Quantitative Ultraschallprüfungen an anisotropen Materialien mittels Sampling Phased Array Technik

Sergey PUDOVIKOV, Andrey BULAVINOV, Roman PINCHUK, Ramanan SRIDARAN VENKAT

Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren
Campus E 3.1 D-66123 Saarbrücken

Kurzfassung. Die am Fraunhofer-IZFP durchgeführte Entwicklung einer neuartigen Gruppenstrahlertechnik – des getakteten Gruppenstrahlers („Sampling Phased Array“) – hatte zum Ziel, eine aussagekräftige zwei- und dreidimensionale Fehlerbildrekonstruktion auch bei hohen Prüfgeschwindigkeiten zu realisieren sowie die Prüfbarkeit von akustisch anisotropen Werkstoffen zu ermöglichen. Der vorliegende Artikel präsentiert das Prinzip und die Ergebnisse der Ultraschallprüfung mittels getakteter Gruppenstrahlertechnik mit Echtzeit-Rekonstruktion von zwei- und dreidimensionalen Bildern und zeigt die Vorteile und das Potential der quantitativen Bildgebung speziell bei Prüfungen an akustisch anisotropen Materialien wie Kohlefaserwerkstoffe und austenitische Schweißnähte, auch mit unbekannte Anisotropie.

1. Einführung

Die akustischen ZfP-Verfahren sind neben Durchstrahlungsmethoden die einzigen zerstörungsfreien Prüfverfahren, die den Nachweiß von Materialungänzen in massiven Bauteilen ermöglichen. In vielen Fällen können diese Komponenten aus Gründen der großen Wandstärken jedoch nicht durchstrahlt werden. Die zerstörungsfreie Prüfung mit Ultraschall stellt damit ein in vielen Fällen notwendiges Prüfverfahren in der Qualitätsprüfung von Bauteilen und Komponenten dar.

Manche Materialien, die aufgrund ihrer hochwertigen mechanischen Eigenschaften bei der Konstruktion von Komponenten mit erhöhten Sicherheitsanforderungen verwendet werden (beispielsweise, Schweißnähte von austenitischen Stählen, Kohlefaserwerkstoffe u.a.), gehören im Bezug auf die Ultraschallprüfung zu den „schwerprüfbaren“ Werkstoffen. Bei der Herstellung von solchen Materialien entsteht eine ausgeprägte Materialtextur, die die Richtungsabhängigkeit der akustischen Eigenschaften verursacht [1]. Dieses Phänomen, bekannt als akustische Anisotropie, bedingt eine Abweichung der Ausbreitungsrichtung von Ultraschallwellen von dem gewünschten Einschallwinkel. Dies als Folge, kann zu einer falschen Bewertung von Ultraschallanzeigen führen.

Obwohl dieses Prüfproblem seit vielen Jahren das Thema mehrerer F&E-Projekte war [2], [3], [4], kommen in der industriellen Prüfpraxis keine Techniken zum Einsatz, die die Materialanisotropie bei der Auswertung von Ultraschallprüfergebnisse berücksichtigen. Der typische Weg, den man stattdessen in der Praxis nimmt, besteht im Einsatz von

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de

mehreren Prüfköpfen mit unterschiedlichen Einschallwinkeln, Frequenzen und Wellenarten [5]. Die moderne Art, das zu machen, ist die Verwendung der Phased Array Technik. Die elektronische Schallfeldsteuerung reduziert die Anzahl der Prüfköpfe, und damit die Komplexität der Prüfsysteme und Prüfprozeduren. Allerdings erfolgt die elektronische Schallfeldsteuerung unter Annahme einer konstanten Schallgeschwindigkeit. Dies kann wiederum zu einer falschen Bewertung der Anzeigen führen.

Die am Fraunhofer Institut durchgeführte Entwicklung einer neuartigen Gruppenstrahlertechnik – des getakteten Gruppenstrahlers (‚Sampling Phased Array') – hatte zum Ziel, eine aussagekräftige zwei- und dreidimensionale Fehlerbildrekonstruktion auch bei hohen Prüfgeschwindigkeiten zu erreichen sowie die Prüfbarkeit von akustisch anisotropen Werkstoffen zu ermöglichen. Der aktuelle Beitrag präsentiert die letzten Entwicklungsergebnisse der Sampling Phased Array Technik im Bezug auf die Prüfung von Werkstoffen mit unbekannter Anisotropie.

