

# SAFT-Rekonstruktion und 3D Lokalisation aus Ultraschallmessungen mit Matrix- und Linear-Arrays in Tauchtechnik

Jessica KITZE\*, Rainer BOEHM\*, Daniel BRACKROCK\*, Hans-Joachim MONTAG\*,  
Uwe VÖLZ\*, Gerhard BREKOW\*, Marc KREUTZBRUCK\*

\* Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Berlin, Fachgruppe 8.4,  
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

**Kurzfassung.** Die Kombination der Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) mit der Tauchtechnik stellt eine besondere Herausforderung dar. Zwei für SAFT notwendige Bedingungen – die große Schallbündeldivergenz und die Kenntnis über den Ort des Senders bzw. des Empfängers, der für die phasenrichtige Überlagerung der Echosignale genau bekannt sein muss – lassen sich einfach erfüllen, wenn kleine, fast punktförmige Sensoren direkt auf der Oberfläche des Prüfobjektes ankoppeln. Diese Anordnung ist in der Regel nicht vereinbar mit den praktischen Ansprüchen an die Signalqualität und die Flexibilität der Prüftechnik.

Werden jedoch Prüfköpfe mit üblichen Abmessungen und zudem noch mit Vorlaufstrecken verwendet, dann ist die Bestimmung der Sensororte und der Schalllaufwege durch die brechende Fläche nicht mehr trivial, wenn man die für SAFT geforderte Genauigkeit in Rechnung stellt.

Etwas anderes, aber ein im Prinzip einfacher Weg zur räumlichen Lokalisation von Echoquellen ist die Auswertung des 2D Sektorscans eines Matrixarrays und dessen dreidimensionale Darstellung. Durch gezielte Steuerung des Arrays gelingt auf einfache Weise die ortsrichtige Zuordnung.

## Einführung

SAFT als Rekonstruktionsverfahren von Ultraschallmessdaten in Kontakttechnik wird schon seit vielen Jahren erfolgreich zur Störsignalminderung und Fehleranalyse eingesetzt [1]. Bei vielen Prüfproblemen ist jedoch häufig die praktische Umsetzung der Ultraschalluntersuchungen in Tauchtechnik, d.h. mit einem konstanten Wasservorlauf, sehr viel einfacher durchzuführen als in Kontakttechnik vor allem, um eine einheitliche akustische Ankopplung und hohe Auflösungen realisieren zu können. Aus diesem Grund wurde untersucht, welche Randbedingungen erfüllt sein müssen, damit sich der SAFT-Algorithmus auch auf die Ultraschallmessdaten in Tauchtechnik anwenden lässt und wie sich der Einsatz von Gruppenstrahlerprüfköpfen auf die SAFT-Rekonstruktionen auswirkt.

## Prinzip der SAFT-Rekonstruktion

Bei SAFT handelt es sich um eine laufzeitbezogene Messmethode mit anschließender Rekonstruktion. Dabei setzt der Rekonstruktionsalgorithmus hochfrequente, digitalisierte Ultraschallmessdaten aus einem möglichst großen Winkelbereich des Bauteils voraus.



Das kann durch Abscannen des Bauteils mit einem kleinen Ultraschallprüfkopf mit großer Bündeldivergenz oder durch Gruppenstrahlerprüfköpfe mit geschwenktem Schallbündel realisiert werden. In beiden Fällen werden in der Rekonstruktion für jeden Bildpunkt die hochfrequenten Echosignale aus allen Prüfkopfpositionen zeitverschoben so überlagert, dass deren rechnerische Interferenz genau dann optimal konstruktiv wird, wenn das Echo tatsächlich vom Ort des jeweiligen Bildpunktes kommt (Abb. 1). Auf diese Weise kommt es zu konstruktiver Interferenz am eigentlichen Ort bzw. Bildpunkt des Reflektors und zu destruktiver Interferenz für alle anderen Bildpunkte, wenn die Schalllaufwege potentieller Echos, die von den Bildpunkten kommen könnten genau bekannt sind [2], [3],[4].

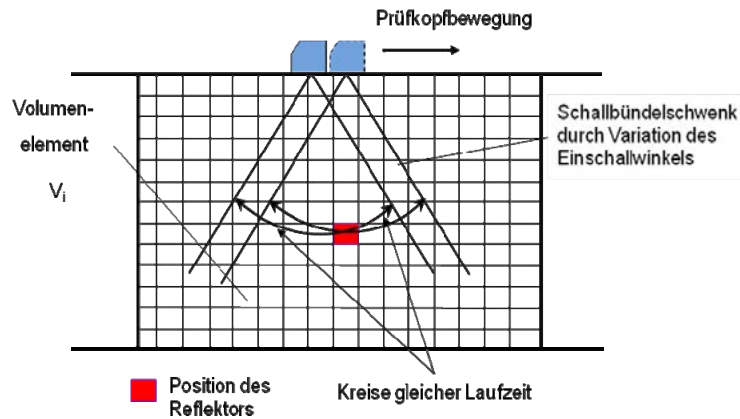


Abb. 1 Prinzip der SAFT-Rekonstruktion

Das ist trivial solange es sich um kleine, fast punktförmige Sensoren handelt, die direkt auf der Bauteiloberfläche ankoppeln. Dann gelten einfache geometrische Beziehungen für die Berechnung der Schalllaufwege (vgl. Abb. 2 links). Nutzen wir aber Prüfköpfe mit üblichen Abmessungen und Vorlaufstrecken, wie zum Beispiel in der Ultraschalltauchtechnik, dann ist die Bestimmung der Sensororte und der Schalllaufwege durch die brechende Fläche nicht mehr trivial. Wir müssen dabei die relative Orts- ( $\Delta x$ ) und Zeitverschiebung ( $\Delta t$ ) des virtuellen Quellpunktes berücksichtigen und für jeden Bildpunkt das Brechungsgesetz erfüllen (vgl. Abb. 2 rechts).

