

# Bildgebendes Optimierungsverfahren zur quantitativen US-Prüfung an anisotropen und inhomogenen austenitischen Schweißverbindungen mit Bestimmung und Nutzung der elastischen Eigenschaften

Sergey PUDOVIKOV, Andrey BULAVINOV, Gerd DOBMANN, Roman PINCHUK

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

<http://www.izfp.fraunhofer.de/>

**Kurzfassung.** Zum Nachweis der Gebrauchseignung der Schweißverbindungen gehören unter anderem zerstörungsfreie Prüfungen. Diese Prüfungen sind Teil der Herstellungsvorschriften zum Nachweis der Fertigungsqualität und sind als wiederkehrende Prüfungen im Rahmen von Wartungsarbeiten durchzuführen, um betriebsbedingte Minderungen der Gebrauchseignung auszuschließen. Ein wichtiges Verfahren für den Nachweis der Fehler im Volumen ist die Ultraschallprüfung.

In mehreren Industriebranchen werden austenitische Stähle sowie ihre Schweiß- und Mischverbindungen eingesetzt. Aufgrund ihrer mechanisch-chemischen Vorteile werden diese u.a. in Konstruktionen mit höchsten sicherheitstechnischen Anforderungen verwendet, die häufig unter schwierigen Bedingungen eingesetzt werden und regelmäßig auf Fehler geprüft werden müssen. In Bezug auf die Ultraschallprüfung gehören aber die austenitischen Schweißverbindungen zu „schwer prüfbar“ Werkstoffen. Beim Schweißprozess entsteht in der Naht eine ausgeprägte Materialtextur, die die Richtungsabhängigkeit der akustischen Eigenschaften verursacht und das Fehlernachweisvermögen der konventionellen Ultraschallverfahren beschränkt.

Die am Fraunhofer Institut entwickelte Prüftechnik auf der Basis von Phased Array Prüfköpfen – „Sampling Phased Array“ – ermöglicht Fehlernachweis und quantitative Fehleranalyse unter anderem in akustisch anisotropen und/oder inhomogenen Werkstoffen. Der Prüftechnik liegt das erweiterte Prinzip der synthetischen Fokussierung (SAFT) mit Berücksichtigung der Materialanisotropie und –inhomogenität (inverse Phasen Anpassung) zugrunde.

Da in der Regel die Materialanisotropie unbekannt ist, wurde zusätzlich ein Algorithmus zur automatischen Suche der elastischen Eigenschaften entwickelt. Die neuartige Prüftechnik gestattet quantitative Ultraschallprüfung von austenitischen Schweiß- und Mischverbindungen in einem Durchgang mit ortsgetreuer zwei- und dreidimensionaler Darstellung der Prüfergebnisse und zuverlässiger Aussage zu Fehlergröße, -Art und -Lage.

## **Einführung**

Zum Nachweis der Gebrauchseignung der Schweißverbindungen gehören neben stichprobenweise an Verfahrensproben zerstörend durchgeführten mechanisch-technologischen Prüfungen (Festigkeit, Zähigkeit) unter anderem auch zerstörungsfreie Prüfungen. Die zuletzt genannten Prüfungen sind Teil der Herstellungsvorschriften zum Nachweis der Fertigungsqualität und sind als wiederkehrende Prüfungen im Rahmen von Wartungsarbeiten durchzuführen, um betriebsbedingte Minderungen der Gebrauchseignung auszuschließen. Insbesondere für Primärkreis-Komponenten sind in den Regelwerken detaillierte Prüfvorschriften entwickelt worden, die mit hoher Empfindlichkeit jeden denkbaren Fehler nachweisen. Beispielhaft seien das KTA (kerntechnischer Ausschuss)-Regelwerk zitiert [1]. Die hohe Empfindlichkeit und der Umfang der Prüfungen sollen gewährleisten, dass die nachweisbaren Materialunzulänglichkeiten wesentlich kleiner sind, als die unter den betrieblichen Lastbedingungen und Störlastbedingungen kritischen Fehler, welche die zum Versagen der Komponenten führenden Fehler sind. Diese hohen prüftechnischen Anforderungen sind derzeit für austenitische und Mischnähte nur bedingt erreichbar. Gründe liegen zum einen in der Neigung zur Grobkörnigkeit des Grundwerkstoffes (was zur Schallschwächung durch Streuung verstärkt beiträgt), zum anderen im Erstarrungsgefüge des Schweißgutes, was sich in der akustischen Anisotropie bemerkbar macht, den Schallstrahl verformt und das Schallfeld deformiert. Bei dem Schweißprozess entsteht eine ausgeprägte Materialtextur, die die Richtungsabhängigkeit der akustischen Eigenschaften hinsichtlich Schallgeschwindigkeit, Polarisation und Modenkonversionseffekten verursacht. Dieses Phänomen, bekannt als akustische Anisotropie, bedingt eine Abweichung der Ausbreitungsrichtung von Ultraschallwellen von dem gewünschten Einschallwinkeln. Dies kann in der Folge zu einer falschen Bewertung von Ultraschallanzeigen führen.

