

# Schallfeldsteuerung mit Matrixarrays – Vergleichsmessungen an Rohrtestkörpern

Gottfried SCHENK, Daniel BRACKROCK, Rainer BOEHM  
Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin  
([Gottfried.Schenk@bam.de](mailto:Gottfried.Schenk@bam.de); [Daniel.Brackrock@bam.de](mailto:Daniel.Brackrock@bam.de); [Rainer.Boehm@bam.de](mailto:Rainer.Boehm@bam.de))

O. A. BARBIAN, H. WILLEMS  
NDT Systems& Services, Stutensee,  
([Alfred.Barbian@ndt-global.com](mailto:Alfred.Barbian@ndt-global.com); [Herbert.Willems@ndt-global.com](mailto:Herbert.Willems@ndt-global.com))

**Kurzfassung.** Bei der automatisierten Prüfung von Fernrohrleitungen mit Ultraschall kommt in der Regel die konventionelle Prüftechnik zum Einsatz. Diese erfordert, sowohl für die Wanddickenmessung wie auch für die Rissprüfung, eine große Anzahl von Sensoren, die aufgrund ihrer starren Schallfeldparameter jedoch nur einen begrenzten Durchmesserbereich abdecken können. Der Einsatz von laufzeitgesteuerten Gruppenstrahlern hingegen bietet die Möglichkeit, diesen zu vergrößern, was darüber hinaus mit dem Vorteil verbunden ist, die Anzahl der Sensoren signifikant verringern zu können. Aufgrund der Prüfanforderungen, die eine dreidimensionale Schallfeldsteuerung erforderlich machen, sind hierfür flächenhafte Wandler, auch Matrixarrays genannt, die geeignete Wahl.

Im Rahmen eines vom BMWi geförderten Projekts wurden verschiedene Matrixarray-Anordnungen mit Hilfe der Modellrechnung auf ihre Tauglichkeit untersucht. Die Optimierung führte zu einem Array mit 4 MHz und 16 x 16 Elementen, das von einem kommerziellen Anbieter beschafft werden konnte. Die Erprobung wurde unter Laborbedingungen an Rohrtestkörpern mit künstlich eingebrachten Fehlerstellen durchgeführt. Die Qualität der Anzeigen entsprach bei sämtlichen Reflektoren den Ergebnissen der konventionellen Technik, wobei insbesondere bei der Wanddickenmessung das Signal-Rauschverhältnis verbessert werden konnte.

## 1. Prüfaufgabe

Auch wenn viele Pipeline-Unfälle, wie die Explosion in Kenia im September 2011 mit über 200 Toten, auf unzulässige menschliche Eingriffe zurückzuführen sind, so kommt es doch immer wieder zu Havarien, die von Material bedingten Schädigungen verursacht werden. Dazu zählen Gewaltbruch durch Materialverluste oder Risse in der Rohrwand. Deshalb gehört es zu den unabdingbaren Aufgaben der Betreibergesellschaften, die Leitungssysteme einer regelmäßigen Kontrolle zu unterziehen.

Dabei versteht es sich von selbst, dass nur zerstörungsfreie Prüfverfahren zum Einsatz kommen können. Zu diesen zählen die magnetische Streuflussprüfung, die Wirbelstrom- sowie die Ultraschallprüfung. Bei letzterer werden die Sensoren in Form von intelligenten Molchen, d.h. in Kombination mit elektronischen Stufen zur Steuerung der Prüfköpfe und zur Speicherung der Messdaten, als autarke Einheiten rohrpostartig durch die zu prüfende Leitung gepumpt. Nach der Inspektionsfahrt, die mehrere hundert Kilometer betragen kann, werden die Molche wieder der Leitung entnommen und die aufgenommenen Daten offline ausgewertet [1].

