

Nachweis und Größenbestimmung realistischer Testfehler in austenitischen Werkstoffen mittels Ultraschall und die Grenzen bei der Prüfung durch die Schweißnaht

Sandra DUGAN *, Sabine WAGNER *, Hans RIEDER **, Alexander DILLHÖFER **,
Martin SPIES **

* Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart MPA

** Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM

Kurzfassung. Für die zuverlässige Beurteilung der Integrität und Lebensdauer von Komponenten sind ein sicherer Nachweis von Fehlstellen sowie die möglichst genaue Bestimmung der Fehlerabmessungen von großer Bedeutung. Insbesondere bei Fehlern mit komplexer Geometrie wie z.B. interkristallinen Spannungskorrosionsrissen kann die Analysetechnik SAFT zu deutlichen Verbesserungen bei der Fehlercharakterisierung beitragen. Im Fall von austenitischen Schweißnähten mit interkristallinen Spannungskorrosionsrissen in der Wärmeeinflusszone konnten bei vollständiger Zugänglichkeit von beiden Seiten der Naht bereits mit Standard-Prüftechnik sehr gute Ergebnisse erzielt werden, sowohl beim Nachweis als auch bei der Ermittlung der Fehlertiefe. Ist dagegen die Einschallung nur von einer Seite der Naht möglich, wird die Interpretation der Ultraschallsignale durch Reflexionen und Streuung an der Schmelzlinie und in der Kornstruktur der Schweißnaht erheblich erschwert. In vielen Fällen ist ein sicherer Fehlernachweis nicht möglich, das Risiko für Fehlinterpretationen steigt deutlich an. In diesem Beitrag sollen Ergebnisse verschiedener Prüftechniken mit und ohne SAFT-Analyse bei der Prüfung an austenitischen Schweißnähten mit unterschiedlichen Testfehlern dargestellt und die Grenzen der Zuverlässigkeit der Prüfung bei eingeschränkter Zugänglichkeit diskutiert werden.

Einführung

Die Schwierigkeiten, die sich bei der Ultraschallprüfung an austenitischen Schweißnähten und Mischschweißnähten ergeben aufgrund der elastischen Anisotropie des Materials in Kombination mit der stängelkristallinen, inhomogenen Kornstruktur in der Schweißnaht, sind seit langer Zeit Gegenstand von Untersuchungen. Simulationen der Ultraschallausbreitung in Austenit mit Stängelkristall-Struktur haben wesentlich zum Verständnis der Phänomene bei der Ultraschallprüfung beigetragen und durch Weiterentwicklung von Prüf- und Analysetechniken konnten deutliche Fortschritte beim Fehlernachweis erzielt werden.

Neben dem Einfluss der Kornstruktur der Schweißnaht, ist bei der Bewertung von Ultraschallprüfungen auch der Einfluss der Fehlereigenschaften zu betrachten. Reale Risse,



welche bei Betrieb einer Komponente entstehen, unterscheiden sich im Allgemeinen von den beim Nachweis der Eignung von Prüftechniken und zur Einstellung der Prüfempfindlichkeit verwendeten künstlichen Reflektoren wie Bohrungen und Nuten. Raue Fehleroberflächen und starke Schräglage oder Verzweigung führen zu deutlichen Unterschieden bei der Reflexion und Streuung von Ultraschall. Untersuchungen an austenitischen Testkörpern mit interkristallinen Spannungskorrosionsrissen im Grundwerkstoffbereich haben gezeigt, dass auch die stark verzweigten Risse mit gutem Signal-Rausch-Verhältnis nachweisbar sind, die Fehlergröße aber teilweise stark unterschätzt wird, wenn lediglich eine Bewertung über die Signalamplitude im Vergleich mit Nuten vorgenommen wird [1][2]. Eine Abschätzung der Risstiefe über die charakteristischen Signalmuster der Reflexionen aus den komplex verzweigten Rissflächen liefert dagegen gute Ergebnisse und kann durch Anwendung der 3D-SAFT-Rekonstruktion noch deutlich verbessert werden [3].