## **1. Sampling Phased Array an anisotropen Materialien**

### *1.1 Das Prinzip der Sampling Phased Array*

Die in den letzten Jahren im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung stattfindende intensive Weiterentwicklung der Gruppenstrahlertechnik (oder Phased-Array-Technik) ist nicht zuletzt dem rasanten Fortschritt des „main streams“ bei der Entwicklung der Mikroelektronik und Sensorik zu verdanken. Der Einsatz von konventioneller Phased Array Technik für die austenitische Schweißnähte löst das Problem der Zuverlässigkeit der US-Prüfung aber nicht, da bei der Anregung und Empfang der Ultraschallwellen weder die Anisotropie noch die Inhomogenität des Objekts berücksichtigt werden.

Die heute gegebenen Möglichkeiten der schnellen Datenerfassung, Speicherung und Verarbeitung erlauben es, die einzelnen Zeitsignale von Elementen des Gruppenstrahlers zu erfassen und auch in Echtzeit zu verarbeiten. Die am Fraunhofer IZFP entwickelte Prüftechnik auf der Basis von Gruppenstrahlerprüfköpfen – Getakteter Gruppenstrahler oder **Sampling-Phased-Array-Technik** bzw. kurz SPA [2] genannt, – basiert auf der Anregung, Empfang und Bearbeitung der elementaren Ultraschallsignale von einzelnen Elementen des Gruppenstrahlers. Die Technik erzeugt und nutzt die vollständige Ultraschallinformation einer Gruppenstrahlermessung und weist wesentliche prüftechnische Vorteile im Vergleich zur konventionellen Gruppenstrahlertechnik auf. Einer von diesen besteht in der Möglichkeit, die Anisotropie und Inhomogenität des Prüfgegenstands bei der tomografischen Rekonstruktion der Ergebnisse zu berücksichtigen und dadurch die Zuverlässigkeit der Prüfung zu verbessern.

### 1.1.1 Messprinzip

Messtechnisch wird die SPA-Technik dadurch realisiert, dass nur ein Element des Gruppenstrahlerprüfkopfes sendet, während alle anderen Elemente empfangen. Die aufgenommenen Zeitsignale werden abgespeichert. Sendet z.B. in einem Messtakt das  $i$ -te Element, dann ergeben sich entsprechend der  $1 \dots N$  empfangene Zeitsignale die Elemente  $A_{ij}$  der Informationsmatrix (Abbildung 1, wobei  $i$ : das sendende Element,  $j$ : das empfangende Element,  $N$ : die Anzahl der Elemente eines linearen Gruppenstrahlers,  $S$  – der Sender,  $E$  – der Empfänger kennzeichnen). Nach  $N$  Takten ist die Informationsmatrix komplett aufgefüllt – sie enthält die gemessenen Zeitsignale von allen Kombinationen von Sendern und Empfängern.