2. Sampling Phased Array mit inverser Phasenanpassung

2.1 Das Prinzip des Getakteten Gruppenstrahlers (Sampling Phased Array). Datenerfassung und Rekonstruktion.

In einem Sende-/Empfangsvorgang des konventionellen Gruppenstrahlers sind in der Regel alle Elemente des Arrays sowohl als Sender als auch als Empfänger beteiligt. Analysiert man den Informationsgehalt der von den einzelnen Gruppenstrahlerelementen gemessenen Zeitsignale [6], so erkennt man, dass durch die phasengesteuerte Anregung und Addition dieser Signale der größte Teil davon verloren geht. Die heutigen Möglichkeiten der schnellen Datenerfassung, Speicherung und Verarbeitung erlauben es jedoch, die einzelnen Zeitsignale der »Informationsmatrix« eines Gruppenstrahlers vollständig zu messen. Technisch wird dies dadurch realisiert, dass nur ein Element sendet, alle anderen Elemente empfangen und diese Zeitsignale abgespeichert werden. Sendet das i-te Element, entspricht dies den Elementen Aij(t) mit j=1..N der Informationsmatrix (Abbildung 1). (i: sendendes Element, j: empfangendes Element, N: Anzahl der Elemente eines linearen Gruppenstrahlers). Nach N Takten ist die Informationsmatrix voll – sie enthält die gemessenen Zeitsignale von allen Kombinationen von Sendern und Empfängern.

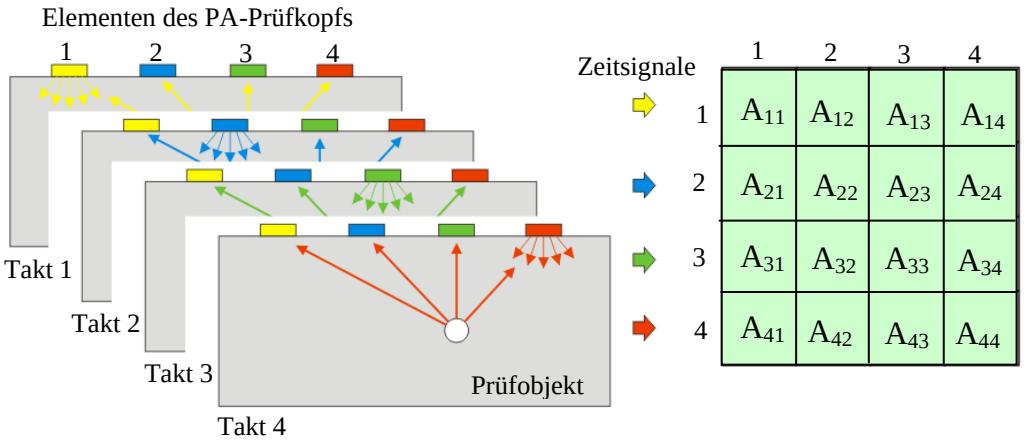

Abbildung 1: Das Prinzip des Getakteten Gruppenstrahlers und die Informationsmatrix eines Phased Array Prüfkopfs mit vier Elementen

Die für jede Prüfkopfposition bzw. Arrayelemente gespeicherten US-Laufzeitsignale dienen als Eingangsdaten für die tomographische Rekonstruktion. Die Bildrekonstruktion erfolgt nach dem SAFT-Algorithmus [7]. Weil das Schallfeld jedes Arrayelements sehr divergent ist, enthält jeder A-scan (Laufzeitsignal) überlagerte Echosignale von verschiedenen Reflektoren gleichzeitig. Der rekonstruierte Bereich stellt eine Ebene senkrecht zur Oberfläche des untersuchten Objekts dar. Das entsprechende Bild wird als Sektor-Bild oder Sektor-Scan bezeichnet. Für jedes Pixel innerhalb dieser Fläche wird die Schalllaufzeit von der aktuellen Prüfkopfposition zu diesem Objektpixel und zurück berechnet. Dann wird die zu diesem Pixel gehörige Amplitude auf die bereits für diese Pixelkoordinate aus anderen Prüfkopfpositionen gespeicherten Amplituden aufaddiert [8]. Weil das Schallfeld nicht physikalisch für einzelne Einschallwinkel, sondern virtuell im Rechner für den gesamten Winkelbereich ausgebaut wird, führt die Sampling Phased Array Technik zur wesentlichen Beschleunigung der Ultraschallprüfung. Außerdem erfolgt durch den SAFT-Algorithmus eine synthetische Fokussierung in gesamtem Nahfeld des Ultraschallwandlers.