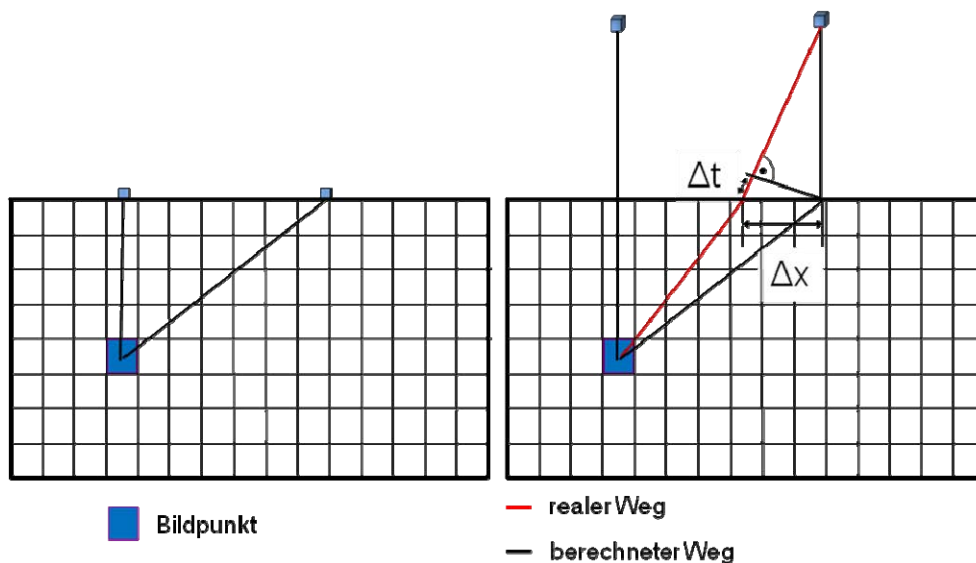
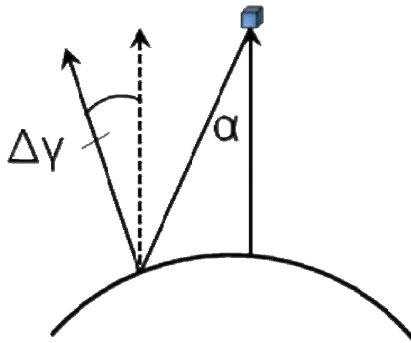


Abb. 2 SAFT Kontakttechnik (links) vs. SAFT Tauchtechnik (rechts)

In der Prüfpraxis wird der kleine Prüfkopf mit großer Bündeldivergenz eingespannt, ein konstanter Wasservorlauf eingestellt und anschließend das Gerät so justiert, als würde der Prüfkopf direkt auf der Bauteiloberfläche ankoppeln. Bei der Justierung wird das A-Bild um den Weg bzw. die Zeit korrigiert, die der Schall in Wasser zurücklegt. Dabei ergibt sich ein Fehler, der umso größer ist, je größer das Schallbündel ist, weil lediglich der in schwarz eingezeichnete Weg zu dem eingezeichneten Bildpunkt berücksichtigt wird. Der eigentliche Weg, den der Schall nach Fermat'schen Prinzip und Brechungsgesetz zurücklegt, ist jedoch der in rot eingezeichnete Weg (Abb. 2 rechts). Damit ergibt sich eine relative Orts- und Zeitverschiebung, die für die Berechnung der Schalllaufzeiten und der korrekten Zuordnung der empfangenen Echos im SAFT-Algorithmus zu den einzelnen Bildpunkten berücksichtigt werden muss. Dieses Problem gilt prinzipiell auch für Gruppenstrahlerprüfköpfe, aber diese bieten den großen Vorteil, dass die Verschiebung des Schallaustrittspunktes und der Vorlauf in Abhängigkeit des jeweiligen Schwenkwinkels im Voraus bei der Berechnung der Steuerzeiten für den Gruppenstrahler berücksichtigt werden. So entfällt bei Einsatz eines Gruppenstrahlerprüfkopfes die nachträgliche Korrektur der variablen Vorlaufstrecke für jeden einzelnen Punkt und spart Rechenzeit.

Im Falle einer gekrümmten Bauteiloberfläche muss zudem eine Verkippung der Flächennormalen für die genaue Bestimmung der Schalllaufwege berücksichtigt werden (Abb. 3).

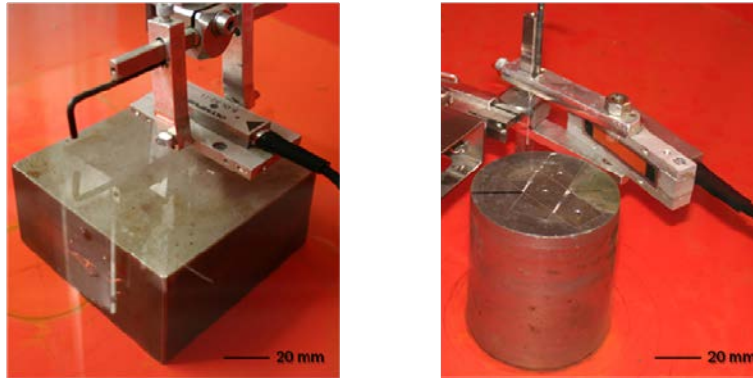
Diese drei Faktoren, die Orts- und Zeitverschiebung und die Verkippung der Flächennormalen bei gekrümmten Bauteilen müssen für den erfolgreichen Einsatz von SAFT auf Ultraschallmessdaten in Tauchtechnik berücksichtigt werden.



**Abb. 3** Verkippung der Flächennormalen in Abhängigkeit von der Bauteilkrümmung

## Messtechnik

Die Untersuchungen wurden an einem ebenen und einem zylindrischen Testkörper mit einem 10 MHz-Lineararray durchgeführt. Der Wasservorlauf betrug 20 mm. In den Testkörpern befinden sich jeweils drei Querbohrungen mit 2 mm Durchmesser als Testreflektoren, die es nachzuweisen galt (Abb. 4). Die Untersuchungen wurden manipulatorgesteuert mit dem Gruppenstrahlergerät Compas XL [5] und integrierter SAFT-Software durchgeführt. Das Gerät und die Software wurden in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung entwickelt.