Um den Einfluss der Schweißnaht auf die Zuverlässigkeit des Fehlernachweises und der Fehlergrößenbestimmung einzubeziehen, wurden die Untersuchungen erweitert auf Testkörper mit austenitischer Schweißnaht. Einige Ergebnisse von Ultraschallprüfungen und 3D-SAFT-Analyse an austenitischen Schweißnähten mit verschiedenen Testfehlern werden hier dargestellt und die Grenzen der Zuverlässigkeit der Prüfung bei eingeschränkter Zugänglichkeit diskutiert.

1. Testkörperauswahl

Für die Untersuchungen wurden austenitische Testkörper aus dem Bestand der MPA Universität Stuttgart verwendet, welche zum Teil in einem abgeschlossenen Vorhaben im Rahmen der Reaktorsicherheitsforschung hergestellt wurden [4]. Es handelt sich um schmale flache Proben mit einer Schweißnahtlänge von je ca. 40 mm, welche aus mit Stumpfnahht verschweißten austenitischen Platten gesägt wurden. Für die Verbindungsnaht wurden unterschiedliche Nahtformen gewählt: U-Naht mit breitem oder engem Spalt oder asymmetrische Doppel-U-Naht.

Die Testfehler sind jeweils parallel zur Schweißfortschrittsrichtung orientiert (Längsfehler) und erstrecken sich über die gesamte Breite, d.h. die Fehlerlänge entspricht der gesamten Testkörperbreite von ca. 40 mm, die Fehlertiefen liegen im Bereich von etwa 10 % bis 50 % der Wanddicke. Es wurden verschiedene Fehlertypen eingebracht: künstliche Fehler (Nuten, Bohrungen) sowie realistische Fehler (Risse). Bei den realistischen Fehlern handelt es sich überwiegend um interkristalline Spannungskorrosionsrisse im Bereich der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht mit unterschiedlichen Risstiefen.

Zur Darstellung der Kornstruktur der Schweißnaht und zur Abschätzung der Fehlerorientierung sowie der Fehlertiefe wurde an beiden Seitenflächen jedes Testkörpers der Bereich des Schweißnahtquerschnitts poliert und geätzt. Zusätzlich wurden die Testfehler mittels Farbeindringprüfung und Durchstrahlungsprüfung dokumentiert. In Abb. 1 sind die Abmessungen der Testkörper sowie ein Beispiel für die Testkörperdokumentation dargestellt. Wie im Fall der Grundwerkstoff-Testkörper weisen auch die interkristallinen Spannungskorrosionsrisse in der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht teilweise starke Verzweigung auf. Sowohl der Grad der Verzweigung als auch die Orientierung des Risses und der einzelnen Rissflächen unterscheiden sich für die verschiedenen Risse. Es liegen also verschiedene Schräglagen der Risse relativ zur Testkörperoberfläche und relativ zur Schweißfortschrittsrichtung vor.

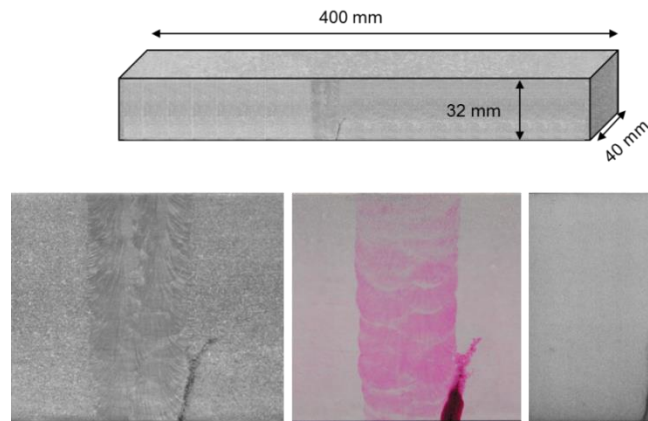


Abb. 1. Testkörperabmessungen (oben) und Beispiel für die Dokumentation eines Testfehlers (unten); links: geätzter Makroschliff; Mitte: Eindringprüfung; rechts: Durchstrahlungsprüfung (aus ([5])).

2. Durchgeführte Untersuchungen

An verschiedenen austenitischen Ultraschalltestkörpern mit interkristallinen Spannungskorrosionsrissen wurden mechanisierte Ultraschallprüfungen mit Standardprüftechnik durchgeführt, teilweise mit anschließender 3D-SAFT-Rekonstruktion der Prüfdaten.