2.2 Inverse Phasenanpassung in einem anisotropen homogenen Medium

Außer der Beschleunigung des Prüfvorganges sowie einer verbesserten Empfindlichkeit und eines höheren Auflösungsvermögen im physikalischen Nahfeld, hat die Sampling Phased Array Technik einen weiteren wesentlichen Vorteil. Durch ihr Messprinzip gestattet sie die Aufnahme von „unverfälschten“ Ultraschall-Elementarwellen und, bei entsprechender Simulation der Schallausbreitung, auch die Fokussierung in einem anisotropen und/oder inhomogenen Werkstoff. Diese Technik der inversen Phasenanpassung (‚Reverse Phase Matching’) bringt eine wesentliche Verbesserung des Fehlernachweisvermögens bei der Prüfung von Werkstoffen mit bekannter Anisotropie [9].
Die akustischen Eigenschaften eines anisotropen Mediums charakterisieren sich u.a. durch zwei Schallgeschwindigkeiten für jede Wellenart. Die Phase der Ultraschallwelle breitet sich mit der sogenannten Phasengeschwindigkeit $\mathbf{C_{ph}}$ unter einem Phasenwinkels θ aus, die akustische Energie – mit Energiegeschwindigkeit (Gruppengeschwindigkeit) $\mathbf{C_{gr}}$ unter einem Gruppenwinkels φ. Die Amplituden und Differenzwinkel der beiden Geschwindigkeiten hängen von der Steifigkeitsmatrix des Werkstoffs ab.
Werden die gemessenen Zeitsignale unter Nutzung der Schallgeschwindigkeit nach SAFT-Algorithmus ins Volumen zurück propagiert, entsteht das sogenannte Sampling Phased Array Sektor-Bild mit synthetischer Fokussierung in jedem Volumenpunkt. Man spricht über die inverse Phasenanpassung, wenn diese Ultraschallbildrekonstruktion unter Berücksichtigung der Richtungsabhängigkeit der akustischen Eigenschaften durchgeführt wird. Im einfachsten Fall eines anisotropen homogenen Mediums (z.B. Kohlefaserstrukturen mit einer Phasenorientierung oder metallische Monokristalle) besteht die inverse Phasenanpassung in einer relativ einfachen winkelabhängigen Korrektur des Schallgeschwindigkeitswertes bei der Berechnung der Ultraschalllaufzeiten zu einzelnen Volumenpunkten.

2.3 Inverser Phasenanpassung in einem inhomogenen Medium

Die meisten anisotropen Werkstoffe in der Prüfpraxis weisen neben der akustischen Anisotropie eine inhomogene Struktur auf. Das typische Beispiel dafür sind austenitische Schweißnähte. Während des Schweißprozesses bilden sich im Schweißgut sogenannte Stengelkristalle. Ihre Wachstumsrichtung ist in der Regel durch die Richtung der Wärmeableitung oder auch der Erdanziehungskraft bestimmt. So entsteht ein anisotropes inhomogenes Gefüge mit einer charakteristischen Textur.

Im Gegensatz zu homogenen Materialien breitet sich die Ultraschallwelle in solchen Strukturen nicht geradlinig aus, da die Wellenfront an den Grenzen der Stengelkristalle der Brechung unterliegt. Zur Berechnung von korrekten Laufzeitwerten von jedem Gruppenstrahlerelement zu jedem Volumenpunkt (x,y) werden sowohl der Schallpfad als auch die Schallgeschwindigkeit entlang dieses Pfad benötigt (Abbildung 2).

