

SAFT-Rekonstruktion für die Querfehlerprüfung in austenitischen Schweißnähten und Mischnähten

Jens PRAGER *, Rainer BOEHM *, Christian HÖHNE *
* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung,
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Kurzfassung. Die Untersuchung austenitischer Schweißnähte ist eine Herausforderung für die zerstörungsfreie Prüfung mit Ultraschall, bei der die Anwendung herkömmlicher Prüftechniken häufig keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert. Die Ursache dafür ist das inhomogen-anisotrope Gefüge im Schweißnahtbereich, das zu einer Verzerrung des Schallfeldes und damit zu Schwierigkeiten bei der Auffindbarkeit und bei der Größenbestimmung von Fehlern führt. Eine neue Herausforderung ist die Detektion von Querfehlern in Rohrleitungen des Primärkreises von Kernkraftwerken, aber auch in längsnahtgeschweißten, plattierten Rohrleitungen, die zunehmend an Bedeutung gewinnt. Dabei können die Prüfköpfe auf Grund einer unbeschleunigten Decklage meist nicht direkt auf die Naht aufgesetzt werden. Vielmehr muss eine SE-Anordnung der Köpfe verwendet werden, bei der durch die längeren Schallwege der negative Einfluss des austenitischen Gefüges noch verstärkt wird.

Im vorliegenden Beitrag wird eine RT-SAFT-Prüftechnik vorgeschlagen, mit der die Fehlerdetektion deutlich verbessert werden konnte. Dabei wurde die SAFT-Rekonstruktion mit einem Ray-Tracing-Ansatz zur Bestimmung der Schalllaufwege und -laufzeiten und mit einem Schweißnahtmodell kombiniert. Das Schweißnahtmodell repräsentiert die Kornorientierung und die elastischen Konstanten in einer diskretisierten Form und macht so die komplexe Nahtstruktur für die Berechnung zugänglich.

Die Aufnahme der Messdaten erfolgt mit zwei Gruppenstrahlerprüfköpfen in V-Anordnung, die beidseitig der Schweißnaht geführt werden sind.

Im Beitrag werden die Prüfanordnung und das Rekonstruktionsverfahren vorgestellt und die Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen an austenitischen Schweißnähten und Mischnähten mit künstlich eingebrachten Testfehlern präsentiert. Die Ergebnisse der direkten Fehlergrößen- und -lagebestimmung werden mit den Resultaten konventioneller Prüftechniken verglichen.

1. Einführung

Durch die Verwendung von Rekonstruktionsalgorithmen für die zerstörungsfreie Prüfung mit Ultraschall kann der Signal-Rausch-Abstand (SNR) signifikant verbessert werden. Das ist insbesondere dann hilfreich, wenn der Werkstoff der zu prüfenden Komponente eine grobkörnige Mikrostruktur aufweist, die starke Streueffekte hervorruft. Mit solchen Problemstellungen wird der Prüfer häufig bei der Prüfung von Schweißnähten in anisotropen Stählen aber auch in Nickellegierungen konfrontiert. Während die Kristalle im austeniti-

schen Basismaterial zufällig orientiert sind, ist die Kornstruktur in den austenitischen Schweißnähten entlang einer Vorzugsrichtung orientiert, die sich aus den Abkühlverhalten während des Schweißvorgangs ergibt. Das daraus resultierende akustisch anisotrope Verhalten führt zu Ablenkung und Defokussierung des Ultraschallfeldes und vermindert dadurch die Fehlerauffindbarkeit bzw. erschwert die Fehlerlage- und -größenbestimmung. Der Einfluss der Anisotropie auf die Schallausbreitung ist abhängig von der verwendeten Wellenmode. Während vertikal polarisierte Transversalwellen besonders stark beeinflusst werden, weisen die horizontal polarisierten Transversalwellen eine vergleichsweise kleine Abweichung vom isotropen Verhalten auf. Da diese jedoch in der Praxis schwer anzuregen sind, werden für die Prüfung häufig Longitudinalwellen als Kompromiss eingesetzt. Die Richtungsabhängigkeit der Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten der verschiedenen Wellenmoden in anisotropen Werkstoffen werden durch Slowness-Diagramme repräsentiert, wie exemplarisch in Abb. 1 dargestellt.