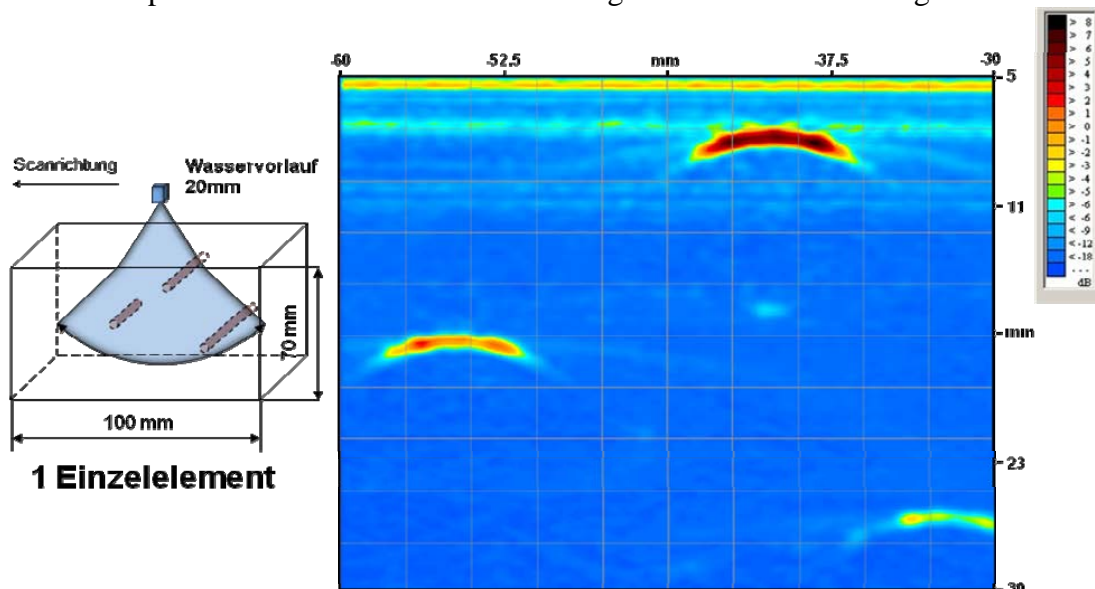


**Abb. 4** Messaufbau 10 MHz-Lineararray in Tauchtechnik, Testkörper mit jeweils drei Querbohrungen eben (links) und zylindrisch (rechts)

## Messergebnisse SAFT in Tauchtechnik

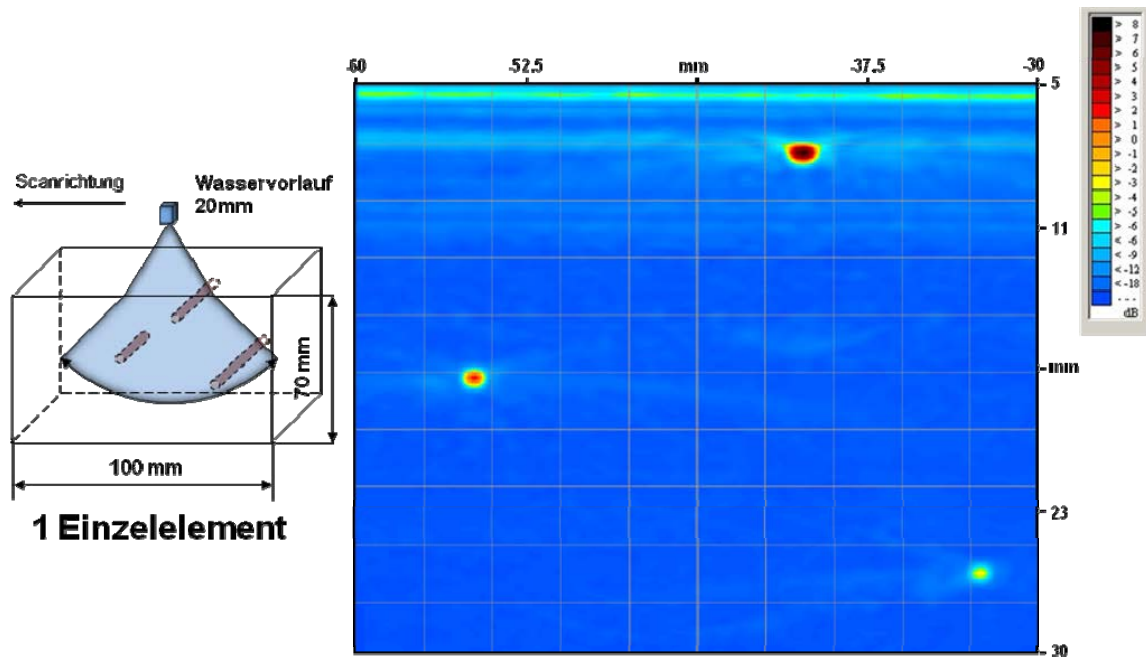
### 1.1 Ebener Testkörper

Bei den ersten Untersuchungen wurde nur ein Element des Gruppenstrahlerprüfkopfes angesteuert. Das entspricht einem kleinen Prüfkopf mit großer Bündeldivergenz, also im Prinzip dem Idealfall für SAFT. In Abb. 5 ist die gleichgerichtete SAFT-Rekonstruktion der Messungen mit einem Einzelement ohne Korrektur der variablen Vorlaufstrecke dargestellt. Es wird deutlich, dass ohne Korrektur der relativen Orts- und Zeitverschiebung durch den langen Vorlauf in Wasser die Zuordnung der laufzeitabhängigen Echos zu den einzelnen Bildpunkten nicht stimmt und die Anzeigen stark verbreitert dargestellt werden.