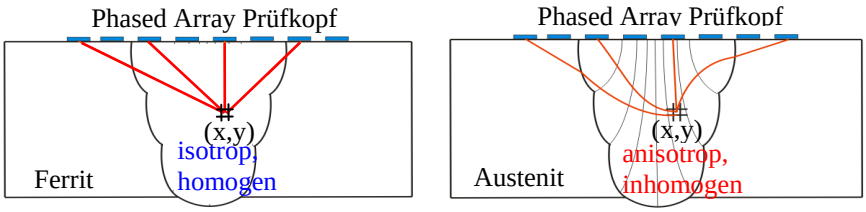

Abbildung 2: Berechnung der Laufzeit von Phased Array Elementen bis zum Pixel (x,y) für ferritische und austenitische Schweißnähte

2.4 Modellierung der Schallausbreitung in austenitischen Schweißnähten

Sind sowohl die akustischen Eigenschaften (Steifigkeitsmatrix), als auch die Schweißnahtstruktur bekannt, besteht die Möglichkeit, die Ultraschallausbreitung durch das Schweißgut zu modellieren und damit die Laufzeiten von Ultraschallwandlern zu jedem Volumenpunkt zu berechnen. Für die Simulation der Schallausbreitung in anisotropen inhomogenen Medien kann man verschiedene Methoden verwenden, wie z.B., Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT) [10], Generalisierte Punktquellensynthese (GPSS) [11] u.a. Eine der einfachsten und zugleich schnellsten Modellierungsmethoden ist das „Ray Tracing“ – Schallstrahlverfolgung unter Berücksichtigung des Brechungsgesetzes, die in ihrer einfachsten Ausführung keine Amplitudenwerte berücksichtigt. In Kombination mit weiteren Simulationsansätzen kann diese Einschränkung jedoch umgegangen werden [12].
Für die Simulation der Schallausbreitung im anisotropen inhomogenen Medium wurde ein „Ray Tracing“-Algorithmus entwickelt, der eine Kalkulation der Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten unter Berücksichtigung der Schallbrechung erlaubt. Der Algorithmus basiert auf folgenden Annahmen:

- Stengelkristalle einer austenitischen Schweißnaht werden als ein sogenanntes transversal-isotropes Medium (TI) betrachtet. Die Anzahl von elastischen Konstanten zur Beschreibung eines solchen Mediums reduziert sich von 27 (allgemeiner Fall) auf fünf. Sind diese Konstanten bekannt, besteht die Möglichkeit, die Phasengeschwindigkeit $\mathbf{C_{ph}}$ und die Gruppengeschwindigkeit $\mathbf{C_{gr}}$ für einen vorgegebenen Phasenwinkel $\boldsymbol{\theta}$ und entsprechenden Gruppenwinkel $\boldsymbol{\varphi}$ zu berechnen (Abbildung 3).

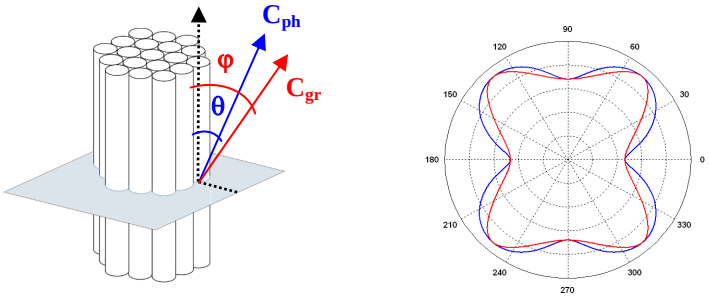

Abbildung 3: Richtungsabhängigkeit der Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten von entsprechenden Phasen- und Gruppenwinkeln in einem TI-Medium

- Die zweite Annahme besteht darin, dass die inhomogene Struktur einer austenitischen Schweißnaht auf Zonen aufgeteilt („geclustert“) werden kann, wo die Stengelkristalle annäherungsweise gleichorientiert sind (Abbildung 4). Diese Zonen betrachtet man als transversal-isotrop. Die Stengelkristalle in verschieden Zonen unterscheiden sich lediglich durch die Orientierung ihrer akustischen Achse. Ihre elastischen Eigenschaften (Werte der Steifigkeitsmatrix) bleiben gleich.