Bei den Prüfungen kam vorwiegend die Schrägeinschallung mit Transversalwellen-Prüfköpfen bei einem Einschallwinkel von 45° zum Einsatz. Diese wird als eine für den Prüfbereich der Wärmeeinflusszone vor der Schweißnaht geeignete Prüftechnik vielfach für die Prüfung an austenitischen Schweißnähten verwendet. Die Prüfungen mit Standardtechnik wurden mit einem 45° SE-Prüfkopf mit einer Frequenz von 1 MHz durchgeführt. Für die Aufnahme der Daten zur anschließenden 3D-SAFT-Rekonstruktion wurde ein 45° Einschlinger-Prüfkopf mit Frequenz 2,25 MHz verwendet. Die Prüfungen wurden als Mäander-Scans über den Bereich der Schweißnaht ausgeführt, wobei die Datenaufnahme in Scan-Richtung nur bei der Fahrt in Einschallrichtung erfolgte. Es wurden jeweils Prüfungen mit Einschallung in beide Richtungen durchgeführt (+y bzw. $+45^\circ$ Richtung und -y bzw. -45° Richtung, siehe Abb. 2).

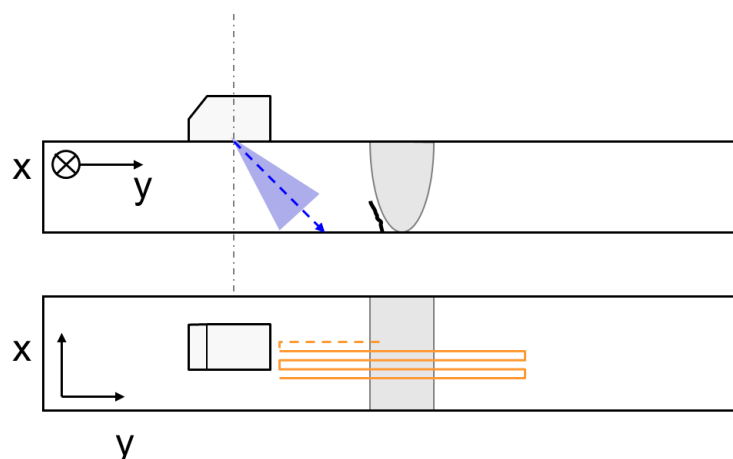


Abb. 2. Schema der mechanisierten Ultraschallprüfung an austenitischen Schweißnaht-Testkörpern (oben: Seitenansicht; unten: Draufsicht).

3. Ergebnisse der Ultraschallprüfungen

3.1 Ultraschallprüfungen mit Standardtechnik

Das Ergebnis der Prüfung mit 45° SET 1 MHz am Testkörper 11 ist anhand des Ultraschall-B-Bildes in Abb. 3 dargestellt. Beim Testkörper 11 handelt es sich um einen Testkörper mit Engspalt-U-Naht. Der interkristalline Spannungskorrosionsriss liegt in der Wärmeinflusszone und hat eine Tiefe von ca. 12 mm, ermittelt anhand der Anzeigen der Eindringprüfung an den Seitenflächen des Testkörpers. Die Verzweigung beginnt ab etwa der Hälfte der Risstiefe. Neben dem deutlich ausgeprägten Signal vom Fußpunkt des Risses an der Gegenoberfläche, sind auch Signale von Reflexionen aus den verzweigten Rissästen zu erkennen. Diese erlauben eine grobe Abschätzung der Risstiefe, die hier einen Wert von ca. 15 mm ergibt.

Betrachtet man die Amplitude des Fußpunktsignals im Vergleich mit einem künstlichen Vergleichsreflektor, so stellt man fest, dass diese deutlich unterhalb des Signals einer Vergleichsnut mit einer Tiefe von 10 mm liegt. Wie erwartet, bestätigt sich hier also das Ergebnis der vorangegangenen Ultraschalluntersuchungen an interkristallinen Spannungskorrosionsrissen im austenitischen Grundwerkstoff [1][2]. Gegenüber der Nut weist der interkristalline Spannungskorrosionsriss eine signifikant geringere Reflektivität auf, ist aber dennoch mit gutem Signal-Rausch-Verhältnis nachweisbar. Der Einfluss der angrenzenden Schweißnaht auf den Nachweis des Fehlers ist bei der Anschallung durch den Grundwerkstoff gering.