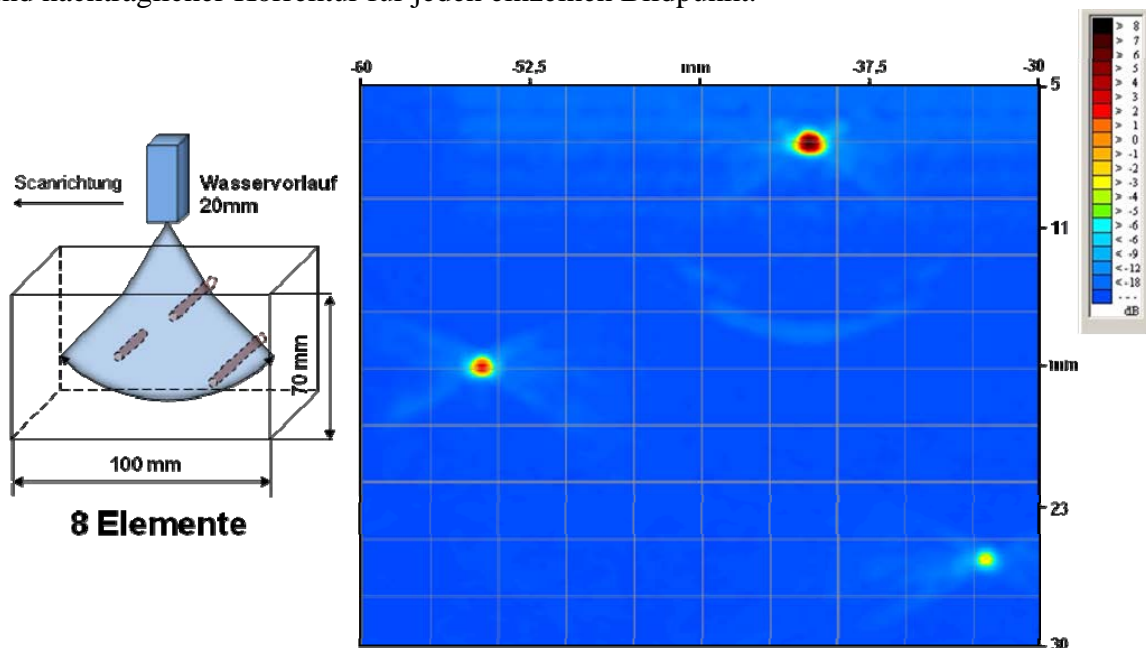
**Abb. 5** SAFT-Rekonstruktion 10 MHz-Lineararray, ebenes Bauteil, Bündelöffnung  $60^\circ$ , ohne Kompensation der variablen Vorlaufstrecke für jeden Bildpunkt

Die SAFT-Rekonstruktion mit Kompensation der variablen Vorlaufstrecke für jeden Bildpunkt zeigt dagegen deutlich kleinere Anzeigen der Querbohrungen (Abb. 6). Die Zuordnung der laufzeitabhängigen Echos stimmt wieder. Diese nachträgliche Berechnung der Orts- und Zeitverschiebung aufgrund des langen Vorlaufes für jeden einzelnen Bildpunkt nimmt längere Rechenzeiten in Anspruch.



**Abb. 6** SAFT-Rekonstruktion 10 MHz-Lineararray, ebenes Bauteil, Bündelöffnung 60°, mit Kompensation der variablen Vorlaufstrecke für jeden Bildpunkt

Durch den Einsatz eines Gruppenstrahlerprüfkopfes mit geschwenktem Schallbündel – hier das 10 MHz-Lineararray mit 8 aktiven Elementen und einem durchgeführten Winkelschwenk von  $-30^\circ$  bis  $30^\circ$  – entfällt diese nachträgliche Korrektur, da die Schallaustrittspunktverschiebung und der Vorlauf in Abhängigkeit vom Schwenkwinkel schon im Voraus berechnet und bei der Auswertung berücksichtigt werden. In Abb. 7 ist das Ergebnis der SAFT-Rekonstruktion der Untersuchungen mit dem 8-Elemente-Lineararray ohne nachträgliche Korrektur der variablen Vorlaufstrecke dargestellt. Das Ergebnis unterscheidet sich qualitativ nur geringfügig gegenüber der Rekonstruktion mit einem Einzelement und nachträglicher Korrektur für jeden einzelnen Bildpunkt.

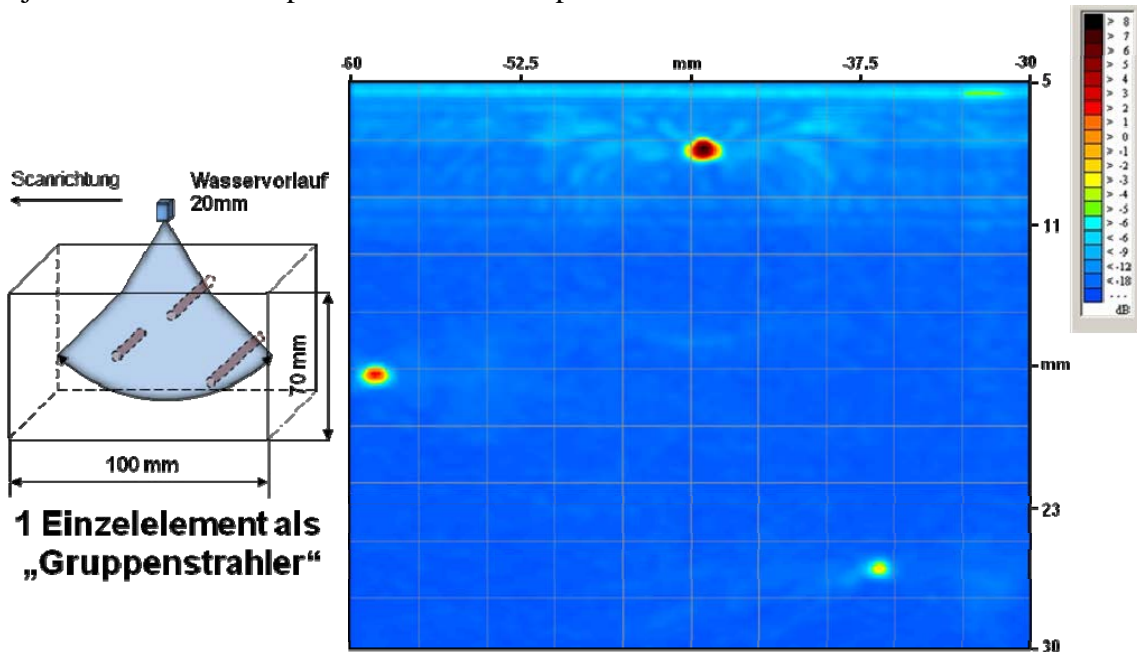


**Abb. 7** SAFT-Rekonstruktion 10 MHz-Lineararray, ebenes Bauteil, Gruppenstrahlerprüfkopf mit 8 Elementen, Bündelöffnung 5°, Kompensation der variablen Vorlaufstrecke für jeden Schwenkwinkel, nicht aber für jeden Bildpunkt



Die Vorteile der Untersuchungen mit dem Gruppenstrahlerprüfkopf sind zum einen eine Erhöhung des Signal-Rausch-Verhältnisses von etwa 6 dB und zum anderen die Ersparnis eines Vielfachen an Rechenzeit, da eine nachträgliche Korrektur der variablen Vorlaufstrecke für jeden einzelnen Bildpunkt nicht notwendig ist.

