordert wird, z.B. vom Kunden eines Bauteils, oder die Verwendung dieser Technik in zukünftigen Normen beschrieben wird.

## **Vergleich: Standard – Phased Array**

Um die heutigen Unterschiede darzustellen, wählen wir die Schweißnahtprüfung als einfaches Beispiel.

Frage: Was kann ich mit einem Gruppenstrahler einschließlich Vorlaufkeil machen?

- Der Fokus des Schallfeldes kann zwischen 10% und 100% der natürlichen Nahfeldlänge verändert werden.
- Für einen großen Fokusbereich sollte die Frequenz möglichst hoch und die virtuelle Apertur möglichst groß sein.
- Für einen großen Schwenkbereich des Schallfeldes sollte der Elementabstand (Pitch) und die Frequenz möglichst klein sein.
- Um Transversalwellen einzuschallen, ist ein Vorlaufkeil erforderlich.
- Der richtige Keilwinkel optimiert den verwendbaren Schwenkbereich.

Wie wird eine 25mm dicke Stumpfschweißnaht mit 30° Nahtvorbereitung geprüft?

**Tabelle 1** Prüfablauf

<b>Standard</b>	<b>Phased Array Technik</b>
2 Prüfköpfe SWB 45°-5, SWB 60-5	16 Elemente, 0,5 mm Pitch, 4 MHz, 36° Keil (Polystrol)
Bereichsjustierung	Prüfkopfdaten eingeben (automatisch für Dialogprüfköpfe)
	Einschallgeometrie: - Bestimmung des Winkelbereiches und des Prüfkopf-abstandes von der Naht, der Fokustiefe und der Aperturereinstellung
Empfindlichkeitseinstellung, evt. mit DAC-Aufnahme oder AVG-Einrichtung	Empfindlichkeitseinstellung, evt. mit DAC-Aufnahme
<b>Prüfung:</b>	<b>Prüfung:</b>
- beidseitig mit 45° abtasten	- beidseitig abtasten
- beidseitig mit 60° abtasten	
- Fehlerbewertung nach vorliegender Anweisung	- Fehlerbewertung nach vorliegender Anweisung (auch offline)
- Ergebnisse speichern	- Ergebnisse speichern
Prüfbericht (offline)	Prüfbericht (offline)

**Tabelle 2** Vorteile

Beliebiges Prüfgerät	Schnelle Geräteeinstellung, falls Anwendungsdatensatz vorhanden vorliegt
Prüfer mit Stufe II Qualifikation	Schnelle lineare Abtastung mit gleichzeitiger, automatischer Speicherung aller Prüfdaten, einschließlich der A-Bilder
Immer anwendbar mit vorliegender Anweisung/Norm	Bildgebung: Sektor, B- und C-Bild in Echtzeit
	Bildliche Echodarstellung: Ort und Ausdehnung
	Bessere Fehlerauffindwahrscheinlichkeit durch variable Fokussierung und Winkeländerung

**Tabelle 3** Nachteile

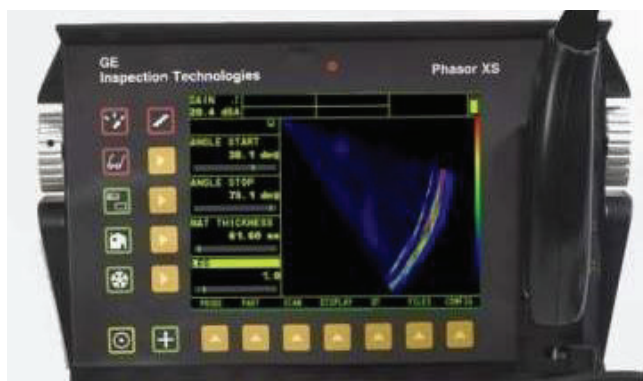
Lange Prüfzeit (4 Abtastungen)	Höhere Kosten für Gerät und Prüfkopf
Zeit für Fehlerbewertung	Zusätzliche Ausbildung für Prüfer
Kein Sektorbild	Mehr Zeit für erstmalige Geräteeinstellung
Kein B- oder C-Bild	Eventuell zusätzliche Funktionen erforderlich für weitergehende Datenverarbeitung (z.B. komplexere Bilder, Volumenkorrektur, Kontur des Prüfobjektes,...)
	Zusätzliche Amplitudenbewertung im A-Bild gemäß vorliegender Norm
	Etwas schlechtere Nahauflösung und mögliche Pseudoanzeigen, z.B. durch Gitterkeulen oder Wellenumwandlung
	Bild: Unschärfe durch den Schallbündeldurchmesser (wächst mit $s > N$ )
	Höhere Anforderungen an die Qualität der Prüffläche (größere Kontaktfläche, Unebenheit behindert die Phasensteuerung der Elemente)