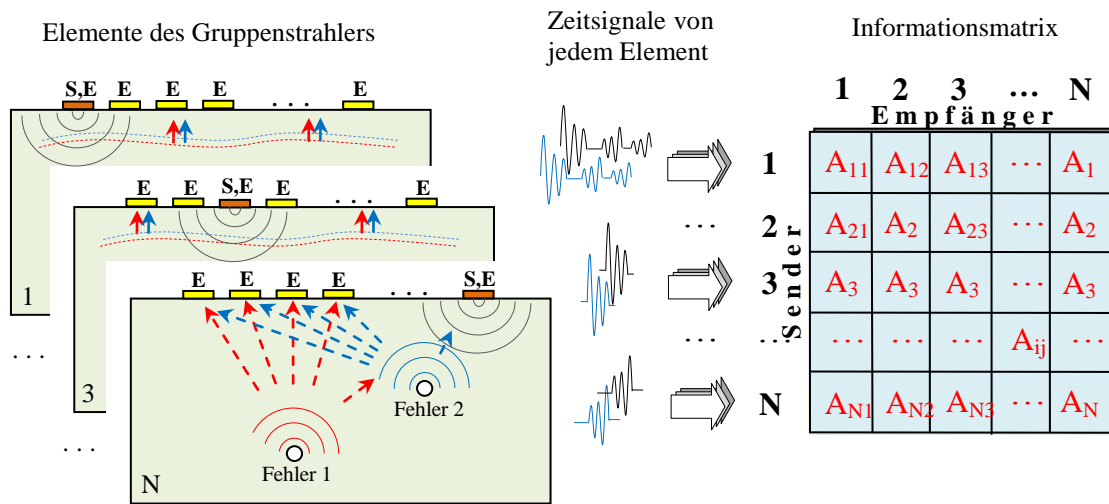


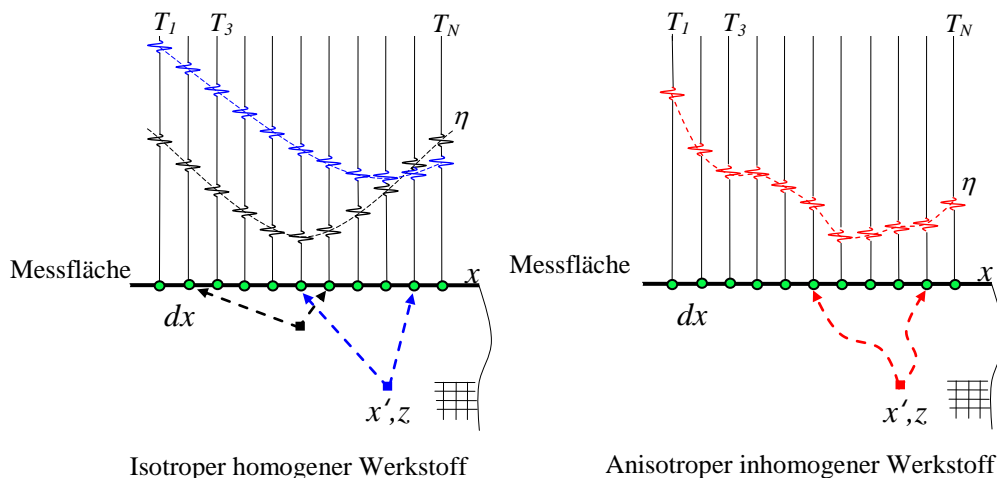
Abb. 1: Das Prinzip und der Informationsinhalt des Getakteten Gruppenstrahlers

### 1.1.2 Rekonstruktion von Ergebnisbildern

Das Prinzip der akustischen Tomografie wird in Abbildung 2 erläutert. Auf der Messfläche  $x$  des Prüfobjektes werden mit einem bestimmten Abstand  $dx$  die einzelne Elemente des Gruppenstrahlers angeordnet, die – jeder für sich individuell - eine kleine Apertur besitzen und damit ein sehr divergentes (weit-geöffnetes) Schallfeld erzeugen/empfangen können. Das Prüfobjekt wird nach dem SPA-Prinzip beschallt. Nachdem eine oder mehrere im Prüfstück vorhandenen Ungängen von der ankommenden Schallwelle getroffen werden, erzeugen diese als sekundäre Quelle ungerichteten Streufelder, die von den  $N$  Ultraschallwandlern empfangen werden. Da die Ultraschallwandler räumlich verteilt sind, entsteht für jede Ungänge im Datenbereich (empfangene Laufzeitsignale  $T_1 - T_N$ ) eine hyperbelförmige Laufzeitortskurve  $\eta$  (schwarz- und blaufarbige Linien in Abbildung 1). Die empfangenen Laufzeitsignale werden für die Rekonstruktion des tomografischen Bildes benutzt.