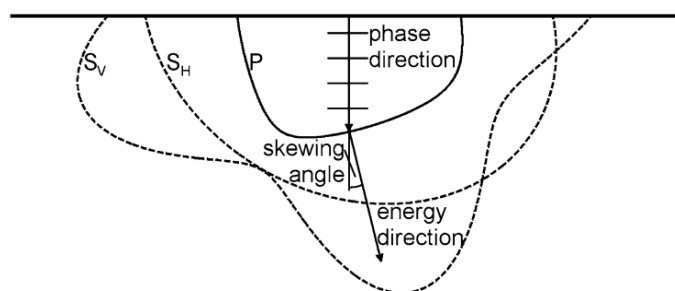


Abb. 1. Richtung der Phasengeschwindigkeit und Energieausbreitungsrichtung (Gruppengeschwindigkeit) in einem Slowness-Diagramm für X5CrNiMo17122. Die durchgezogene Linie repräsentiert den Verlauf der Longitudinalmode (P), die gestrichelten Linien den der horizontal (SH) und der vertikal polarisierten Transversalmode (SV).

Es ist leicht einsichtig, dass der Einfluss der Anisotropie auf die Schallausbreitung bei der Schweißnahtprüfung maßgeblich davon bestimmt wird, welcher Anteil des Schalllaufweges im isotropen Basismaterial bzw. im anisotropen Schweißgut verläuft. Für die Längsfehlerprüfung, bei der die Prüfköpfe neben der Naht angeordnet werden, und nur ein geringer Teil des Schalllaufweges in der Naht verläuft, ist dieser Einfluss noch gering. Seit einigen Jahren gewinnt jedoch die Querfehlerprüfung zunehmend an Bedeutung, zum einen veranlasst durch Schadensfälle in Mischnähten im Primärkreis von Kernkraftwerken zum anderen auch durch die steigenden Qualitätsanforderungen an die Rohr- und Rohrleitungshersteller. Bei der Querfehlerprüfung wird häufig mit einer SE-Technik gearbeitet, bei der getrennte Sende- und Empfangsprüfköpfe in einer V-Anordnung beidseitig neben der Naht geführt werden (vgl. Abb. 2) [1]. Diese Anordnung ist flexibel und auch bei unbeschleunigten Schweißnähten einsetzbar, da eine direkte Ankopplung auf der Naht entfällt. Aufgrund der geometrischen Besonderheiten bei dieser Anordnung liegt immer ein wesentlicher Teil des Schalllaufweges innerhalb der Schweißnaht und wird stark von deren Anisotropie beeinflusst.

Ziel der im Folgenden beschriebenen Arbeiten war es, eine Ultraschall-Prüftechnik zur Detektion und zur Größen- und Lagebestimmung von Querfehlern in austenitischen Schweißnähten und Mischnähten zu entwickeln, die die Einflüsse der Anisotropie berücksichtigt. Das Prüfergebnis soll dabei mit Hilfe der Synthetic Aperture Focussing Technique (SAFT) rekonstruiert werden, um die bereits eingangs erwähnte Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes (SNR) und eine möglichst exakte Abbildung der Fehlergeometrie zu erreichen.

Die Anwendung von SAFT zur Fehlerrekonstruktion erfordert genaue Kenntnis der Schalllaufzeit und des Schallausbreitungspfades. Aufgrund der anisotropen und inhomogenen Materialeigenschaften im Bereich der Schweißnaht, sind diese Größen jedoch nicht

mehr direkt aus dem geometrischen Abstand ableitbar. Vielmehr müssen die Orts- und Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit und die daraus resultierenden, gekrümmten Schalllaufwege berücksichtigt werden. Voraussetzung für die Anwendung der SAFT-Rekonstruktion auf inhomogene, anisotrope Strukturen, ist die Bestimmung der Laufzeiten durch die Modellierung der Schallausbreitungsvorgänge. Dafür werden verschiedene Ansätze in der Literatur präsentiert (z.B. [2], [3]), die jedoch bisher nur eine zweidimensionale Betrachtungen der Problemstellung zulassen und deren Einsatzmöglichkeiten damit auf die Längsfehlerprüfung beschränkt sind. Der Layback-Winkel, also die Neigung der Stängelkristalle in Schweißfortschrittsrichtung wird vernachlässigt, was meist ohne Einschränkungen der Genauigkeit der Modellierung zulässig ist.