Die Berechnung der entsprechenden Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten und der Brechung der Schallstrahlen an Zonengrenzen erfolgt nach [13].

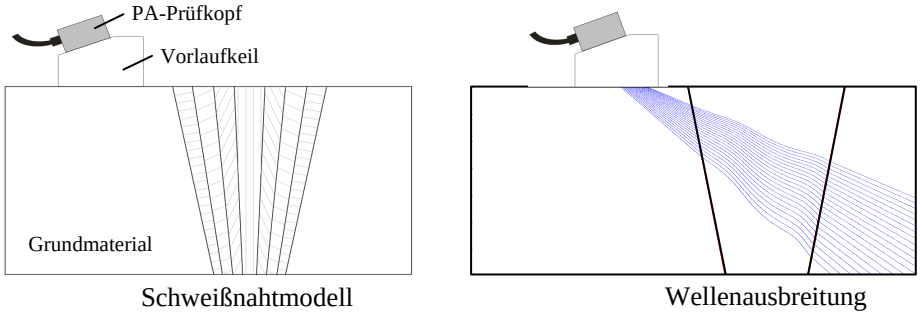

Abbildung 4: Ray Tracing Simulation der Schallausbreitung durch die Schweißnaht

Durch Anwendung der Simulation können sämtliche Laufzeiten von Gruppenstrahlerelementen zu jedem Volumenpunkt berechnet und gespeichert werden. Für die spätere Rekonstruktion stehen sie in einem schnellen Look-Up Tabelle zur Verfügung.

3. Sampling Phased Array mit inverser Phasenanpassung an einer Schweißnaht mit unbekannter Anisotropie

3.1 Iterative Anpassung der elastischen Eigenschaften

Eine korrekte Berechnung der Laufzeiten für die Sampling Phased Array Rekonstruktion ist nur dann möglich, wenn sowohl die Gefügestruktur, als auch die elastischen Eigenschaften des Mediums bekannt sind. Während die Werkstoffstruktur durch den Fertigungsprozess vorgegeben (Kohlefaser) oder unterstellt wird (Schweißnaht) bzw. durch einen Schliffbild ermittelt werden kann, sind die Werte der Steifigkeitsmatrix in der Regel unbekannt.

Die im Fraunhofer-IZFP entwickelte „**G**radient **E**lastic **C**onstants **D**escent **M**ethode“ (GECDM) gestattet eine automatische Ermittlung der elastischen Konstanten an einer Schweißnaht mit angenommener Kristallinen-Struktur. Der Ansatz besteht in der inversen Anpassung der elastischen Eigenschaften. Als Optimierungskriterium dient dabei die ortsgetreue Rekonstruktion eines Modellreflektors im Vergleichskörper, dessen genaue Lage und Größe bekannt sind.

Zunächst erfolgt die Simulation der Wellenausbreitung mit angenommenen (falschen) elastischen Konstanten. Anhand berechneter Laufzeitwerten wird ein Ultraschall-Sektorbild berechnet. Da die elastischen Konstanten falsch sind, erscheint die Ultraschallanzeige von dem bekannten Reflektor unscharf und an einer falschen Position. Nach dem GECDM-Verfahren werden die elastischen Konstanten iterativ solange angepasst (Abbildung 7), bis die Anzeige im Sektorbild ihre richtige Position (von A nach B) und die Amplitude und der Kontrast der Anzeige optimale Werte erreicht haben.