Ultraschallmolche bieten gegenüber den anderen genannten Verfahren den Vorteil, eine quantitative Aussage über die Wanddicke einer Rohrleitung liefern zu können. Das Wirkprinzip ist in Bild 1a dargestellt: Mit Hilfe eines senkrecht eingeleiteten Schallbündels werden das Eintritts- und das Rückwandecho der Rohrwand aufgenommen und ausgewertet, aus der Laufzeitdifferenz lässt sich über die Schallgeschwindigkeit die Wanddicke bestimmen. Darüber hinaus eignen sich die Ultraschallverfahren auch zur Detektion von Rissen. Wie in Bild 1b dargestellt erfährt der unter 45° eingeleitete Schall an der Außenwand (bzw. über den „ganzen Sprung“ an der Innenwand) eine Reflexion, wenn sich dort ein Riss ausgebildet hat. Die aufgenommenen Daten werden über Odometerräder wegbezogen so exakt ermittelt, dass Fehlerorte mit einer Genauigkeit von  $\pm 20$  cm bestimmt werden können [1].

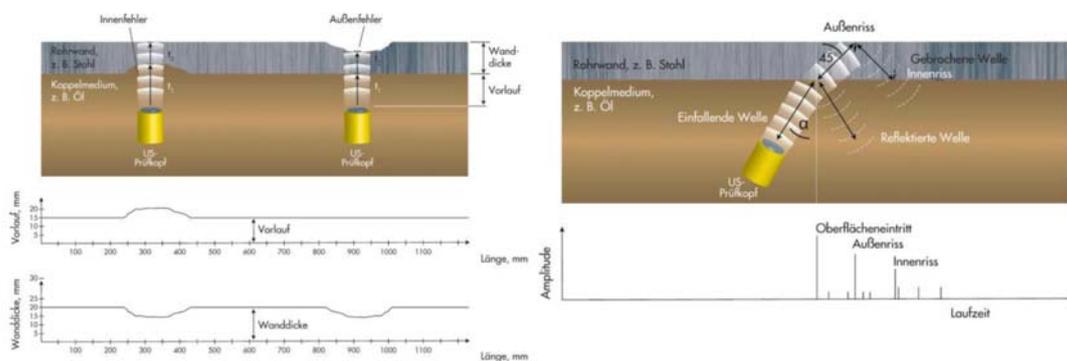


Bild 1a: Prinzip der Wanddickenmessung [1]

Bild 1b: Prinzip der Rissprüfung [1]

## 2. Innovativer Ansatz

Stand der Technik sind Molche mit Sensoren, die starre Schallfeldparameter aufweisen. Dies sind zum einen Senkrechtprüfköpfe für die Wanddickenmessung, sowie Winkelprüfköpfe mit 45° Einschallwinkel für die Rissprüfung. Bedingt durch die Notwendigkeit, den gesamten Rohrumfang abzudecken, kann die Zahl dieser Sensoren in die Hunderte gehen - wie beispielsweise bei einer Molchgröße von 36“, für die 918 solcher Prüfköpfe erforderlich sind, die axial versetzt in Kufen angeordnet werden [1].

Nachteil des Konzepts mit konventioneller Technik ist, dass nur ein begrenzter Durchmesserbereich abgedeckt werden kann und außerdem unterschiedliche Molche für Such- und Analysefahrten vorzuhalten sind. Diese Einschränkungen können durch den Einsatz von flächenhaften Gruppenstrahler-Anordnungen überwunden werden, den sog. Matrix-Arrays. Hier handelt es sich um zweidimensionale Wandler, deren Fläche in eine Vielzahl von Einzelementen unterteilt ist, die – einzeln oder als Gruppe - getrennt voneinander angesteuert werden. Sie erlauben eine dreidimensionale Steuerung des Schallfelds, d.h. das Schallbündel kann kreisförmig eingeschnürt und gleichzeitig in beliebige Richtungen geschwenkt werden [2]. Im Gegensatz zur punktuellen Abtastung von Sensoren mit starren Schallfeldparametern ist hier eine dreidimensionale Erfassung des Prüfvolumens ohne mechanischen Versatz möglich. Diese Art der Schallbündelsteuerung wird auch Volumenscan genannt.