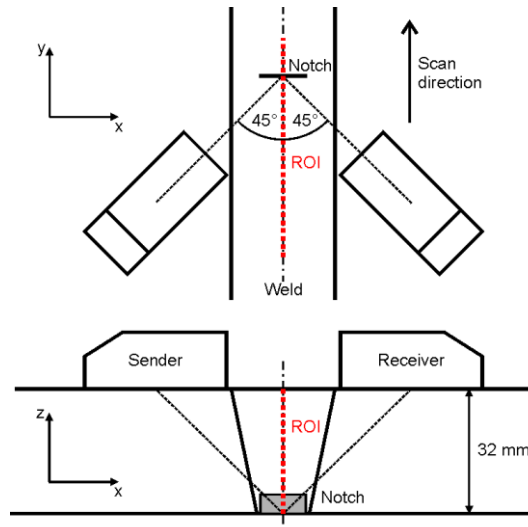


Abb. 2. Prüfkopfordnung für die Datenaufnahme als Draufsicht (xy-Ebene) und Frontansicht (xz-Ebene). Die ROI (Rekonstruktionsfläche – Region Of Interest) ist in der yz-Ebene.

Für die im Mittelpunkt der vorgestellten Untersuchungen stehende Querfehler-Problematik sind diese Ansätze nicht ausreichend. Wegen der besonderen geometrischen Verhältnisse, die sich aus der V-Anordnung ergeben, sind eine vollständige dreidimensionale Betrachtung der Schallausbreitungsvorgänge und eine Anpassung des SAFT-Algorithmus zwingend notwendig. Ähnliche Überlegungen für den isotrop-homogenen Fall wurden bereits in [4] veröffentlicht. Für den anisotropen Fall soll im vorgeschlagenen Verfahren ein Ray-Tracing-Algorithmus zum Einsatz kommen, der die 3-D-Schallausbreitung vorhersagt und damit den zeitlichen und örtlichen Zusammenhang zwischen der jeweiligen Prüfkopfposition und den Pixeln auf der Rekonstruktionsfläche (Region Of Interest – ROI) herstellt. Ray-Tracing (RT) kann immer dann angewendet werden, wenn das Rechengebiet groß gegenüber der Schallwellenlänge und möglichst homogen ist oder sich die inhomogenen Materialparameter im Rechengebiet gemessen an der Wellenlänge nur sehr langsam ändern. Für das vorliegende Problem sind diese Voraussetzungen sowohl hinsichtlich der geometrischen Abmessungen aber auch hinsichtlich der Änderungsgeschwindigkeit erfüllt.

Als mathematische Beschreibung der Kornorientierung in der Schweißnaht wurde ein erweitertes, geschichtetes Schweißnahtmodell (layered structure model – LSM) entwickelt, das auf den Arbeiten in [5] basiert. Die Kombination aus den drei Komponenten, SAFT, RT und LSM in einer dreidimensionalen Geometrie liefert als Ergebnis ein Prüfverfahren für die Querfehlerprüfung, das im Folgenden als RT-SAFT bezeichnet wird. Der nächste Abschnitt enthält einen Überblick über die Besonderheiten der drei Komponenten des Verfahrens. Zur Validierung des Rekonstruktionsverfahrens wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse im dritten Abschnitt präsentiert werden.

2. Komponenten des Rekonstruktionsverfahrens

2.1 Layered-Structure-Model (LSM)

Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Anwendung der SAFT-Rekonstruktion ist ein genaues Schweißnahtmodell. Mit ihm wird der mathematische Zugriff auf die Schweißnahtparameter, die zunächst nur in Form von Schlibbildern bzw. Tabellenwerten gemessener elastischer Konstanten vorliegen, ermöglicht. Das hierfür entwickelte Modell basiert auf einer mathematischen Beschreibung der Kornorientierung im austenitischen Schweißnahtgefüge, wie es in [5] von Ogilvy vorgeschlagen wurde.