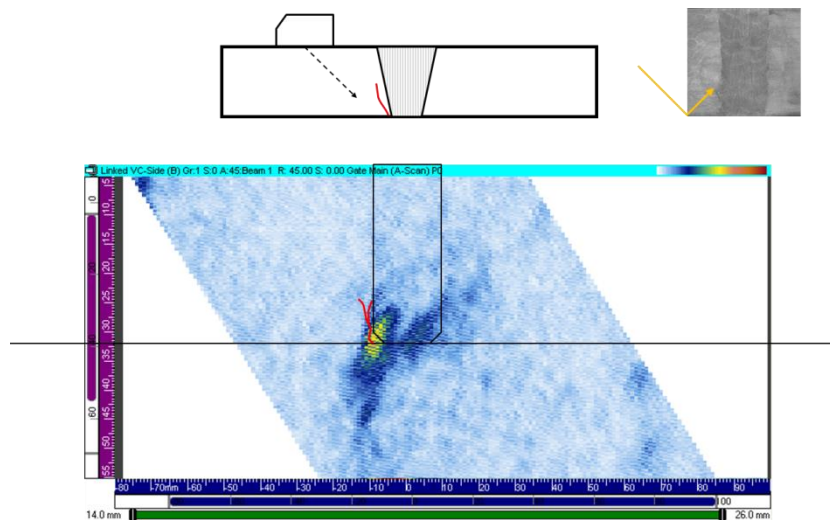


Abb. 3. B-Bild der Prüfung mit 45° SET 1 MHz am Testkörper 11: Risstiefe ca. 12 mm.

Die Prüfungen mit der 45° SET 1 MHz Technik an Testkörpern mit asymmetrischer Doppel-U-Naht lieferten vergleichbare Ergebnisse. Auch hier ist der Riss in der Wärmeinflusszone bei Einschallung durch den Grundwerkstoff mit gutem Signal-Rausch-Verhältnis nachweisbar und die Abschätzung der Risstiefe über die Signale der Risszweige ergibt eine relativ gute Übereinstimmung mit den aus der Eindringprüfung an den Seitenflächen ermittelten Fehlertiefen. Abb. 4 zeigt das Ultraschall-B-Bild der Prüfung am Testkörper 13 mit einem ca. 16 mm tiefen interkristallinen Spannungskorrosionsriss, welcher einen leicht gebogenen Verlauf und Verzweigung nach etwa 10 mm Tiefe aufweist.

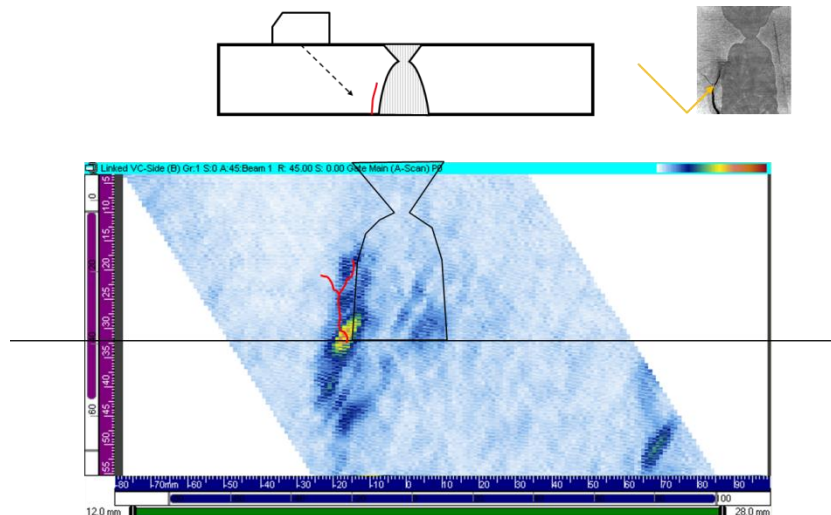


Abb. 4. B-Bild der Prüfung mit 45° SET 1 MHz am Testkörper 13: Risstiefe ca. 16 mm.