Der deutliche Vorteil der Phased Array Technik ist die objektbezogene, bildliche Darstellung der Echos im geprüften Volumen in Echtzeit, und die Aufzeichnung aller A-Bilder bei Verwendung eines Wegaufnehmers. Diese Darstellung des Prüfergebnisses zeigt sofort, was mit dem Prüfobjekt los ist. Deshalb wird die Phased Array Technik in Zukunft die Standardprüfung auch in der manuellen Prüfung mehr und mehr ablösen. Heute ist sie meist noch vorbehalten für spezielle Anwendungen (komplexe Geometrie, teure und/oder sicherheitsrelevante Objekte). Für den universellen Einsatz, wie z.B. in der Schweißnahtprüfung ist es wichtig, dass

- die Bedienung des Gerätes einfach und intuitiv bleibt (Stufe II – Prüfer mit Zusatzausbildung),
- das Gerät auch die Standardprüfung beinhaltet, um Echoamplitudenbewertung nach vorgegebener Norm durchzuführen,
- der Preis für Gerät und Prüfkopf ökonomisch vertretbar bleibt, und
- die Phased Array Technik in zukünftigen Normen Eingang findet.

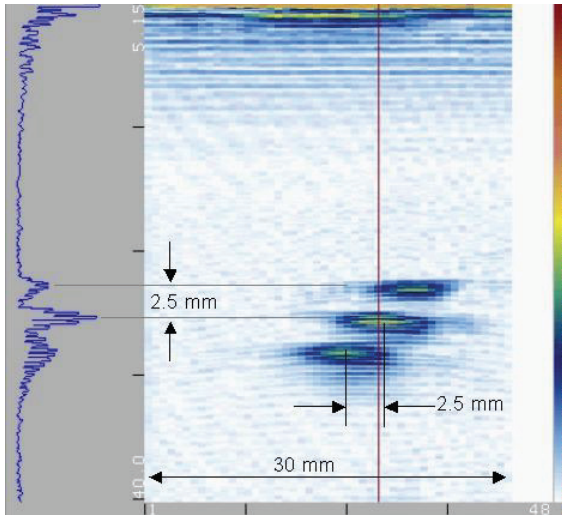
### Phasor XS

Das Phasor XS, Abb. 9, ist das neue universelle Ultraschallprüfgerät von GE Inspection Technologies für die manuelle Anwendung mit Einschwinger- oder SE-Prüfköpfen in konventioneller Weise, oder mit 16/64 Phased Array Technik: Virtuelle Apertur mit 1 – 16 Elementen, mit Multiplexer für Prüfköpfe mit bis zu 64 Elementen. Gehäuse und Bedienkonzept stammen vom bekannten USN 60. Neben dem A-Bild

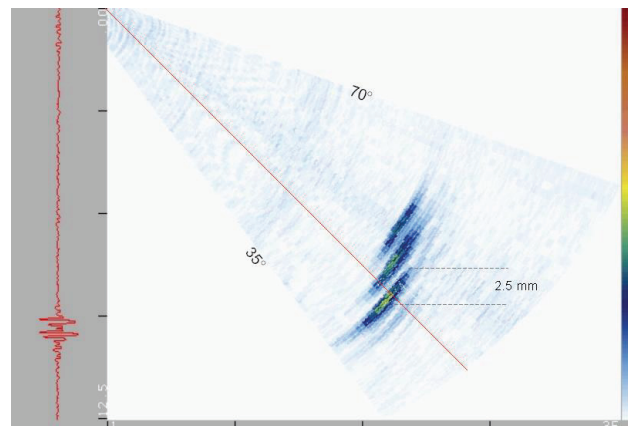


**Abb. 9** Phasor XS

für einen ausgesuchten Zyklus kann im Phased Array Betrieb das B- oder Sektorbild in Echtzeit dargestellt werden. Typische Anwendungen sind alle, die auch mit der konventionellen Technik prüfbar sind: Bleche, Schmiede- und Gussstücke mit einem linearen Gruppenstrahler und B-Bilddarstellung, Abb. 10: drei 1mm Querbohrungen, und die Schweißnahtprüfung mit Winkelabtastrung ( $35^\circ$  bis  $75^\circ$ ) und Sektorbild, die eine schnelle Abtastung in einem konstanten Abstand zur Naht ermöglicht, Abb. 11. Das Sektorbild ist maßstabsgetreu und erlaubt so die direkte Fehlerortung und Größenabschätzung der Anzeige.