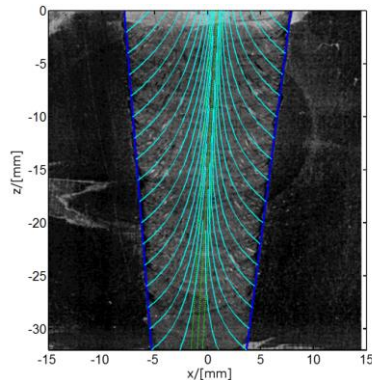


Abb. 3. Schlibbild einer austenitischen Schweißnaht mit Schweißnahtmodell

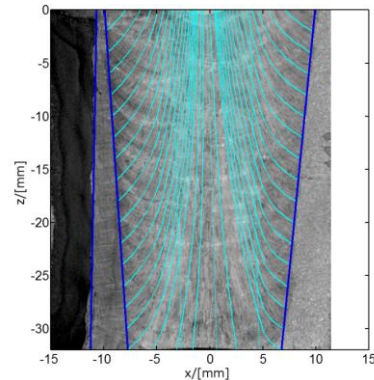


Abb. 4. Schlibbild einer Mischnaht mit Pufferung und Schweißnahtmodell

Wie in den Schlibbildern (Abb. 3 und Abb. 4) deutlich wird, ist der in [5] angenommene symmetrische Aufbau der Schweißnaht nicht immer gegeben, vor allem nicht bei Mischnähten, die ein Pufferung enthalten. Um die Asymmetrie in das Ogilvy-Modell einzubauen, wurde ein zusätzlicher Parameter R eingeführt, der den Schnittpunkt zwischen der Mittellinie der Schweißnahtstruktur und der x -Achse bei $z = 0$ (vgl. Abb. 5) festlegt. Diese Modifikation ergibt

$$\tan \theta_1 = \frac{\tan \zeta_1 (D_1 - R - z \tan \alpha_1)}{x - R} \quad \text{for } x > R \quad (1)$$

und

$$\tan \theta_2 = \frac{\tan \zeta_2 (D_2 - R - z \tan \alpha_2)}{x - R} \quad \text{for } x < R \quad (2)$$

wobei die Winkel θ_1 und θ_2 die Kristallorientierung links und rechts der Mittellinie steuern.

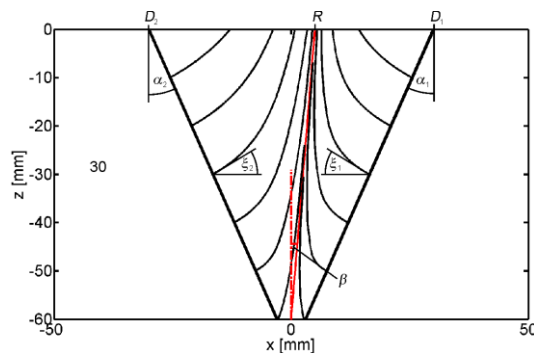


Abb. 5. Angepasstes Modell der Kornorientierung in der Schweißnaht. Mit Einführung des Parameters R kann eine unsymmetrische Kornorientierung beschrieben werden.

Damit ist es möglich, die Symmetrie der Schweißnahtflanken bezüglich der yz -Ebene beizubehalten, unabhängig von der Neigung der Mittellinie. Bisher wird immer noch angenommen, dass die Stängelkristalle mit zunehmender Entfernung zu den Flanken in Richtung einer vertikalen Orientierung wachsen, was jedoch nicht immer zutrifft (vgl. [6]). Um das Modell weiter zu Generalisieren, werden nun (1) und (2) so erweitert, dass mit zunehmendem Abstand von den Schweißnahtflanken eine Annäherung der Wachstumsrichtung der Stängelkristalle an die geneigte Mittellinie möglich wird. β bezeichnet den Neigungswinkel der Mittellinie bezogen auf die z -Achse gemessen. Damit ergibt sich

$$\tan \theta_1 = \frac{K_1 + \tan \beta}{1 - K_1 \tan \beta} \quad \text{for } x > R - z \tan \beta \quad (3)$$

mit

$$K_1 = \frac{\tan \xi_1 - \tan \beta}{1 + \tan \xi_1 \tan \beta} \cdot \frac{D_1 - R + z(\tan \beta - \tan \alpha_1)}{x - R + z \tan \beta} \quad (4)$$

und

$$\tan \theta_2 = \frac{K_2 + \tan \beta}{1 - K_2 \tan \beta} \quad \text{for } x < R - z \tan \beta \quad (5)$$

mit

$$K_2 = \frac{\tan \xi_2 - \tan \beta}{1 + \tan \xi_2 \tan \beta} \cdot \frac{D_2 - R + z(\tan \beta - \tan \alpha_2)}{x - R + z \tan \beta} \quad (6)$$

Eine weitere Modifikation des Modells ermöglicht es zu steuern, wie schnell die Kristallausrichtung gegen die Mittellinie konvergiert. Dadurch wird es auch möglich, Bereiche mit konstanter Kristallorientierung zu erzeugen, die die Grundlage für die Diskretisierung darstellen. Im Ergebnis besteht das LSM-Schweißnahtmodell aus diskreten, homogenen Schichten anisotroper, akustischer Eigenschaften. Eine detaillierte Beschreibung des Schweißnahtmodells ist in [7] enthalten.