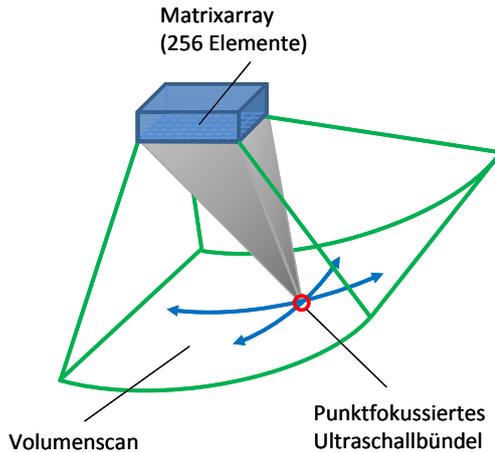


Bild 2:  
Schallfeldsteuerung mit  
einem 16 x 16 Matrixarray

### 3. Modellrechnung

Die Modellrechnung ist heute zu einem unverzichtbaren Werkzeug bei der Entwicklung neuer Prüfverfahren und –techniken geworden. Softwareprogramme wie z.B. CIVA erlauben nicht nur die Simulation von Schallfeldern, sondern ermöglichen auch die vorausschauende Abschätzung von Prüfergebnissen bzw. dienen vor allem zur Auswahl, Dimensionierung und Validierung der Sensoren [3]. Auch das in der BAM entwickelte proprietäre Programm Array Calculus eignet zur Berechnung von linearen und flächenhaften Gruppenstrahler-Prüfköpfen. Es ist in der Lage, die Amplituden und Schalldruckverläufe der Schallfelder zu ermitteln und die zur Steuerung erforderlichen Verzögerungsprofile zu bestimmen [4].

Die Herausforderung für dieses Projekt bestand darin, zuallererst die grundsätzliche Eignung von Matrixarrays zu überprüfen; anschließend musste deren optimale Elementzahl und –größe ermittelt werden. Bestimmende Faktoren waren die Sensor-Empfindlichkeit, das Haupt-Nebenkeulenverhältnis und die Größe der nicht erwünschten Schallfeldanteile, wie z.B. der Longwelle bei 45° Transwelleneinschallung. Daneben spielten auch Aspekte wie die erforderliche Anzahl der Steuerkanäle eine bedeutende Rolle, da diese die Kosten einer derartigen Molchanordnung bestimmen und damit letztendlich über die faktische Realisierbarkeit entscheiden.

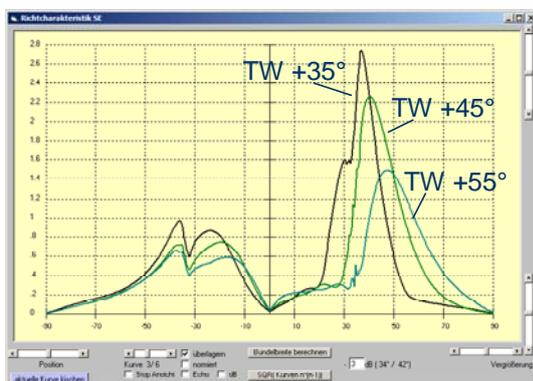


Bild 3a: Richtcharakteristik eines Arrays mit 4 x 4 Elementen

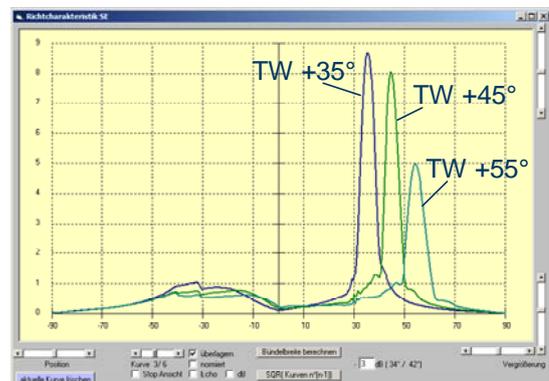


Bild 3b: Richtcharakteristik eines Arrays mit 16 x 16 Elementen

Wie in den Bildern 3a und 3b dargestellt kommt der Anzahl der Arrayelemente eine entscheidende Bedeutung für das Haupt-Nebenkeulenverhältnis zu. Da dieses sich mit zunehmender Elementzahl verbessert, der Anzahl der Steuerkanäle aus technischen wie finanziellen Gründen aber Grenzen gesetzt sind, wurden – als Kompromiss - die nachfolgenden Untersuchungen auf der Basis eines Sensors mit 16 x 16 Elementen durchgeführt. Untenstehende Abbildungen 4a und 4b zeigen die Richtcharakteristikverläufe eines solchen Arrays mit fokussiertem und unfokussiertem Schallfeldern, die für einen Aufpunkt Abstand von 5 mm (Stahl) und 17 mm Vorlaufstrecke (Öl) berechnet wurden.