Der Rekonstruktionsvorgang besteht in der Erstellung eines in Pixeln diskretisierten räumlichen Modells des Prüfobjektes und in der Rückprojektion der empfangenen Datenhyperbel ins Modell unter Berücksichtigung der Messpositionen. Jedem Pixel  $(x', z')$  im Rekonstruktionsraum wird der Amplitudenwert zugeordnet, der einem Integral der skalaren Messdaten (Messwerte) entlang den Datenhyperbeln  $\eta$  entspricht. Liegt tatsächlich einer der Streuer im betrachteten Pixel  $(x', z')$ , so liefert die Integrationsprozedur durch eine konstruktive Interferenz der Messdaten einen hohen Wert als Ergebnis. Anderenfalls wird dem Pixel infolge einer destruktiven Interferenz ein niedriger Wert zugeordnet. Nach der Berechnung von allen Pixeln entstehen im räumlichen Modell die „Knoten“ (die Punkte, wo-

bei die Messsignale konstruktiv miteinander interferieren), die den Reflektoren im Prüfobjekt entsprechen. Das rekonstruierte zweidimensionale Bild wird Sektor-B-Bild genannt. Das Prinzip gilt auch für die dreidimensionale Rekonstruktion (Volumen-Rekonstruktion).



**Abb. 2:** Zur Erläuterung der SAFT-Rekonstruktion

Im Fall eines isotropen homogenen Werkstoffs erfolgt der Übergang vom Zeitbereich (den empfangenen Laufzeitortskurven) zum räumlichen Modell durch Multiplikation der Laufzeit mit der Schallgeschwindigkeit  $V$ , die im isotropen homogenen Werkstoff bekannt und konstant ist. Echosignale von einem Streuer bilden im Datenbereich eine Hyperbelkurve (schwarz bzw. blau in der Abbildung 2). In einem anisotropen inhomogenen Werkstoff besitzt diese Kurve infolge der Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit sowie infolge der Schallbrechung an den Inhomogenitätsgrenzen eine kompliziertere Form – siehe rote Kurve in Abbildung 2. Um die empfangenen Ultraschalldaten richtig ins räumliche Modell zurückpropagieren zu können, braucht man die genaue Zuordnung der empfangenen Laufzeitsignale. Die Prozedur der Berücksichtigung der nichtlinearen Ausbreitung von elastischen Wellen in einem anisotropen und/oder inhomogenen Werkstoff bei der tomografischen Rekonstruktion wurde *die inverse Phasen Anpassung* genannt.

### 1.2 Inverse Phasen Anpassung bei der SPA-Rekonstruktion an anisotropen inhomogenen Werkstoffen

Der Algorithmus der inversen Phasen Anpassung besteht in der Ermittlung von tatsächlichen Laufzeiten von jedem Element des Gruppenstrahlers bis zu jedem Volumenpixel und in der Nutzung dieser für die Rückprojektion der aufgenommenen Ultraschallsignale in das pixelierte Modell. Dafür ist das Verständnis über tatsächliche Ausbreitung der akustischen Welle in dem Prüfobjekt nötig, wobei seine Anisotropie und die Schallbrechung an jeder Inhomogenitätsgrenze berücksichtigt werden.

Die Technik der inversen Phasen Anpassung basiert auf einer Vorgehensweise, welche

- ein Modell erstellt, das die Inhomogenität des Prüfobjektes sowie die akustische Eigenschaften (elastische Konstanten) jedes stückweise homogen angenommenen Bereiches beschreibt;
- die Simulation der Schallausbreitung unter Berücksichtigung der Anisotropie und Schallbrechung ausführt und die Laufzeiten von jeder Schallquelle / jedem Schallempfänger zu jedem Punkt des Prüfolumens berechnet;
- die ermittelten Laufzeiten für die tomografische Rekonstruktion benutzt.