2.2 Ray-Tracing

Mit dem nun verfügbaren diskreten und abschnittsweise homogenen LSM-Schweißnahtmodell kann das Strahlverfolgungsverfahren im inhomogenen Material der Schweißnaht, in dem sich die Materialeigenschaften kontinuierlich ändern, angewendet werden. Bei der Diskretisierung der Naht muss darauf geachtet werden, dass die geometrische Abmessung jeder einzelnen Schicht größer als die Schallwellenlänge im Medium ist. Das komplette Modell der zu prüfenden Struktur ist in Abb. 6 dargestellt.

Der Ray-Tracing-Algorithmus verfolgt den „Schallstrahl“ ausgehend von einem Startpunkt im Prüfkopf bis zu einer Grenzfläche, an der sich die Materialeigenschaften ändern. An dieser Grenzfläche werden die Beugungseigenschaften analysiert und die neue Strahlrichtung festgelegt. Detaillierte Informationen zur Lösung des Beugungsproblems in 3D sind in [8] enthalten. Ausgehend vom Schnittpunkt mit der Grenzfläche und unter Berücksichtigung der neuen Ausbreitungsrichtung wird die Prozedur fortgesetzt bis die nächste Grenzfläche oder eine Abbruchbedingung erreicht wird. Streift der Strahl während seiner Ausbreitung ein Pixel in der Rekonstruktionsfläche (ROI), so wird dieser Schnittpunkt registriert. Unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeiten (Gruppengeschwindigkeiten), mit denen sich der Schall in den einzelnen Bereichen der Struktur ausgebreitet hat, kann die Laufzeit zwischen der Position des Prüfkopfes und dem jeweiligen Pixel in der ROI bestimmt und in eine Wertetabelle eingetragen werden. Sofern die Schweißnaht un-

symmetrisch ist, was grundsätzlich für Mischnähte anzunehmen ist, muss bedingt durch die V-Anordnung das Ray-Tracing für Sende- und Empfangsprüfkopf getrennt durchgeführt werden. Bei der Strahlverfolgung werden an den Grenzflächen nur transmittierte Anteile berücksichtigt; Reflexionen werden ebenso wie Modenumwandlungen vernachlässigt. In der Realität treten Reflexion und Modenumwandlung allerdings auf und können zu Artefakten im Rekonstruktionsergebnis führen.

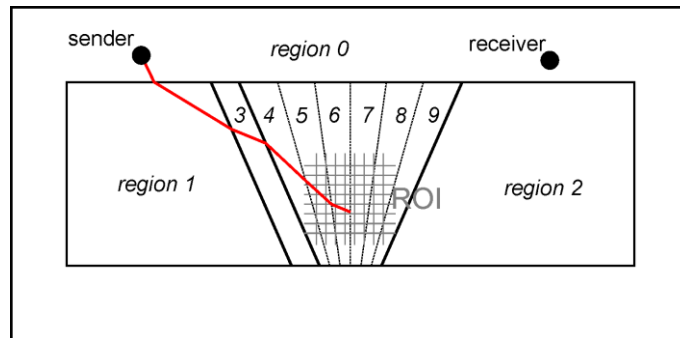


Abb. 6. Rechenmodell der Struktur mit ferritischem (1) und austenitischem Grundwerkstoff (2), Pufferung (3) und LSM-Schweißnahtmodell (4 – 9). Der Bereich (0) repräsentiert den Vorlaufkeil. Zur Vereinfachung ist das Modell in 2D dargestellt; die Orientierung der Rekonstruktionsfläche (ROI) ist in der Realität in Schweißfortschrittsrichtung.

Im Allgemeinen kann die Schweißnaht in Schweißfortschrittsrichtung als homogen angesehen werden. Es ist daher ausreichend, die Wertetabelle nur für eine Prüfkopfposition zu berechnen und während der Rekonstruktion entlang der Scanrichtung zu verschieben.

2.3 SAFT-Rekonstruktion

Wie bereits dargelegt, ist die Synthetic Aperture Focussing Technique (SAFT) ein laufzeitbasiertes Verfahren. Eine detaillierte Beschreibung ist beispielsweise in [9] zu finden. Während des Scanvorgangs, also der Fahrt der Prüfkopfanzordnung entlang der Schweißnaht, wird das Rekonstruktionsgebiet (ROI) vom Ultraschall beleuchtet. Die Bewegung der Köpfe ermöglicht dabei eine Beschallung möglicher Fehler aus verschiedenen Raumrichtungen. Die Überlagerung der laufzeitabhängigen Echos unterschiedlicher Kopfpositionen unter Berücksichtigung der Phasenbeziehung führt zu konstruktiven Interferenzen an den Reflexionsorten. Für alle anderen Pixel ergeben sich keine oder vernachlässigbar kleine Echos.