Bei der Einschallung von der dem Fehler abgewandten Seite der Schweißnaht (Anschallung des Risses durch das Schweißgut) zeigt sich der Einfluss der Schweißnaht auf die Zuverlässigkeit der Prüfaussage bei der Ultraschallprüfung mit der angewandten Prüftechnik. Zum einen ist der Fehlernachweis durch die Schweißnaht erheblich eingeschränkt aufgrund des erheblich reduzierten Signal-Rausch-Verhältnisses der Rissignale. Zum anderen treten am Interface zwischen Grundwerkstoff und Schweißgut Reflexionen auf, deren Amplituden in einigen Fällen nahezu vergleichbar mit den Fußpunktsignalen der Risse sind.

Der Einsatz weiterer Prüftechniken mit Longitudinalwellen-Prüfköpfen und weiteren Einschallwinkeln ist für eine sichere Unterscheidung zwischen Signalen von relevanten Fehlern und Signalen aus Kornstruktur und Interface der Schweißnaht und damit für die zuverlässige Bewertung dieser Schweißnähte zwingend erforderlich.

Prüfungen mit Longitudinalwellentechnik 70° SEL bei 2 MHz haben gezeigt, dass die Risse in den austenitischen Testkörpern auch durch die Naht sicher nachgewiesen werden können. Die über die Wellenumwandlung der begleitenden Transversalwelle entstehenden Signale (Nebenechos) liefern hier zusätzliche Informationen für die Bewertung. Eine Fehlergrößenbestimmung ist jedoch nicht möglich.

3.1 Ultraschallprüfungen mit 3D-SAFT-Rekonstruktion

Bei den Ultraschallprüfungen an den austenitischen Grundwerkstoffproben [3] hatte sich gezeigt, dass mittels 3D-SAFT-Rekonstruktion eine optimierte Darstellung der verzweigten interkristallinen Spannungskorrosionsrisse erreicht werden kann. Die überlagerte Darstellung der Rekonstruktionsbilder für beide Einschallrichtungen lieferte eine sehr realitätsnahe Abbildung der Risse mit ihren Verzweigungen.

Die gleiche Prüftechnik mit anschließender 3D-SAFT-Rekonstruktion wurde nun auch auf die Proben mit Schweißnaht angewandt. Die klare Verbesserung der Abbildung von Risszweigen und die daraus resultierende bessere Genauigkeit bei der Risstiefenbestimmung bestätigt sich hier für den Fall der Einschallung von der dem Riss zugewandten Seite der Schweißnaht (Anschallung des Risses durch den Grundwerkstoff).

Abb. 5 zeigt die rekonstruierten Daten der Prüfung am Testkörper 15 als überlagerte Darstellung der Einschallung von beiden Seiten der Schweißnaht im B- und C-Bild. Testkörper 15 ist vergleichbar mit Testkörper 13, stammt aus der gleichen geschweißten Platte (asymmetrische Doppel-U-Naht), der interkristalline Spannungskorrosionsriss in der

Wärmeeinflusszone hat einen ähnlichen Verlauf wie derjenige im Testkörper 13. Der Riss kann mittels Fußpunkt- und Rissspitzen- bzw. Risszweigsignalen sicher nachgewiesen werden und die aus den Ultraschalldaten ermittelte Risstiefe von 17 mm stimmt sehr gut überein mit der an den Seitenflächen bestimmten Risstiefe. Der Vergleich mit der gegenüberliegenden fehlerfreien Seite der Schweißnaht zeigt hier einen deutlichen Unterschied zwischen Signalen der Interface-Reflexionen und den Rissignalen bei der Einschallung in +y-Richtung. Bei den im Bereich innerhalb des Schweißgutes an der inneren Oberfläche erkennbaren Signalen handelt es sich möglicherweise um den durch die Schweißnaht nachgewiesenen Riss, der aber aufgrund von Abweichungen in der Schallgeschwindigkeit im Schweißgut oder Schallablenkung an der falschen Stelle abgebildet wird, oder aber um Reflexionen am Interface Schweißgut zu Grundwerkstoff. Bei nur einseitiger Zugänglichkeit für die Prüfung von der dem Riss abgewandten Seite der Schweißnaht könnte es so zu einer Fehlinterpretation oder Fehllokalisierung kommen.