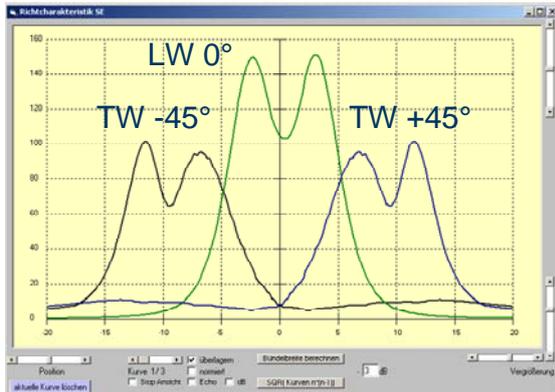


Bild 4a: Richtcharakteristik eines Arrays mit 16 x 16 Elementen (unfokussiert)

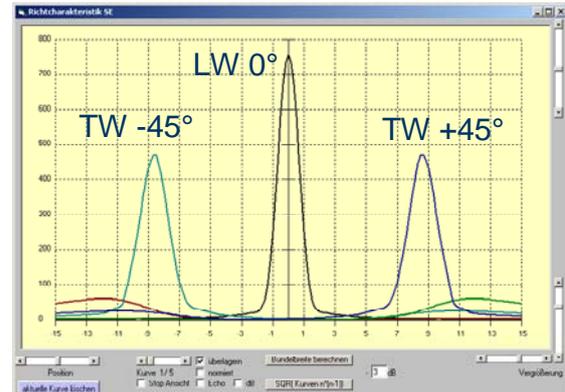


Bild 4a: Richtcharakteristik eines Arrays mit 16 x 16 Elementen (fokussiert)

Die Modellrechnung für unterschiedliche Aufpunkte und Einsatzbedingungen erbrachte die uneingeschränkte Eignung eines Matrixarrays mit 16 x 16 Elementen für die kombinierte Prüfung auf Materialverluste und Rissfreiheit. Die Schwingerparameter wurden auf 0,6 mm Pitch und 4 MHz Schwingfrequenz optimiert, womit ein ausreichendes Haupt-Nebenkeulenniveau erreicht werden konnte. Daneben konnte die Fähigkeit zur Umschaltung vom Suchmodus (unfokussiert) in den Analysemodus (fokussiert) nachgewiesen werden, was eine zusätzliche Prüffahrt einspart. Geringe Empfindlichkeitseinbußen bei der Schrägeinschallung, wie sie durch die geometrisch bedingte Verkleinerung der effektiven Apertur bedingt sind, hatten, wie durch die anschließend durchgeführten Laboruntersuchungen bestätigt werden konnte, bei der Rissprüfung keine Auswirkung auf die Fähigkeit zur Fehlerdetektion.

#### 4. Auswahl des Matrixarrays

Aus Kostengründen wurden keine Sonderbauformen eingesetzt, sondern Standardprodukte von industriellen Anbietern beschafft. In Bild 5 ist eines der beiden verwendeten Matrixarrays dargestellt, die über nachstehende Auswahlkriterien identifiziert wurden.