Um möglichst viele Raumrichtungen in die Rekonstruktion einbeziehen zu können, verlangt SAFT nach einem stark divergenten Schallfeld. Diese Voraussetzung könnte durch den Einsatz konventioneller Prüfköpfe mit kleiner Schwingerfläche erfüllt werden, jedoch um den Preis eines geringen SNR. (Die Empfindlichkeit des Prüfkopfes ist direkt proportional zur Schwingerfläche.) Für das beschriebene Verfahren wurden Gruppenstrahlerprüfköpfe verwendet, mit deren Hilfe das divergente Schallfeld durch Überlagerung einzelner gebündelter Teilschallfelder synthetisiert werden kann [10]. Das gebündelte Schallfeld wird dabei im Bereich des geforderten Öffnungswinkels geschwenkt. Damit werden die Voraussetzungen hinsichtlich Divergenz, ausreichend hohem Schalldrucks und schließlich ausreichend großer synthetischer Apertur erfüllt, wodurch das SNR erhöht und das Auflösungsvermögen verbessert wurde.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchsaufbau

Untersucht wurden Testkörper mit zwei verschiedenen Arten von Schweißnähten, austenitische Schweißnähte sowie Mischnähte mit Pufferung zwischen dem ferritischen Basismaterial und der Naht. Alle Nähte waren 300 mm lang und als V-Naht ausgeführt. Auch wenn es für die Anwendung des Verfahrens nicht notwendig ist, waren Wurzel und Decklage beschliffen. In die Schweißnähte waren Nuten mit einer Tiefe von 6 mm und einer Breite von 10 mm von der Wurzel ausgehend quer zur Naht eingebracht. Mit der in Abb. 2 dargestellten, symmetrischen Prüfkopfanzordnung wurde ein Scan entlang der Schweißnaht vorgenommen und dabei die HF-Daten aufgezeichnet. Der Winkel zwischen den Köpfen wurde auf 45° festgelegt. Zum Einsatz kamen 16-Element-Gruppenstrahlerprüfköpfe mit einer Resonanzfrequenz von 2,25 MHz montiert auf Vorsatzkeilen mit einem Keilwinkel von 19° , die Longitudinalwellen angeregt haben. Die Messdaten wurden entlang des Scanpfades in gleichmäßigen Abständen mit der BAM-eigenen Hardware CompasXL [11] aufgenommen. Zur Erzeugung der Divergenz wurde der Einschallwinkel an jeder Messposition zwischen 30° und 60° variiert.

3.2 Rekonstruktion

Für die praktische Anwendung des Verfahrens stellt neben vielen anderen Gesichtspunkten nicht zuletzt auch die Rechenzeit ein Akzeptanzkriterium dar. Im verwendeten Versuchsaufbau wurde die Rekonstruktion mit einem Standard-PC (HP Compaq 8100 mit Intel Core i7-860, 2,8 GHz) durchgeführt. Da die Schweißnaht ohne weitere Überprüfung als homogen in Schweißfortschrittsrichtung angenommen wurde, musste das Ray-Tracing, das den weitaus rechenzeitintensiveren Teil der Rekonstruktion ausmacht, nur einmal für die entsprechende Nahtgeometrie durchgeführt werden. Als Kriterium für die minimale Anzahl der Schichten im LSM wurde angesetzt, dass die Richtungsänderung der Kristallorientierung benachbarter Schichten kleiner als $0,5^\circ$ ist.

Der Pixelabstand in der Rekonstruktionsebene wurde zunächst auf $\lambda/8$ gesetzt. Um sicherzustellen, dass jedes Pixel von mindestens einem Schallstrahl getroffen wird, wurde ein Winkel von $0,1^\circ$ zwischen zwei benachbarten Schallstrahlen im Stahlenbündel verwendet. Alternativ wurde auch eine verringerte Auflösung mit einer Gittergröße von $\lambda/4$ und einem Winkelabstand von $0,2^\circ$ getestet. Die Rechenzeiten sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1. Rechenzeit für die beiden Rekonstruktionsschritte

Pixelabstand	Ray-Tracing (nur einmal für jede Schweißnahtgeometrie berechnet)	SAFT-Rekonstruktion (für eine Scan-Länge von 40 mm und 204 Messpositionen)
$\lambda/4$	< 55 min	< 20 sec
$\lambda/8$	~ 3 h	< 1 min

3.3 Prüfergebnisse

Die Untersuchungsergebnisse für die RT-SAFT Rekonstruktion an einer austenitischen Naht und einer Mischnaht sind in Abb. 7a) und Abb. 8a) dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Testnuten als rote Linien in den Darstellungen markiert. Sowohl der Winkelspiegel am Fußpunkt der Testreflektoren als auch die Rissspitzen sind deutlich sichtbar und werden positionsrichtig dargestellt. Zur Vergleich sind in Abb. 7b) und Abb.