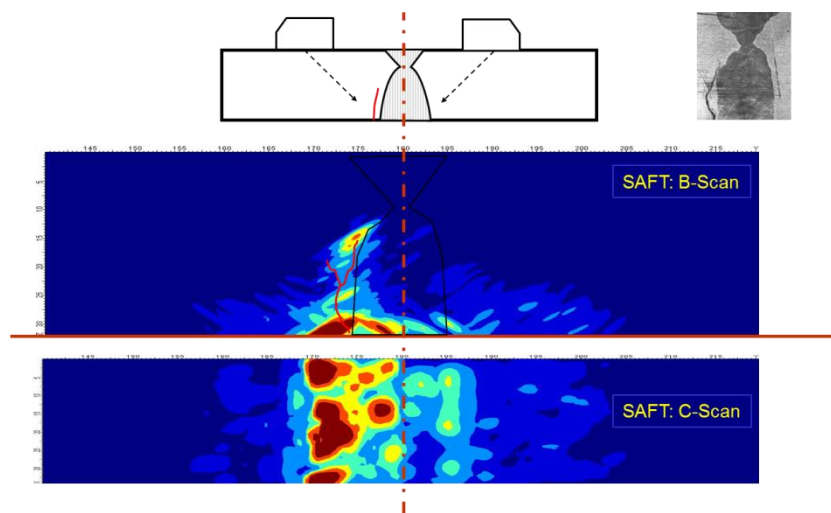


Abb. 5. B-Bild und C-Bild der rekonstruierten Daten der Prüfung mit 45° ET 2,25 MHz am Testkörper 15; überlagerte Darstellung der Daten für beide Einschallrichtungen +45°/-45°.

Noch deutlicher zeigt sich die Problematik der Interface-Reflexionen für den Testkörper 11, siehe Abb. 6. Auch hier ist die Überlagerung der rekonstruierten Daten für die Einschallrichtungen +y und -y dargestellt. Der Riss ist bei Anschallung durch den Grundwerkstoff wiederum gut nachweisbar und die Risstiefenbestimmung liefert mit ca. 14 mm eine recht gute Übereinstimmung mit der Eindringprüfung. Allerdings treten bei der verwendeten Prüftechnik auch auf der fehlerfreien Seite der Schweißnaht entlang des Interfaces Reflexionen auf, deren Amplituden mit denen der Rissignale vergleichbar sind. Eine zuverlässige Unterscheidung zwischen rissbehafteter und rissfreier Schweißnaht ist also in diesem Fall ohne den Einsatz zusätzlicher Prüftechniken nicht möglich.

Bei der 45° SET 1 MHz Prüftechnik treten bei diesem Testkörper kaum Interface-Reflexionen auf. Diese könnte also zum Nachweis verwendet und mit einer weiteren Technik zur Fehlertiefenbestimmung kombiniert werden.

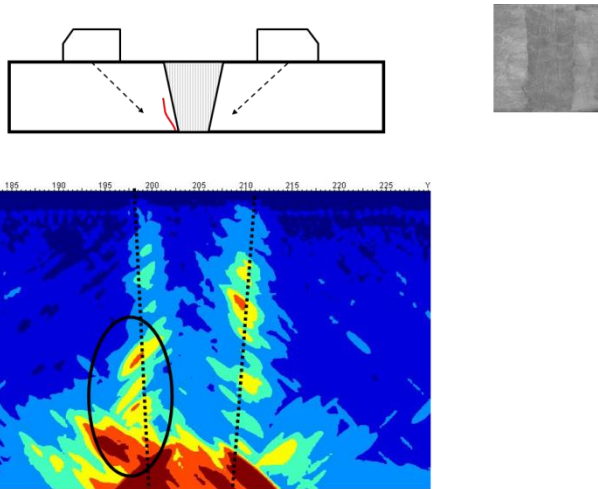


Abb. 6. B-Bild der rekonstruierten Daten der Prüfung mit 45° ET 2,25 MHz am Testkörper 11; überlagerte Darstellung der Daten für beide Einschallrichtungen +45°/-45°.