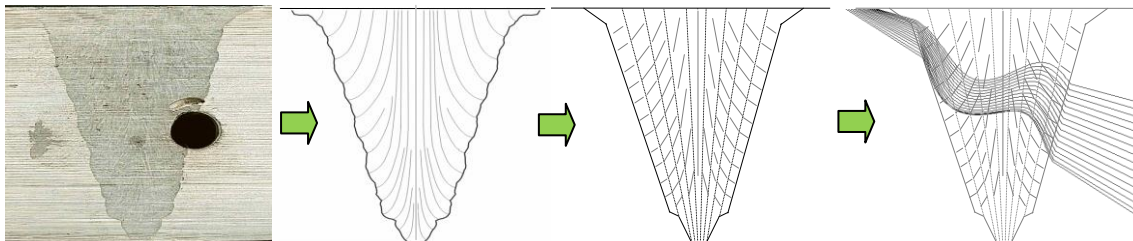
Für die Simulation der Schallausbreitung durch anisotropes inhomogenes Schweißnahtgefüge haben wir aufgrund der Einfachheit und Schnelligkeit den Ray-Tracing-Algorithmus ausgewählt. In diesem wird das ungerichtete Schallfeld einer punktförmigen Schallquelle durch eine Vielzahl von Strahlen modelliert, die diese Quelle quasi aussendet. Während des Simulationsvorgangs wird jeder Strahl durch das pixelierte räumliche Modell des zu beschallenden Mediums „durchgeführt“. Es werden die Phänomene der Schallbrechung an den Grenzen und die Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit berücksichtigt.

### 1.2.1 Erstellung des Modells einer austenitischen Schweißnaht

Wie jeder Simulationsalgorithmus, benötigt die Ray-Tracing Methode ein Modell, welches sowohl die Geometrie des zu simulierenden Mediums als auch seine akustischen Eigenschaften beschreibt. Im Fall einer austenitischen Schweißnaht gehören zu den Eingangsparametern des Modells die Schweißnahtgeometrie, akustische Eigenschaften des Grundwerkstoffs, sowie Orientierung und akustische Eigenschaften der Stengelkristalle.

Während die Schweißnahtgeometrie und Schallgeschwindigkeit im isotropen Grundmaterial oft bekannt sind bzw. auch am Prüfobjekt ermittelt werden können, liegt die Kenntnis über die Gefügestruktur und die Eigenschaften des Schweißgutes in der Regel nicht vor. In einigen Fällen kann man zur Bestimmung der Gefügestruktur ein Schlibfbild der Schweißnaht, z.B. an einer vergleichbar geschweißten Verfahrensprobe, erstellen, welches eine gute Grundlage zur Modellbildung der Schweißnaht ist. Diese Vorgehensweise wurde erstmals von *Ogilvy* [3] im Jahr 1985 angewendet.

Abbildung 3 zeigt ein Beispiel, wie aus einem Schlibfbild der Schweißnaht zunächst der Verlauf von Stengelkristallen ermittelt werden kann und dann die Bereiche mit annäherungsweise gleicher Kristallorientierung eingegrenzt werden können.



**Abb. 3:** Erstellung des Schweißnahtmodelles anhand eines Schlibfbildes und Simulation der Schallausbreitung (hierbei beispielhaft - der qSV-Welle)

Die inhomogene Struktur einer austenitischen Schweißnaht wird in Zonen aufgeteilt („geclustert“), in welchen die Stengelkristalle näherungsweise gleichorientiert sind. Es wird angenommen, dass die Stengelkristalle in den verschiedenen Zonen sich lediglich durch die Orientierung ihrer akustischen Achse unterscheiden. Ihre elastischen Eigenschaften sowie die Dichte bleiben gleich. Die akustischen Eigenschaften werden in der Form der Steifigkeitsmatrix  $C$  vorgegeben, die fünf voneinander unabhängige elastische Konstanten besitzt.

### 1.2.1 Simulation der Schallausbreitung durch austenitische Schweißnaht

Im Laufe des Simulationsvorganges werden Effekte der Anisotropie und der Schallbrechung an einzelnen Stengelkristallen berücksichtigt. Abbildung 3 rechts zeigt den Verlauf von aus einem Gruppenstrahlerelement „ausgesendeten“ Strahlen durch das erstellte Modell einer austenitischen Naht für den Fall der vertikalpolarisierten transversalen Wellen.

Die während des Simulationsvorganges ermittelten Laufzeiten werden in einer Look-Up-Tabelle (Nachschlagetabelle) gespeichert. Jede Zelle der Tabelle entspricht einem

Volumenelement des pixelierte Modells des zu rekonstruierenden Prüfobjekts und enthält die Laufzeit, mit welcher die elastische Welle von der Schallquelle dieses Volumenelement erreicht. Der Inhalt der nach der Simulation ausgefüllten Tabelle repräsentiert die Laufzeitkurven (siehe rote Linie in Abb. 2 rechts) für jede Kombination *Sender-Empfänger* und für jeden Pixel, die für die nachfolgende Rekonstruktion der Ergebnisbilder benutzt wird.