8b) konventionelle SAFT-Rekonstruktionsergebnisse unter Annahme isotroper Materialeigenschaften dargestellt, die ohne Ray-Tracing-Korrektur der Laufzeiten berechnet wurden. Während für die anisotrope Naht nur eine geringe Verbesserung erreicht werden kann, etwa bei der Lokalisation der Risspitze und einem leicht verbesserten SNR, ist der Effekt des RT-SAFT bei der Mischnaht deutlich erkennbar. Hier wurde eine deutliche Verbesserung der SNR und damit der Fehlerauffindbarkeit erzielt. Ohne RT-SAFT ist die Risspitze kaum sichtbar.

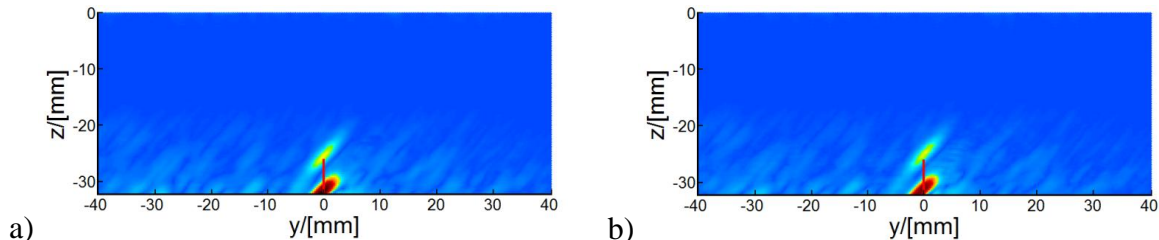


Abb. 7. a) RT-SAFT-Rekonstruktion mit Messdaten einer austenitischen Schweißnaht, b) konventionelle SAFT-Rekonstruktion

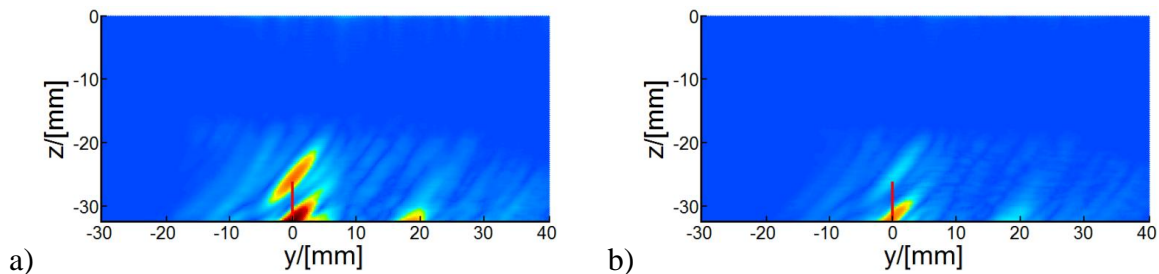


Abb. 8. a) RT-SAFT-Rekonstruktion mit Messdaten einer Mischnaht, b) konventionelle SAFT-Rekonstruktion

4. Zusammenfassung

Mit der RT-SAFT wurde ein neuartiger Ansatz für die Querfehlerprüfung in austenitischen Schweißnähten und Mischnähten präsentiert. Um ein möglichst zuverlässiges Prüfergebnis zu erhalten, wurde das SAFT-Verfahren zur Rekonstruktion der Daten verwendet und durch eine Kombination mit einem 3-D-Ray-Tracing und einem erweiterten Schweißnahtmodell (LSM) an die inhomogenen und anisotropen akustischen Eigenschaften des austenitischen Schweißnahtgefüges angepasst. Während das Ray-Tracing die Schalllaufzeiten zwischen Prüfkopf und Rekonstruktionsfläche bestimmt und in einer Wertetabelle abspeichert, die dann als Eingabewerte für das SAFT verwendet wird, liefert das LSM eine diskretisierte, abschnittsweise homogene Beschreibung der Schweißnaht und macht die komplexe Struktur in Bereich der Naht mathematisch zugänglich.