4. Zusammenfassung

Die Ultraschalluntersuchungen an interkristallinen Spannungskorrosionsrissen in der Wärmeeinflusszone austenitischer Schweißnähte haben gezeigt, dass bereits einfache Standard-Prüftechniken in der Lage sind, bei Einschallung durch den Grundwerkstoff die verzweigten Risse sicher nachzuweisen. Eine grobe Abschätzung der Risstiefen ist in vielen Fällen anhand der Reflexionen an Risszweigen möglich. Mit einer 3D-SAFT-Rekonstruktion kann die Genauigkeit der Fehlertiefenbestimmung noch erheblich verbessert werden. Die Ergebnisse stimmen gut überein mit den in [6] angegebenen Fehlertiefen für die untersuchten Testkörper.

Für den Fall der Einschallung von der dem Fehler abgewandten Seite der Schweißnaht, also Anschallung des Fehlers durch das Schweißgut hindurch, ist zum einen der Fehlernachweis durch den Einfluss der Schweißnaht deutlich erschwert, zum anderen zeigt sich, dass in Abhängigkeit von Schweißnahtgeometrie und Schweißnahteigenschaften sowie verwendeter Prüftechnik teilweise Interface-Reflexionen und Reflexionen an Stängelkristallen in der Schweißnaht zu Ultraschallsignalen führen, die in der Amplitude und im Signalmuster mit Signalen von Fehlern vergleichbar sind und so zu Fehlinterpretationen führen können. Eine Prüftechnik für den sicheren Nachweis und die zuverlässige Größenbestimmung bei Einschallung nur von der fehlerabgewandten Seite (durch das Schweißgut hindurch) konnte für diese Testkörper noch nicht ermittelt werden. Auch für die in [6] dargestellten guten Ergebnisse wurden zur Fehlerabbildung Signale von Prüfkopfpositionen mit herangezogen, die eine Anschallung des Fehlers durch den Grundwerkstoff erlaubten.

Für die korrekte Bewertung der Ultraschallprüfung dieser Schweißnähte bei einseitiger Zugänglichkeit scheint eine Kombination verschiedener Prüftechniken unbedingt erforderlich. Mit der Anwendung von Rekonstruktionstechniken kann die Aussagesicherheit verbessert werden, insbesondere was die Ermittlung von Fehlertiefen betrifft.

Referenzen

- [1] S. Dugan, S. Zickler: Comparison of Different Test Reflectors for Ultrasonic Testing. 35th MPA-Seminar, Stuttgart, 2009
- [2] S. Dugan, S. Wagner, S. Zickler: Herstellung von Testkörpern mit realistischen Fehlern für die Ultraschallprüfung. Berichtsband BB 122-CD DGZfP-Jahrestagung (2010), DGZfP, Berlin
- [3] M. Spies, H. Rieder, A. Dillhöfer, S. Dugan: Abbildung und Größenbestimmung von Spannungskorrosionsrissen in austenitischen Komponenten mittels Synthetischer Apertur Fokus Technik. Berichtsband BB-127-CD DGZfP-Jahrestagung (2011), DGZfP, Berlin.
- [4] S. Dugan, S. Wagner: Abschlussbericht über die von der MPA Universität Stuttgart durchgeführten Arbeiten BMWi-Vorhaben 1501370. MPA-Auftragsnummer 8404 000 000, 2013, Anlage zu [6]
- [5] S. Dugan: Ultrasonic inspection of austenitic stainless steel welds with artificially produced stress corrosion cracks. Review of Progress in Quantitative NDE Vol. 33, 2013
- [6] A. Bulavinov, F. Walte, S. Pudovikov: Entwicklung einer innovativen Ultraschall- Prüftechnik für den Fehlernachweis und die Größenbestimmung an austenitischen Schweißnähten und Mischschweißnähten im Primärkreis von KKW (Vorwiegend Längsfehlerprüfung). Reaktorsicherheitsforschung-Vorhaben Nr. 1501370, Abschlussbericht 2013.