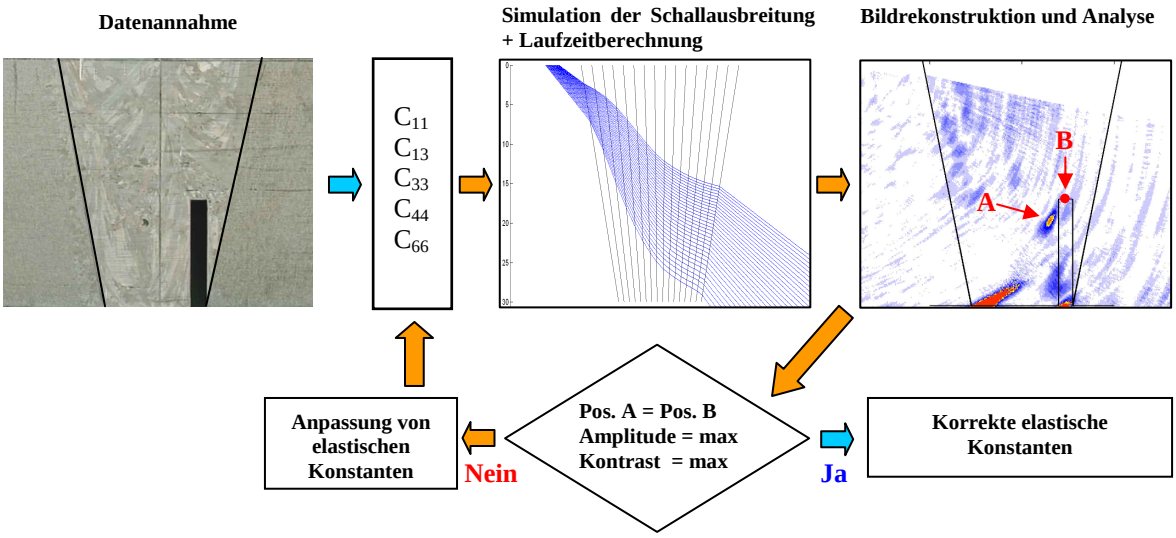

Abbildung 5: Iterative Gradient Elastic Constants Descent Method

Anhand mehrerer Proben mit unterschiedlichen Schweißnahtstrukturen und Fehlerlagen wurde validiert, dass die durch das GECDM-Verfahren ermittelten elastischen Eigenschaften der Schweißnähte den realen Werten entsprechen.

3.2 Mögliche Prüfstrategien

Im Bezug auf Verwendung der SPA-Technik für praktische Aufgaben unterscheiden wir zwischen drei möglichen Prüfstrategien:

- Der einfachste Fall tritt auf, wenn sowohl die elastischen Eigenschaften der Stengelkristalle, als auch die Gefügestruktur bekannt sind. In diesem Falle können durch eine relativ einfache Schallausbreitungssimulation können korrekte Prüfergebnisse an austenitischen Schweißnähten erzielt werden.
- Sind elastischen Eigenschaften einer Schweißnaht unbekannt sind, kann aber die Gefügestruktur an einem gleichartig geschweißten Vergleichskörper ermittelt bzw. anhand des Schweißverfahrens angenommen werden, kommt die GECDM zum Einsatz. Die Methode gestattet, anhand eines bekannten Reflektors die elastischen Konstanten der Schweißnaht zu ermitteln und damit eine korrekte Bildrekonstruktion durchzuführen.
- Im schwierigsten Fall liegen weder Informationen über das Schweißnahtgefüge vor, noch kann man diese ermitteln. So müssen alle Modelparameter, d.h. sowohl die Schweißnahtstruktur, als auch die elastischen Eigenschaften variiert werden, bis das bestmögliche Ergebnis erzielt wird.

4. Prüfergebnisse

Die Sampling Phased Array Technik mit Berücksichtigung der Materialanisotropie wurde an mehreren Testkörpern mit künstlichen und realen Fehlern validiert. In Abbildung 6 sind die Ultraschall-Sektorbilder an einer von vielen untersuchten Schweißnahtproben (Abb. 6a) dargestellt. In das Schweißgut wurde ein künstlicher Fehler (Nut) eingebracht. Abbildung 6b stellt das Sektorbild der konventionellen phasengesteuerten Phased Array Technik dar, aufgenommen unter Annahme einer konstanten Schalgeschwindigkeit. Für ein besseres Verständnis der Prüfergebnisse ist in den Bildern der Schweißnahtumriss eingeblendet. Abbildung 6c zeigt das SPA-Bild ohne Berücksichtigung der Materialanisotropie.