- Produkt eines industriellen Herstellers
- 16 x 16 Elemente
- Elementgröße 0,5 mm x 0,5 mm
- Elementlücke 0,1 mm
- Frequenz 4 bzw. 5 MHz

- Hohe Spannungsfestigkeit (200 V)
- Konstante Elementempfindlichkeit
- Keine toten Elemente

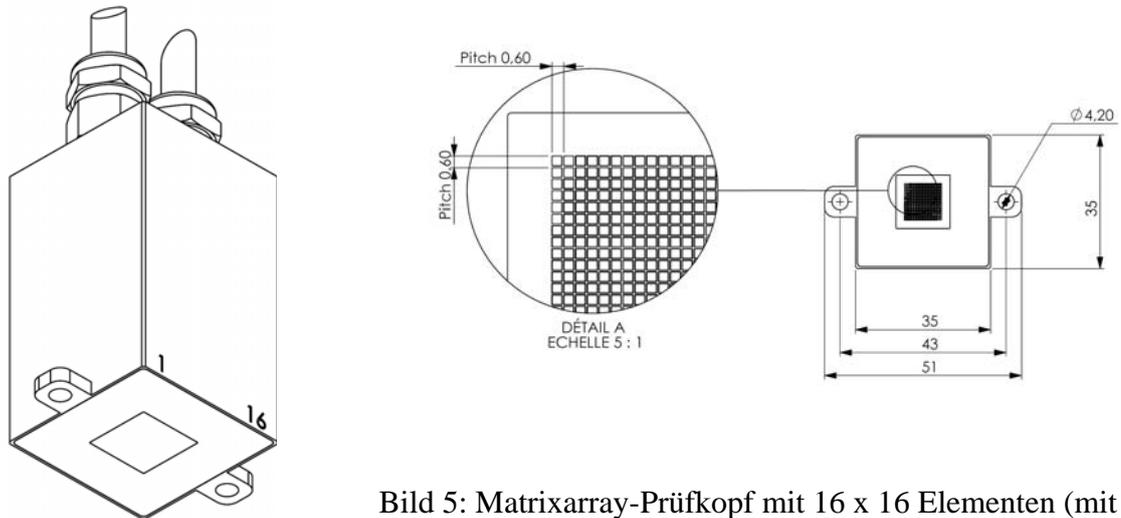


Bild 5: Matrixarray-Prüfkopf mit 16 x 16 Elementen (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Sonaxis)

### 5. Vergleichsmessungen an Rohrtestkörpern

Die Ergebnisse der Modellierung mussten abschließend an zwei eigens für diesen Zweck gefertigten Rohrtestkörpern verifiziert werden. Für die Wanddickenmessung kam ein Rohrsegment zum Einsatz (Bild 6), in dem Flachbodenbohrungen unterschiedlicher Größe und Tiefe sowohl an der Außen- wie auch an der Innenwand eingebracht worden waren. Diese wurden erst mit einem, wie in Molchen üblich, 5 MHz Senkrechtprüfkopf abgefahren, anschließend kam die Matrixarray-Technik zum Einsatz. Die Messungen wurden mit dem in der BAM entwickelten COMPAS-XXL Prüfsystem durchgeführt (256 Kanäle).

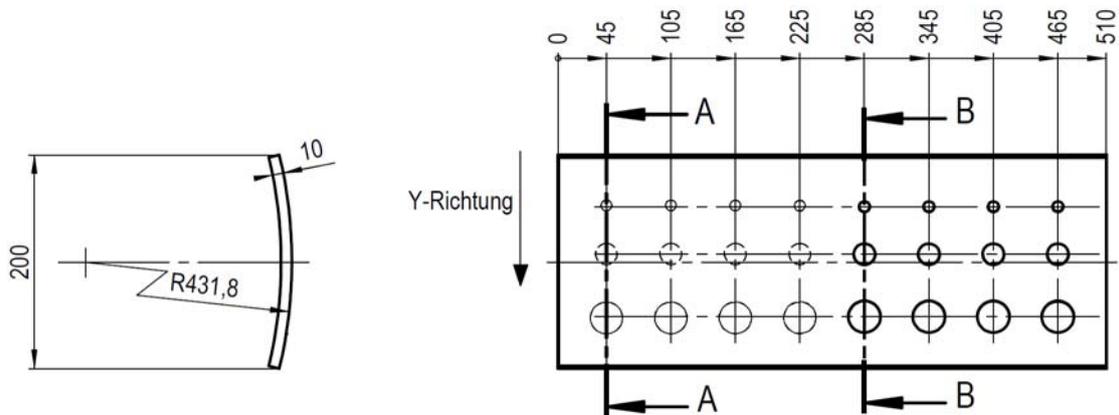


Bild 6: Rohrtestkörper mit Flachbodenbohrungen für die Wanddickenmessung

Wie in untenstehender Tabelle 1 ablesbar konnten nicht nur sämtliche Reflektoren sicher nachgewiesen werden, sondern wiesen die Messungen mit den beiden Matrixarrays (4 MHz und 5 MHz) sogar eine deutlich höhere Empfindlichkeit auf.