Für die Prüfung wurde eine V-Anordnung von zwei Gruppenstrahlerprüfköpfen eingesetzt, die einen Pfad entlang der Schweißnaht abscannt. Die Prüfung erfolgt ausschließlich mit Longitudinalwellen. Die Anwendbarkeit des Verfahrens wurde an austenitischen Schweißnähten und an Mischnähten experimentell demonstriert. Es konnte gezeigt werden, dass der Winkelspiegel und die Spitze der künstlichen Testnuten mit sehr gutem Signal-Rausch-Verhältnis abgebildet werden. Vergleiche mit Prüfergebnissen, die aus denselben Datensätzen jedoch unter Verwendung eines einfachen SAFT-Algorithmus berechnet wurden, haben gezeigt, dass durch Verwendung von RT-SAFT vor allem bei den komplex aufgebauten Mischnähten eine deutliche Verbesserung hinsichtlich der Lokalisierbarkeit und des SNR erreicht werden kann. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von Shlivinski und Langenberg [3] bei der Anwendung des von ihnen entwickelten *InaSAFT* zur Rekonstruktion von Längsfehlern in Mischnähten erzielt. Wenngleich die

Autoren ihren Algorithmus nur an synthetischen Daten überprüft haben, so zeigten ihre Ergebnisse auch deutliche Verbesserungen zu den Resultaten, die mit einem isotropen Modell berechnet wurden.

Bisher wurde die vorgestellte Methode nur für ebene Geometrien entwickelt und überprüft. Es ist jedoch zu erwarten, dass sie sich leicht auf zylindrische Geometrien übertragen lässt, wie sie für die Rohrleitungsprüfung benötigt werden. Abschließend muss darauf hingewiesen werden, dass die Qualität der Rekonstruktion in hohem Maße von der genauen Kenntnis der Schweißnahtparameter, also der elastischen Konstanten und der Kornorientierung, abhängt. Diese Werte sind jedoch in der Praxis, besonders in Altanlagen nur schwer zu ermitteln.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 1501365. Die Autoren bedanken sich bei der MPA Stuttgart und dem IZFP Saarbrücken für die erfolgreiche Zusammenarbeit.

References

- [1] V. Munikoti, G. Brekow, U. Tessaro, A. Erhard: Ultrasonic testing for transverse discontinuities in dissimilar welds: theoretical and experimental results. *Materials Evaluation*, Vol.62 (2004), Nr.11, S. 1148-1152.
- [2] M. Spies, W. Jager, Synthetic aperture focusing for defect reconstruction in anisotropic media, *Ultrasonics* 41 (2003) 125–131.
- [3] A. Shlivinski, K.J. Langenberg, Defect imaging with elastic waves in inhomogeneous-anisotropic materials with composite geometries. *Ultrasonics* 46 (2007) 89–104.
- [4] A.E. Bazulin, E.G. Bazulin, D.A. Koval, Application of the TANDEM scheme for reconstructing flaw images by the SAFT method, *Russ. J. Nondestruct. Test.* 45(7) (2009) 452–463.
- [5] J.A. Ogilvy, A layered media model for ray propagation in anisotropic inhomogeneous materials. *Appl. Math. Model.* 14 (1990) 237–247.
- [6] J. Moysan, A. Apfel, G. Corneloup, B. Chassignole, Modelling the grain orientation of austenitic stainless steel multipass welds to improve ultrasonic assessment of structural integrity, *Int. J. Press. Vessels Piping* 80 (2003) 77–85.
- [7] C. Höhne, S. Kolkoori, M.U. Rahman, R. Boehm, J. Prager, SAFT Imaging of Transverse Cracks in Austenitic and Dissimilar Welds, *J. Nondestruct. Eval.* (2012) DOI 10.1007/s10921-012-0159-3.
- [8] S. Kolkoori, M.U. Rahman, J. Prager, Effect of columnar grain orientation on ultrasonic plane wave energy reflection and transmission behaviour in anisotropic austenitic weld materials, *J. Nondestruct. Eval.* 31(3) (2012) 253–269.
- [9] W. Müller, V. Schmitz, G. Schäfer, Reconstruction by the synthetic aperture focussing technique (SAFT), *Nucl. Eng. Des.* 94 (1986) 393–404.
- [10] A. Chahbaz, R. Sicard, Comparative Evaluation Between Ultrasonic Phased Array And Synthetic Aperture Focusing Techniques, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation: Vol. 22, American Institute of Physics (AIP) Conference Proceedings*, 657 (2003) 769-776.
- [11] G. Schenk, U. Völz, E. Dohse, L. Bauer: COMPASXL - Outstanding number of channels with a new phased array system. In: *Proceedings of ECNDT 11, Berlin, 25-29, 2006.*