Aus dem SPA-Sektorbild, welches anhand der GESDM-Algorithmus ermittelten elastischen Konstanten rekonstruiert wurde, können sowohl die Lage, als auch die korrekten Abmessungen des künstlichen Fehlers bestimmt werden (Abb. 6d).

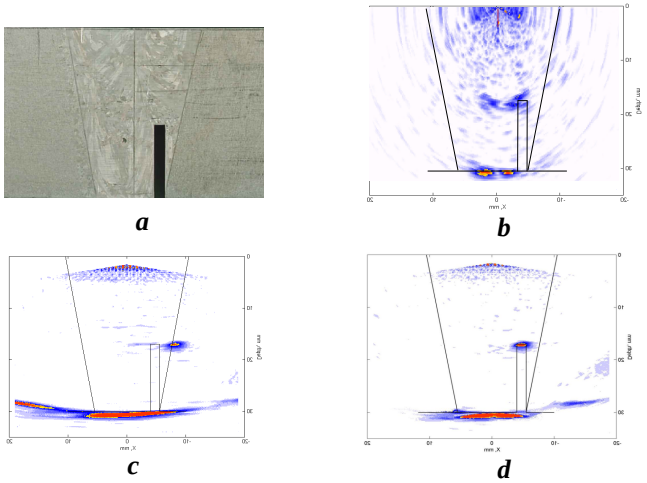

Abbildung 6: Sektorbilder, aufgenommen an einer austenitischen Schweißnaht (a) mit konventioneller PA Technik (b), SPA (c), SPA mit Anisotropieberücksichtigung (d)

5. Dreidimensionale Bildgebung der Schweißnaht

Durch eine zweidimensionale Abtastung des Prüfobjektes und den Aufbau einer synthetischen Apertur kann der physikalisch realisierbare Fokusbereich der SPA-Technik erweitert und eine quantitative Fehlerbewertung in allen drei Raumdimensionen durchgeführt werden. Im Fall eines anisotropes Werkstoffes muss die Sektorbildrekonstruktion unter Berücksichtigung der Simulationsergebnisse für jede Prüfkopfposition erfolgen. Die so genannten Look-Up Tabellen, wo die Laufzeiten zu jedem Volumenpunkt für jedes Element des Wandlerarrays gespeichert sind, können im Vorfeld berechnet werden, sodass die 3D-Bildrekonstruktion in Echtzeit erfolgen kann.

Ein Systemprototyp für die Schweißnahtprüfung mittels SPA-Technik (Abb. 9a) besteht aus einem 2-Axen-Prüfmanipulator, einer Prüfstation mit Ultraschall-Elektronik und Motorsteuerung, sowie einer Prüf- und Visualisierungssoftware für 2D und 3D Echtzeit-Bildgebung. Abbildung 9b repräsentiert 3D-Prüfergebnisse an einer Schweißnaht mit Bindefehlern. Mittels dreidimensionaler Volumenabbildung kann man die realen Abmessungen des Fehlers quantitativ ermitteln.

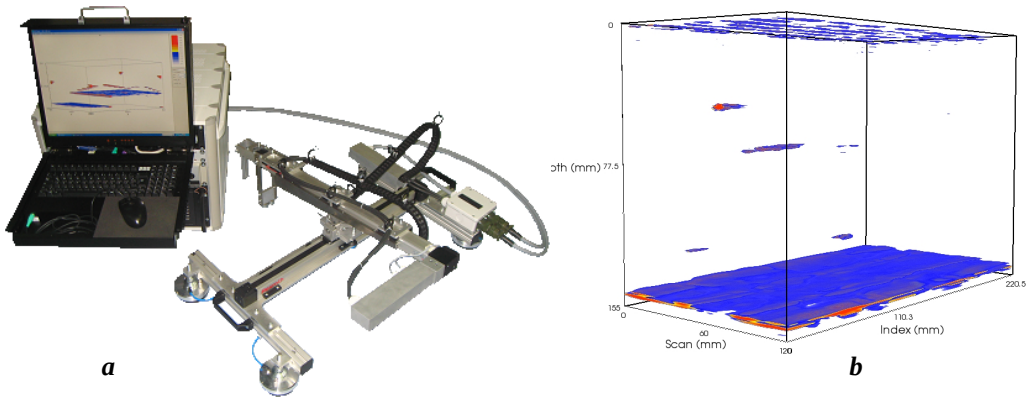

Abbildung 9: Systemprototyp für quantitative Ultraschallprüfung (a)