Tabelle 1: Anzeigen von Innenfehlern mit konventioneller Technik und Matrixarrays

Innenfehler d = 20 mm	Konv. 5 MHz [dB]	256 Matrix 4 MHz [dB]	256 Matrix 5 MHz [dB]
t = 0,5 mm	52	79	78
t = 1,0 mm	53	79	77
t = 2,0 mm	54	79	76
t = 4,0 mm	54	77	74

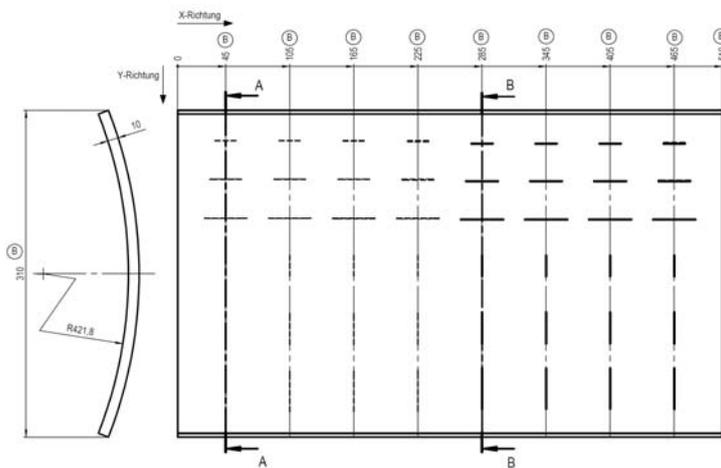


Bild 7: Rohrtestkörper mit Nuten für die Rissprüfung

Der für die Rissprüfung eingesetzte Rohrtestkörper (siehe Bild 7) wies Nuten mit 0,5 mm Breite in unterschiedlicher Länge und Tiefe auf. In den Bildern 8a und 8b sind die B-Bilder einer solchen Nutgruppe dargestellt, die mit den beiden Verfahren aufgenommen wurden. Auch hier konnten gleichwertige Ergebnisse ermittelt werden; der in Tabelle 2 ablesbare – z.T. geringfügige - Empfindlichkeitsvorteil der konventionellen Technik fiel nicht weiter ins Gewicht.

Tabelle 2: Anzeigen von Außenfehlern mit konventioneller Technik und Matrixarrays

Außenfehler Nut	Konv. 4 MHz [dB]	256 Matrix 4 MHz [dB]	256 Matrix 5 MHz [dB]
t = 0,5 mm	75	65	59
t = 1,0 mm	72	69	65
t = 2,0 mm	75	71	70
t = 4,0 mm	78	75	73

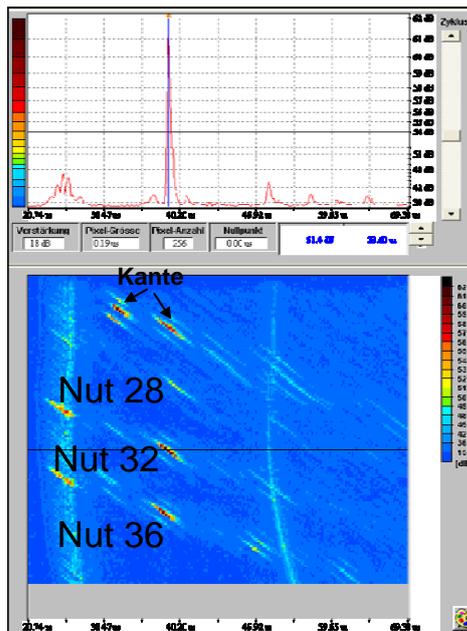


Bild 8a: B-Bild einer Nutenschar mit 4 mm Tiefe und unterschiedlicher Länge (konventioneller 45°-Prüfkopf mit 4 MHz)