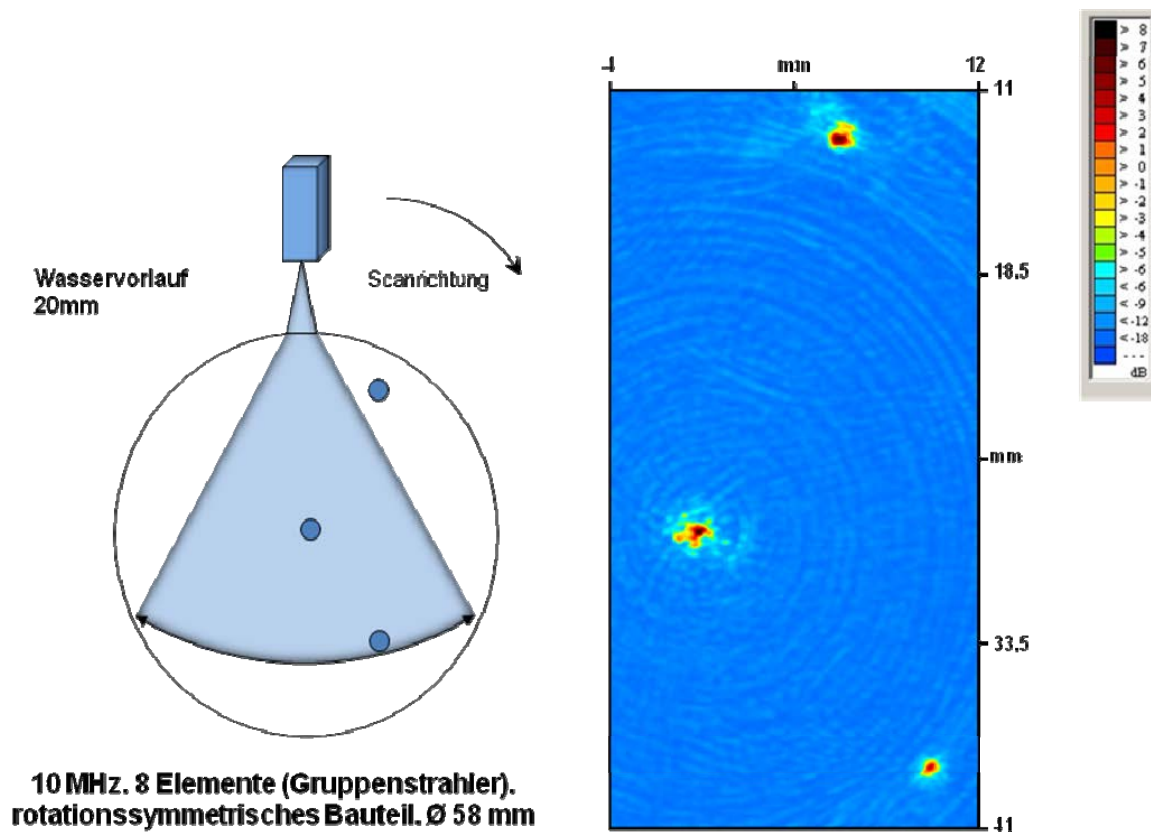
Ein qualitativ ähnliches Ergebnis erzielt man auch, wenn man bei der Messung nur ein Einzelelement nutzt, bei der Auswertung jedoch – wie zuvor für den Gruppenstrahler beschrieben – die gesamte Apertur aus schmalen Schallbündeln zusammensetzt (z.B. mit 5 ° Öffnung), für die jeweils die Schallaustrittspunktverschiebung und die Variation der Vorlaufstrecke berücksichtigt wird (Abb. 8). Dadurch spart man eine nachträgliche Korrektur für jeden einzelnen Bildpunkt und damit entsprechende Rechenzeiten.



**Abb. 8** SAFT-Rekonstruktion 10 MHz-Lineararray, ebenes Bauteil, 1 Einzelelement als "Gruppenstrahler", Bündelöffnung 5°, Kompensation der variablen Vorlaufstrecke für jeden "Schwenkwinkel", nicht aber für jeden Bildpunkt

## 1.2 Zylindrischer Testkörper

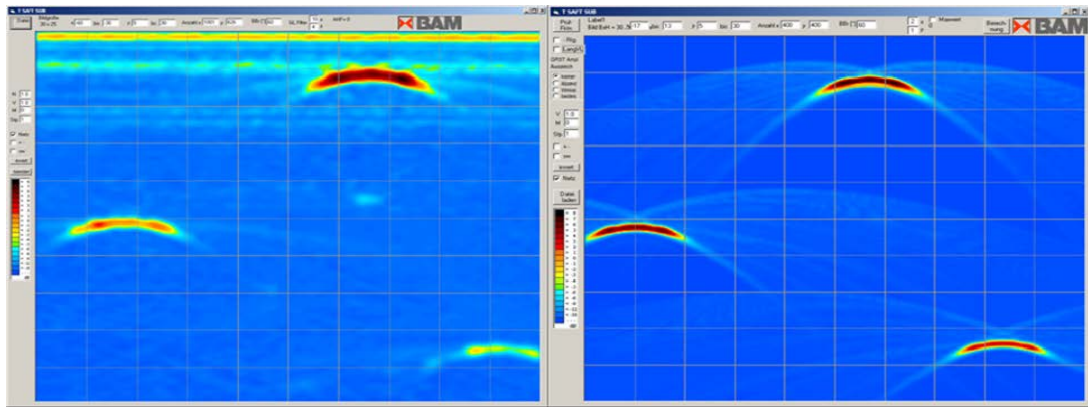
Die Ultraschalluntersuchungen am zylindrischen Bauteil erfolgten in gleicher Weise wie am ebenen Bauteil und es wurden dieselben Zusammenhänge ermittelt. Abb. 9 zeigt die SAFT-Rekonstruktion für den 8-Elemente-Gruppenstrahler. Auch ohne nachträgliche Korrektur der variablen Vorlaufstrecke für jeden einzelnen Bildpunkt werden durch den Einsatz des Gruppenstrahlers die Querbohrungen gut dargestellt. Die Anzeigenbreite liegt im oberflächennahen Bereich im Bereich der Wellenlänge.