Dreidimensionale Darstellung der Prüfergebnisse (b)

6. Zusammenfassung

Das Sampling Phased Array Verfahren mit inverser Phasenanpassung bietet einen prüftechnischen Ansatz zur quantitativen Fehlerprüfung an Objekten mit unbekannter Gefügestruktur und elastischen Eigenschaften.

Die **G**radient **E**lastic **C**onstants **D**escent **M**ethode ermöglicht die Ermittlung von korrekten elastischen Konstanten für anschließende inverse Phasenanpassung bei der Rekonstruktion von zwei- und dreidimensionalen Ultraschallbildern.

Durch den Aufbau der zweidimensionalen synthetischen Apertur und Berücksichtigung der nach der GECDM-Methode ermittelten Eigenschaften kann eine dreidimensionale Visualisierung des Prüfvolumens durchgeführt werden, die die quantitative Auswertung von Materialfehlern in allen drei Raumdimensionen ermöglicht.

Referenzen

[1] R. Boehm, T. Hauser, P. Le Gal, B. Rotter, A. Bleck, W. Hesselmann: Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in austenitischen Plattierungen; Aspekte zur anisotropen Schallausbreitung. Fortschr.-Ber. der Jahrestagung 1992 der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP), Fulda, 33.2, 1992

[2] J.A. Ogilvy: Computerized ultrasonic ray tracing in austenitic steel. NDT&E International, Vol.18, pp. 67-77, 1985

[3] R. Hannemann: Modeling and Imaging of Elastodynamic Wave Fields in Inhomogeneous Anisotropic Media. Dissertation, Universität Kassel, Kassel, 2001

[4] K.J. Langenberg, A. Shlivinski, R. Marklein, V. Schmitz, W. Müller, U. Mletzko: Fehlerabbildung in Mischschweißnähten mit einem angepassten SAFT-Algorithmus Fortschr.-Ber. der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP), Rostock, 2005

[5] E. Neumann: Ultraschallprüfung von austenitischen Plattierungen, Mischnähten und austenitischen Schweissnähten. Theorie und Praxis Regelwerk. Expertverlag, 1995

[6] A. Bulavinov: Der getaktete Gruppenstrahler. Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2005 Dissertation

[7] V. Schmitz, W.Müller, G.Schäfer: Synthetic Aperture Focussing Technique: state of the art. Acoustical Imaging, Vol.19, pp. 545-551, New York, 1992

[8] A. Bulavinov, M.Kröning, R.Pinchuk, K.M.Reddy: Echtzeit-3D-Bildgebung mittels der getakteten Gruppenstrahlertechnik für Ultraschallprüfanwendungen. Ber. der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP), Münster, 2009

[9] A. Bulavinov, M. Kröning, S. Pudovikov, R. Oster, R. Hanke, U. Hegemann, K.M.Reddy, R.S. Venkat: Application of Sampling Phased Array Technique for ultrasonic inspection of CFRP components. International Symposium on NDT in Aerospace. Fürth, 2008

[10] P. Fellinger, R. Marklein: EFIT – Elastodynamische Finite Integrationstechnikzur Modellierung der Abstrahlung, Ausbreitung und Beugung elastischer Wellen. DGZfP e.V., Berlin, 1990

[11] M. Spies: Transducer Field Modelling in Anisotropic Media by Superposition of Gaussian Base Functions. J. Acoust. Soc. Am., 105, pp. 633-638. 1999

[12] M. Sadri, M.A. Riahi: Ray tracing and amplitude calculation in anisotropic layered media. Geophys. J. Int. 180, pp.1170-1180, 2010

[13] M. A. Slawinski: On Elastic-wave Propagation in Anisotropic Media: Reflection/Refraction Laws, Raytracing,, and Traveltime Inversion. Dissertation. Calgary, Alberta, 1996