Um die gute Genauigkeit der tomographischen Rekonstruktion gewährleisten zu können, müssen die angenommenen Parameter der Anisotropie und Inhomogenität (Orientierung und elastische Eigenschaften) des erstellten Modells möglichst nah zu den tatsächlichen Eigenschaften des Prüfobjekts liegen.

### *1.3 SPA-Prüfsystem*

Die beschriebene Sampling-Phased-Array-Technik wird durch spezielle Hardware- und Softwaremodule realisiert. Die Ultraschall-Hardware besteht aus der Prüf- und Auswertstation, dem Ultraschall-Server (Prüferechner), der Manipulator-Steuerung mit Koordinateninterface und aus der Ultraschall-Elektronik OPTUS.

Die Prüfsoftware des Ultraschallprüfsystems beinhaltet die Module zur Steuerung der einzelnen Hardwarekomponenten (US-Elektronik, Manipulatorsteuerung, Koordinateninterface) im manuellen und automatischen Betrieb. Sie übernimmt die Kontrolle über den Gesamtprüfprozess sowie die Parametrisierung der Systemkomponenten und das Datenmanagement. Das Prüfsystem und entsprechende Softwaremodule sind modular aufgebaut, sodass die Skalierbarkeit des Systems für verschiedene Prüfaufgaben (z. B. mit unterschiedlicher Anzahl der Gruppenstrahler-Kanäle, verschiedenen Bibliotheken der Rekonstruktionsalgorithmen usw.) gewährleistet ist.

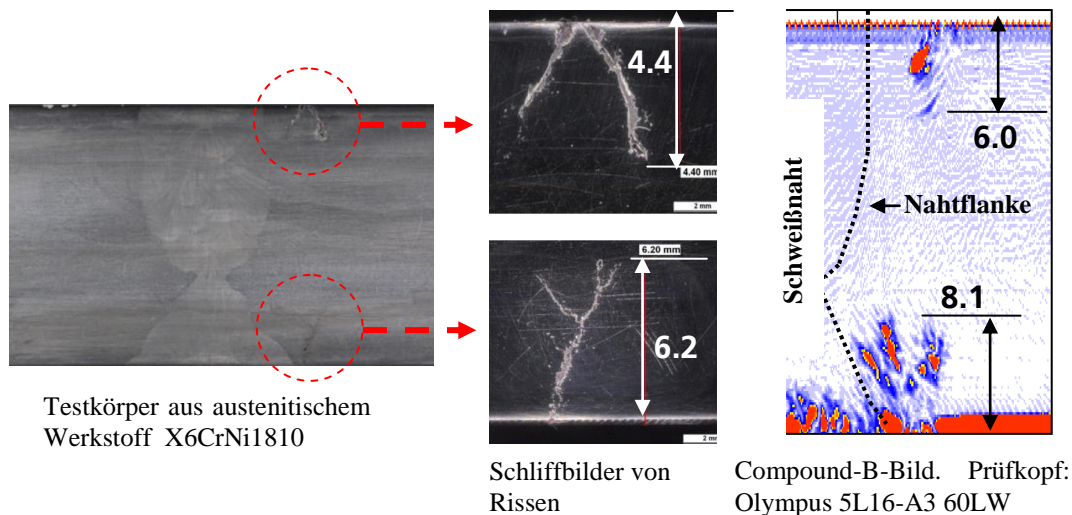
Die Datenaufnahme im Sampling Phased Array Modus erfolgt so, dass die hochfrequenten Rohdaten von allen vorhandenen Empfangskanälen aufgenommen und durch SPA-Rekonstruktionsalgorithmen in Echtzeit verarbeitet werden. Die Rekonstruktion von zwei- und dreidimensionalen Ergebnisbildern erfolgt auch in Echtzeit. Die gespeicherten Prüfergebnisse können nach Abschluss der Prüfung geladen und dargestellt werden.

### *1.4 Experimentelle Ergebnisse*

Die Funktionalität der entwickelten Prüftechnik wurde durch mehrere Prüfexperimente an geschweißten austenitischen Testkörpern mit künstlichen und realen Materialungängen validiert. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel der Sampling Phased Array Rekonstruktion mit inverser Phasen Anpassung an dem geschweißten Testkörper mit einer X-förmigen Naht. Der Testkörper besitzt zwei Spannungskorrosionsrisse im Grundwerkstoff bzw. in der Wärmeinflusszone.