**Abb. 9** SAFT-Rekonstruktion 10 MHz-Lineararray, zylindrisches Bauteil, Gruppenstrahler-prüfkopf mit 8 Elementen, Bündelöffnung  $5^\circ$ , Kompensation der variablen Vorlauf-strecke für jeden Schwenkwinkel, nicht aber für jeden Bildpunkt

### Vergleich mit Simulationsergebnissen

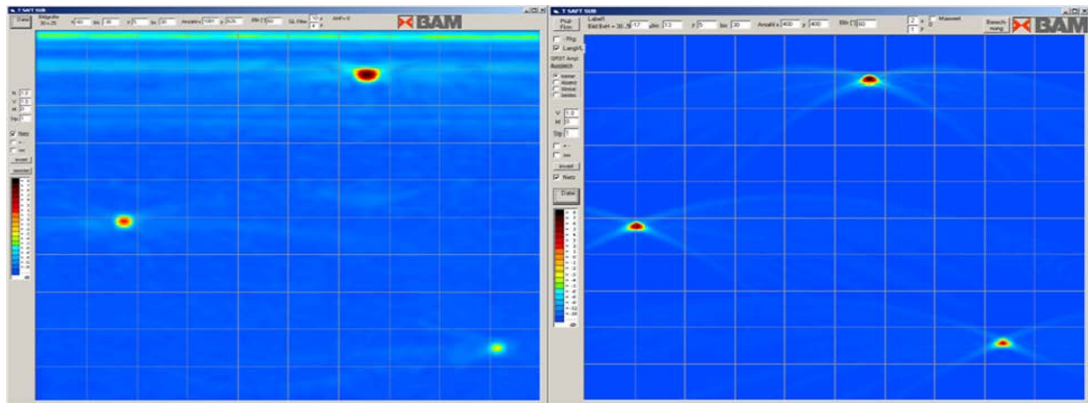
Zur Verifizierung unserer experimentellen Ergebnisse haben wir Simulationsrechnung in Anlehnung an die experimentellen Gegebenheiten durchgeführt. In den Abbildungen 10-12 sehen sie die Vergleiche der experimentellen und der simulierten SAFT-Rekonstruktionen für das Einzelelement ohne und mit Korrektur der variablen Vorlaufstrecke und den 8-Elemente-Gruppenstrahlerprüfkopf. Die Ergebnisse der Simulationen stimmen sehr gut mit unseren experimentell ermittelten Ergebnissen überein. Kleinere Abweichungen in der Ausdehnung oder der Echohöhe der Anzeigen beruhen darauf, dass es sich bei den Simulationen um den berechneten Idealfall handelt – den idealen Reflektor, das ideale Schallfeld, die ideale Justierung. Bei den Messungen spielt der Faktor Mensch eine große Rolle, z.B. bei der Fertigung der Testreflektoren und der Durchführung der Messungen. Kleine Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit, der Schallwegjustierung oder der Bestimmung der Bauteilkrümmung bei zylindrischen Bauteilen haben Einfluss auf das Ergebnis der SAFT-Rekonstruktion.



**SAFT Messung**

**SAFT Simulation**

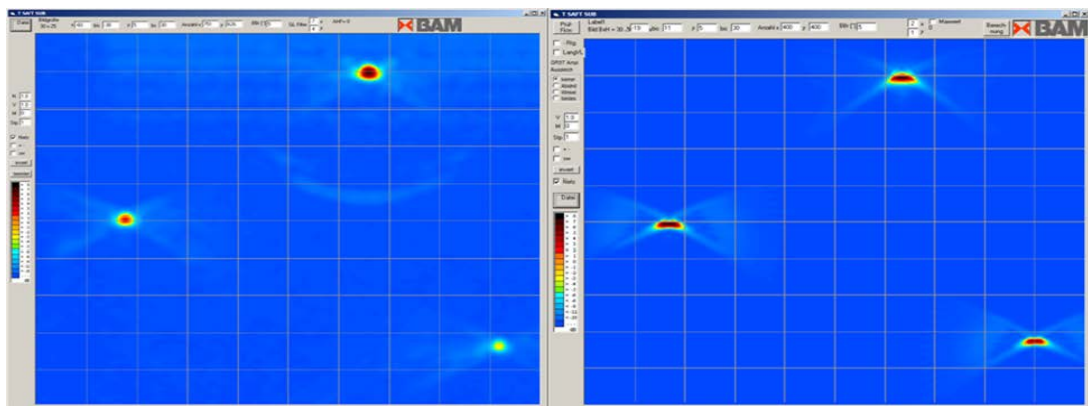
**Abb. 10** SAFT-Rekonstruktionen 10 MHz-Lineararray Messung vs. Simulation, 1 Element, ohne Kompensation der variablen Vorlaufstrecke



**SAFT Messung**

**SAFT Simulation**

**Abb. 11** SAFT-Rekonstruktionen 10 MHz-Lineararray Messung vs. Simulation, 1 Element, mit Kompensation der variablen Vorlaufstrecke



**SAFT Messung**

**SAFT Simulation**

**Abb. 12** SAFT-Rekonstruktionen 10 MHz-Lineararray Messung vs. Simulation, 8 Element-Gruppenstrahler, Kompensation der variablen Vorlaufstrecke für jeden Schwenkwinkel