**Abb. 10** B-Bild von 3 Querbohrungen mit 1mm Durchmesser



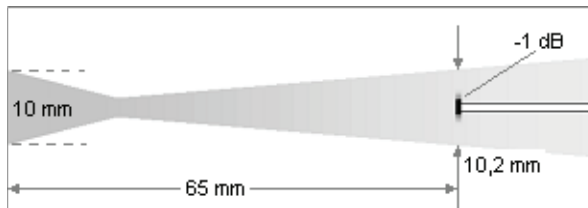
**Abb. 11** Sektorbild von 3 Querbohrungen mit 1mm Durchmesser

### Anzeigengröße, laterale Auflösung

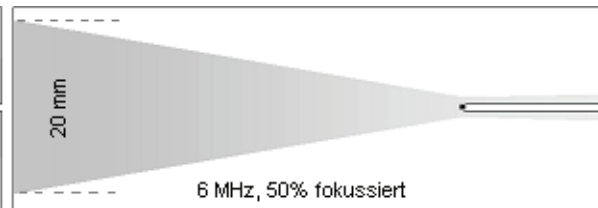
Die bildliche Darstellung des Reflektors ist dadurch geprägt, dass von allen Positionen innerhalb des Schallfeldes Echos entstehen, wobei die maximale Amplitude natürlich zur akustischen Achse gehört. Das Ergebnis ist, dass die Anzeigen im Bild nicht der tatsächlichen Größe des Reflektors entsprechen, sondern elliptische Anzeigen entstehen, deren Länge etwa dem Schallbündeldurchmesser am Ort des Reflektors entsprechen. Die laterale Auflösung wird dadurch erheblich reduziert.

Beispiel: für eine Apertur = 10mm, 4 MHz, Stahl ergibt sich ein Divergenzwinkel von  $4,5^\circ$  (-6 dB). Eine 1 mm Flachbodenbohrung in 65mm Entfernung hat so eine Amplitudenbreite von 10,2 mm (-6 dB), 10x größer als die tatsächliche Größe des Reflektors. Selbst wenn wir nur -1 dB zum Maximum abbilden, ergibt sich noch eine Größe von  $\sim 3$ mm, Abb. 12a. Das Bild ist immer „unscharf“ durch den Durchmesser des Schallbündels, und eine Lösung zu Optimierung des Fehlerbildes ist die Fokussierung des Schallbündels in die Tiefe des Fehlers, sofern möglich. Mit dem Fokussierungsgrad wird auch die Fokusbreite reduziert, so dass sich das Fehlerbild optimieren lässt, Abb. 12b.





**Abb. 12a** Laterale Auflösung (-1 dB)



**Abb. 12b** Laterale Auflösung im Fokus (-1 dB)

## Zusammenfassung

Seit vielen Jahren hat GE Inspection Technologies (früher Krautkrämer) in ihren automatischen Prüfanlagen die Standard-Ultraschallprüfung durch die Phased Array Technik ersetzt. Der höhere Aufwand an Elektronik wird dabei kompensiert durch die Einsparungen von Mechanik. Die Anlage wird weniger komplex und kompakter (weniger Prüfköpfe und bewegliche Teile, geringere Abnutzung und Service). In der manuellen Prüfung wird diese Technik heute auch schon eingesetzt mit dem Vorteil der Abbildung der Prüfergebnisse in Echtzeit. Für den Einsatz bei Standardanwendungen, wie z.B. bei der Schweißnahtprüfung erwartet der Prüfer eine einfache Gerätebedienung. Schließlich muss diese neue Technologie auch bei Prüfspezifikationen berücksichtigt werden.

## Literaturhinweise

- [1] <http://www.deutsches-museum-bonn.de/exponate/echtzeit-ultraschall/exponat.html>
- [2] H.-J. Holländer 1966, Zwillinge in der 17. Schwangerschaftswoche, [http://www.medical.siemens.com/siemens/de\\_DE/gg\\_us\\_FBAs/files/Aktionen/Ultraschall/Historie/Sie\\_40\\_Jahre\\_Prod\\_END.pdf](http://www.medical.siemens.com/siemens/de_DE/gg_us_FBAs/files/Aktionen/Ultraschall/Historie/Sie_40_Jahre_Prod_END.pdf)
- [3] Heiner Lompe u.a.: Wall Thickness Measurements of Large Tube Diameter using Phased Array Technology, WCNDT 2004
- [4] Wolfgang Hansen: Erfahrungen bei der Entwicklung von Radsatzvollwellenprüfständen, Wittenberge 2004