Der Testkörper wurde anhand eines zweidimensionalen Manipulators abgetastet. Ein Gruppenstrahler-Prüfkopf mit dem Vorlaufkeil quer zur Naht geführt, das akustische Feld durch anisotropes inhomogenes Nahtgefüge ausbreitete. In jeder Messposition wurden akustische Signale nach dem SPA-Prinzip aufgenommen.

Für alle Messpositionen wurde die Simulation der Schallausbreitung durchgeführt, die Look-Up-Tabelle mit den Laufzeiten von jedem Prüfkopfelement zu jedem Volumenelement berechnet und die entsprechenden Sektor-Bilder rekonstruiert. Die Sektor-Bilder wurden anschließend in einem Compound-B-Bild überlagert und gemittelt.



**Abb. 4:** Ergebnisse der SPA-Rekonstruktion mit inverser Phasen Anpassung an einem austenitischen Testkörper mit zwei Spannungskorrosionsrissen

Die durch die SPA-Technik ermittelten Größen, Lagen und Form der Fehler wurden mit den Ergebnissen der Sichtprüfung (Schliffbilder) verglichen und wiesen eine gute Korrelation mit diesen auf. Man muss aber erwähnen, dass sowohl die Ausdehnung eines Fehlers als auch seine Form mithilfe eines Schliffbildes nur an den Testkörperoberflächen bestimmt werden können. Im Gegensatz dazu, können bei der Ultraschallprüfung die Ränder des Prüfobjektes nicht getestet werden, da der Ultraschallprüfkopf bzw. Keil eine gewisse Breite hat. Die Form und Ausdehnung der vorhandenen Fehler kann sich doch entlang der Schweißnaht variieren. Davon ausgehend, können sich die Ergebnisse der tomografischen Rekonstruktion von den Schliffbildern geringfügig unterscheiden.

## 2. Iterative Ermittlung von unbekanntem elastischen Eigenschaften

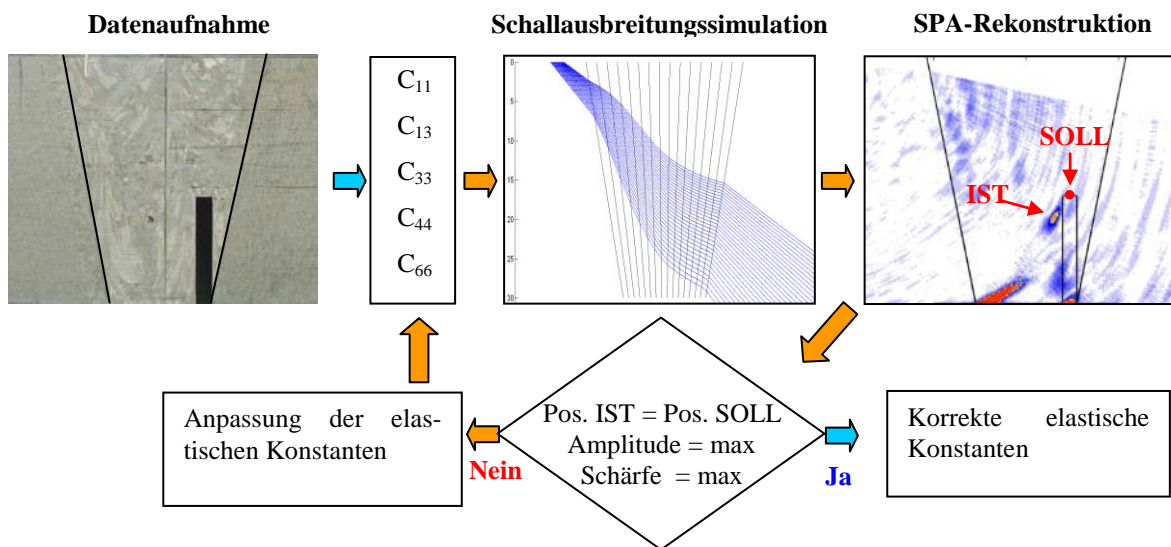
Der SAFT-Algorithmus, auf dessen Prinzip die Sampling-Phased-Array Bildrekonstruktion basiert, gehört zu den tomographischen Verfahren, wobei die synthetische Fokussierung erfolgt durch konstruktive und destruktive Interferenz der projizierten HF-Signale erfolgt. Werden die gemessenen Laufzeitsignale in das räumliche Modell fehlerhaft projiziert (z.B., infolge der Abweichung der angenommenen Ausbreitungsgeschwindigkeit von ihrem tatsächlichen Wert), so erfolgt durch entstehende Phasenverschiebung eine inkohärente Summierung der Signale, was die Fokussierungsqualität vermindert.