### 3D-Lokalisation mit Matrixarray

Ein einfacher Weg zum räumlichen Lokalisieren von Echoquellen bzw. Testreflektoren ist die Auswertung eines 2D-Sektorscans eines Matrixarrays und dessen dreidimensionaler Darstellung. In der Arbeitsgruppe 8.41 für Geräteentwicklung der BAM wurde das Gruppenstrahlergerät COMPAS XL mit 256 Kanälen zur Ansteuerung von Gruppenstrahlerprüfköpfen entwickelt (Abb. 13 links). Dieses Gerät ermöglicht durch die gezielte Ansteuerung eines Matrixarray mit insgesamt 60 Elementen den 2D-Sektorscan einer Bauteilfläche ohne Prüfkopfbewegung. Die Untersuchungen wurden mit einem 2,25 MHz-Matrixarray auf einem 25 mm Plexiglasvorlaufkeil (Abb. 13 rechts oben) an einem Testkörper aus Vergußmasse durchgeführt. In dieser Vergußmasse befinden sich drei eingebettete Stahlkugeln jeweils mit einem Durchmesser von 1,2 mm als Testreflektoren (Abb. 13 rechts unten).



Abb. 13 Gruppenstrahler Gerät COMPAS XL (links), Matrixarray 2,25 MHz mit 10x6 Elementen (rechts oben), Prüfobjekt Vergußmasse mit eingebetteten Stahlkugeln (rechts unten)

Der schematische Versuchsaufbau ist in Abb. 14 dargestellt. Durch die Fokussierung aller 60 Elemente des Matrixarrays auf 356 verschiedene Fokuspunkte im Raum wird eine zwei-dimensionale Prüffläche von 20 x 8 mm Größe mit einem Messpunktabstand von 1mm in X- und 2 mm in Y-Richtung abgescann, ohne dass dafür der Prüfkopf bewegt wird.

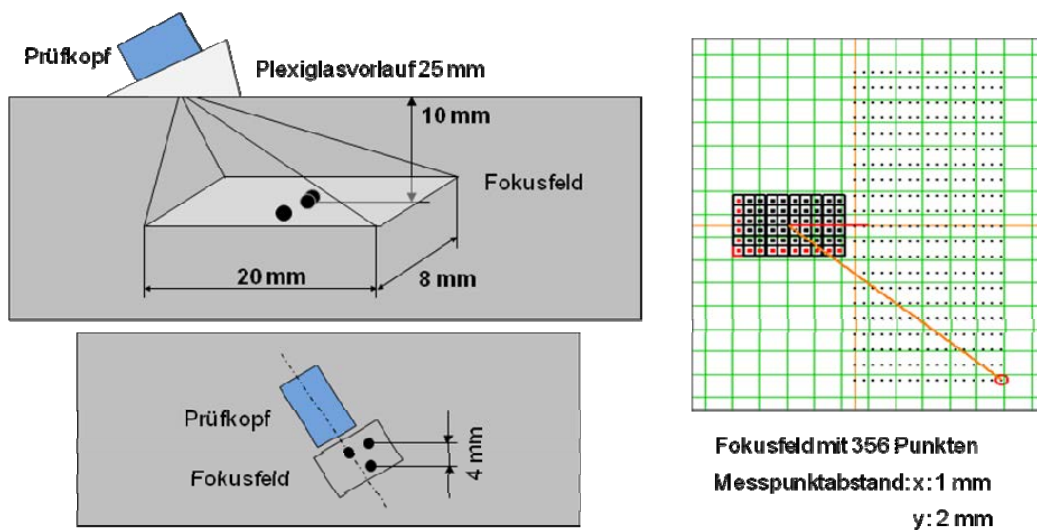


Abb. 14 Untersuchung an drei Stahlkugeln eingebettet in Vergußmasse mit Matrixarray, Fokusfeld ohne Prüfkopf-Verschiebung

Die Darstellung erfolgt in dreidimensionalen C-Bildern, wie in Abb. 15 abgebildet. Die Stahlkugeln sind klar dargestellt und können dreidimensional lokalisiert werden.