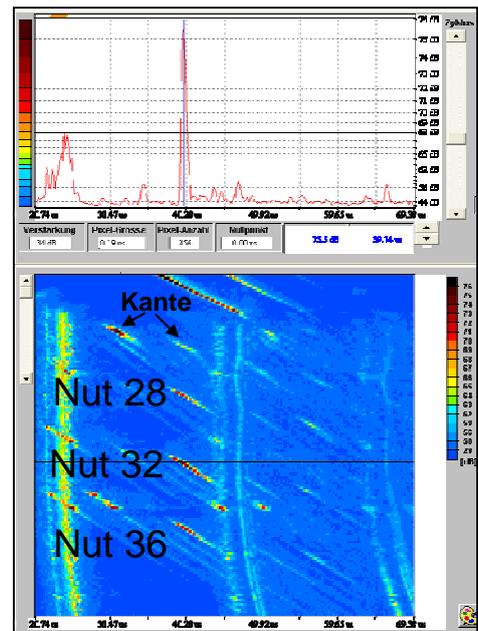


Bild 8b: B-Bild einer Nutenschar mit 4 mm Tiefe und unterschiedlicher Länge (16 x 16 Matrixarray-Array mit 4 MHz)

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Bereits 2004 wurde ein Verfahren zur automatisierten Pipelineprüfung mit Gruppenstrahlertechnik vorgestellt [5]. Dieses basierte auf einem Lineararray, das lediglich eine zweidimensionale Schallfeldsteuerung erlaubt und deshalb nicht zum universellen Einsatz sowohl für die Wanddickenmessung wie auch für die Rissprüfung in allen vier erforderlichen Richtungen geeignet ist. Demgegenüber stellt das Verfahren mit einem 16 x 16 Matrixarray einen entscheidenden Fortschritt dar und ist, wie die Modellierung und deren messtechnische Überprüfung an Rohrtestkörpern gezeigt haben, auch für den praktischen Einsatz in einem Molch geeignet.

Der entscheidende Punkt bei der Umsetzung in ein praxistaugliches System ist allerdings der Grad der Miniaturisierung der Steuerelektronik. Denn anders als bei konventionellen Prüfköpfen, die lediglich über eine einzige Koaxleitung mit den Steuer- und Empfangsstufen verbunden sind, müssen bei einem Matrixarray die Elemente getrennt angesteuert werden, was eine sehr große Anzahl von Verbindungsleitungen erfordert. Dem sind jedoch unter den eingeschränkten Platzbedingungen eines Ultraschall-Molchs Grenzen gesetzt. Eine Lösungsmöglichkeit besteht im Einsatz eines anwenderspezifischen Bausteins (ASIC), der in das Prüfkopfgehäuse integriert ist. Eine bei einer Berliner Chipdesign-Firma in Auftrag gegebene Konzeptstudie ergab eine technisch realisierbare wie praxistaugliche Lösung.

## Referenzen

- [1] O. A. Barbian et al: Kombinierte Wanddicken- und Rissprüfung an einer Gaspipeline mit einem Ultraschallmolch, DGZfP-Jahrestagung 2007, Tagungs-CD
- [2] H. Wüstenberg, G. Schenk: Entwicklung und Trends bei der Anwendung von steuerbaren Schallfeldern in der ZfP mit Ultraschall, DGZfP-Jahrestagung Mainz 2003, Tagungs-CD
- [3] S. Chatillon et al: Simulation of advanced UT phased array technique with matrix probes and dynamic settings for complex component inspection, [www.civa.cea.fr](http://www.civa.cea.fr)
- [4] R. Boehm, A. Erhard: Simulationsgestützte Entwicklung von Prüfköpfen, DACH-Jahrestagung Salzburg 2004, Tagungs-CD
- [5] J. Bosch et al: Phased Array-Technologie für automatisierte Pipeline-Inspektion, DACH-Jahrestagung Salzburg 2004, Tagungs-CD