Die Ergebnisse der Schallausbreitungssimulation, auf welchen die SPA-Rekonstruktion basiert, hängen unmittelbar von den elastischen Eigenschaften des Mediums ab. Die 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. Sind die elastischen Konstanten als Simulationseingangsparameter falsch angenommen, so entsteht ein Fehler in den Laufzeitberechnungen, was wiederum zum nichtkohärenten Aufaddieren der Ultraschallsignale bei der Rekonstruktion führt. Die Reflektoren werden an den falschen Ort zurückpropagiert. Eine zuverlässige quantitative Bewertung der Prüfergebnisse ist damit ausgeschlossen.

Zur Lösung des Problems der Ermittlung/Anpassung von unbekanntem elastischen Konstanten wurde die „Gradient Elastic Constants Descent“-Methode (GECDM) entwickelt, die es gestattet, eine automatische Bestimmung der elastischen Konstanten an einer Schweißnaht mit angenommener Kristallit-Struktur durchzuführen. Der Ansatz besteht in der inversen Anpassung der angenommenen Steifigkeitsmatrix. Da die elastischen Konstan-

ten (Elemente der Matrix) die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit bestimmen, beeinflussen sie indirekt auch die SPA-Fokussierung. Als Optimierungskriterium dient dabei die ortsgetreue Rekonstruktion eines Modellreflektors im Kalibrier- bzw. Vergleichskörper, dessen genaue Lage und Größe bekannt sind. Dieser Kalibrierkörper ist optimal eine Verfahrensprobe, mit der die Schweißung qualifiziert wurde. Die Gefügestruktur der Referenznaht wird auch als bekannt betrachtet: sie kann zum Beispiel anhand eines Schlibbildes ermittelt werden.

Zunächst erfolgt die Simulation der Wellenausbreitung mit angenommenen, im Allgemeinen daher falschen elastischen Konstanten als Startwerte. Anhand von damit berechneten Laufzeitwerten wird ein Ultraschall-Sektorbild rekonstruiert. Da die elastischen Konstanten nicht korrekt sind, erscheint die Ultraschallanzeige von dem bekannten Reflektor unfokussiert und an einer falschen Position. Nach dem GECDM-Verfahren werden die elastischen Konstanten im Folgenden nach einem bestimmten Algorithmus iterativ solange angepasst (Abbildung 5), bis die Anzeige im Sektor-Bild ihre richtige Position (von IST nach SOLL) erreicht und die Amplitude sowie die Schärfe der Anzeige ihre optimalen Werte annehmen.



**Abb. 5:** Iterative „Gradient-Elastic-Constants-Descent-Methode“

Im mathematischen Sinne, besteht der iterative Ermittlungsvorgang in der Optimierung einer nichtanalytischen Funktion  $f$  von den fünf elastischen Konstanten  $C_{11}$ - $C_{66}$ , die die Fokussierungsqualität der tomografischen Rekonstruktion quantitativ beschreibt. Als Funktionswert dient hierbei eine Kombination aus der Abweichung der Position der rekonstruierten Anzeige vom Referenzreflektor im Sektor-Bild, ihrer Amplitude und Schärfe.

Die GECD-Methode wurde experimentell validiert. Die ermittelten Werte der elastischen Konstanten wiesen eine gute Korrelation mit den Ergebnissen der akustischen Resonanzspektroskopie auf.

## Referenzen

- [1] KTA 3201.3, Fassung 9/98, Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren. Teil 3: Herstellung, KTA 3201.4, Fassung 6/99, Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren. Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung.
- [2] Bulavinov A.: Der getaktete Gruppenstrahler. Dissertation. UdS, Saarbrücken 2005.
- [3] Ogilvy J. A.: Computerized ultrasonic ray tracing in austenitic steel. NDT International, Vol. 18, No. 2, pp. 67-77, April 1985.