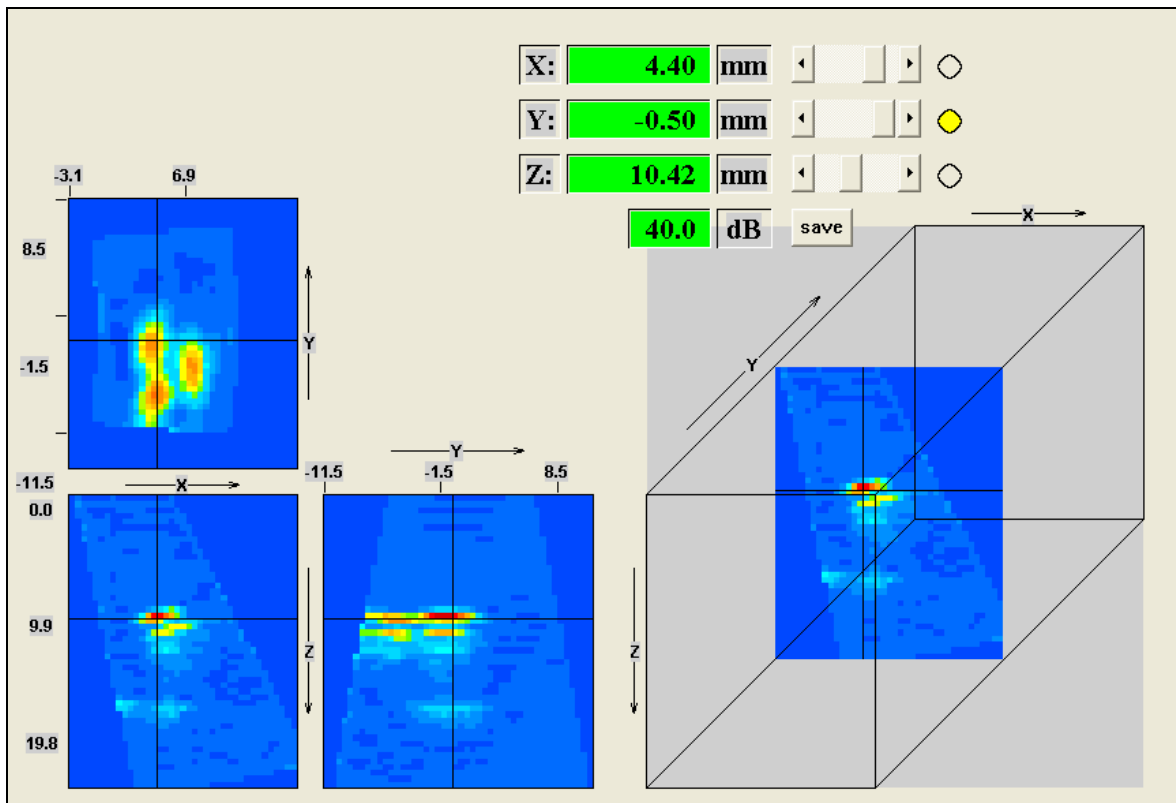


Abb. 15 Auswertung, C-Bilder in dreidimensionaler Darstellung

Eine weitere Möglichkeit zur Lokalisation von Testreflektoren mit Matrixarrays ist das lineare Abscannen des Bauteils mit aufgespannter Fokusebene. Es wurden Untersuchungen an einem Stahltestkörper mit vier Querbohrungen unterschiedlichen Durchmessers durchgeführt. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Form einer Mittelwertbildung über alle aufgenommenen B-Bilder und zeigt in diesen Untersuchungen, dass die vier Querbohrungen klar dargestellt werden (Abb. 16).

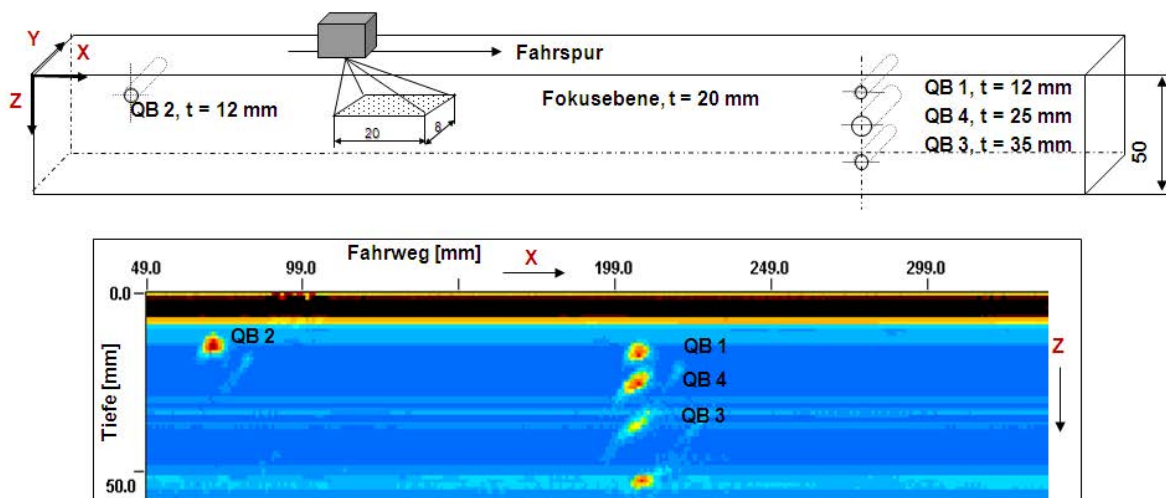


Abb. 16 Untersuchungen an Stahl linearer Scan mit aufgespannter Fokusebene, Mittelwert der B-Bilder, Seitenansicht

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Der schon seit Jahren bekannte SAFT-Algorithmus wurde auf Ultraschalltauchtechnikmessdaten für ebene und zylindrische Bauteile erweitert bzw. angepasst. Dabei ist beim Einzelelement bzw. den kleinen Standardprüfkopf eine Korrektur der variablen Vorlaufstrecke aufgrund des Wasservorlaufes für jeden einzelnen Bildpunkt in der SAFT-Rekonstruktion notwendig. Beim Einsatz der Gruppenstrahlertechnik ist diese nachträgliche Korrektur nicht nötig, da hier schon im Voraus die Schallaustrittspunktverschiebung und der variable Vorlauf in Abhängigkeit vom Schwenkwinkel Berücksichtigung finden. Das spart Rechenzeit und durch den Einsatz von Gruppenstrahlerprüfköpfen erhöht sich das Signal-Rausch-Verhältnis. Durch den Einsatz von Matrixarrays ist auf einfache Weise eine dreidimensionale Lokalisation von Testreflektoren sowohl ohne als auch mit Prüfkopfbewegung möglich. Durch mäanderförmiges Abscannen der Bauteiloberfläche wäre eine 3D-SAFT-Rekonstruktion möglich. Die Untersuchungen dazu dauern noch an.

## Referenzen

- [1] T. Hauser, H.-J. Montag, R. Boehm, U. Voelz: Vergleich von Rekonstruktionsverfahren auf der Basis von Gruppenstrahler-Ultraschalldaten“, DGZfP Jahrestagung, Bamberg 1998
- [2] Tschardtke, Dirk: Fehlerdiagnose in der Ultraschallprüfung durch iterative Modellierung. Dissertation, TU Berlin, D83, 2002 ([http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2002/487/pdf/tschardtke\\_dirk.pdf](http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2002/487/pdf/tschardtke_dirk.pdf))
- [3] Boehm R., Brackrock D., Kitz J., Brekow G., Kreutzbruck M., BAM Berlin: “Advanced crack shape analysis using SAFT”, progress in Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 29A, pp. 814-821, 2010
- [4] Doctor S.R., Hall T.E., Reid L.D.: ”SAFT - the evolution of a signal processing technology for ultrasonic testing, MDT International, Vol. 19, Issue 3, pp 163-167, 1986
- [5] Schenk G., Völz U., Dohse E., BAM Berlin, Bauer L., ASIC Design Werder: “COMPASXL - Outstanding number of channels with a new phased array system”, Proceedings of ECNDT, 2006