

# Abbildung und Größenbestimmung von Spannungskorrosionsrissen in austenitischen Komponenten mittels Synthetischer Apertur Fokus Technik

Martin SPIES\*, Hans RIEDER\*, Alexander DILLHÖFER\*, Sandra DUGAN\*\*

\*Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern, Tel. +49-631-31600-4276, Email [Martin.Spies@itwm.fraunhofer.de](mailto:Martin.Spies@itwm.fraunhofer.de)

\*\*Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart, Tel. +49-711-685-62700, Email [Sandra.Dugan@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:Sandra.Dugan@mpa.uni-stuttgart.de)

**Kurzfassung.** Rissbildung und -wachstum durch interkristalline Spannungsrisskorrosion betrifft bei Mischnähten vor allem das Schweißgut aus Nickellegierungen, bei einigen austenitischen Cr-Ni-Stählen auch die Wärmeeinflusszone. Für solche stark verzweigten Risse können amplitudenbasierte Ultraschallverfahren zur Größenbestimmung versagen. In diesem Beitrag befassen wir uns mit der Detektion und Größenbestimmung von Spannungskorrosionsrissen (SKR). Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses der Ultraschallprüfdaten, insbesondere für die Rissspitzenanzeigen, verwenden wir die Synthetische Apertur Fokus Technik (SAFT). Mehrere Testkörper mit interkristallinen SKR mit Tiefen von 2.5 mm bis 16 mm wurden mittels konventioneller Prüftechniken zur Akquisition der B-Scan-Daten und anschließender SAFT-Verarbeitung erfolgreich untersucht.

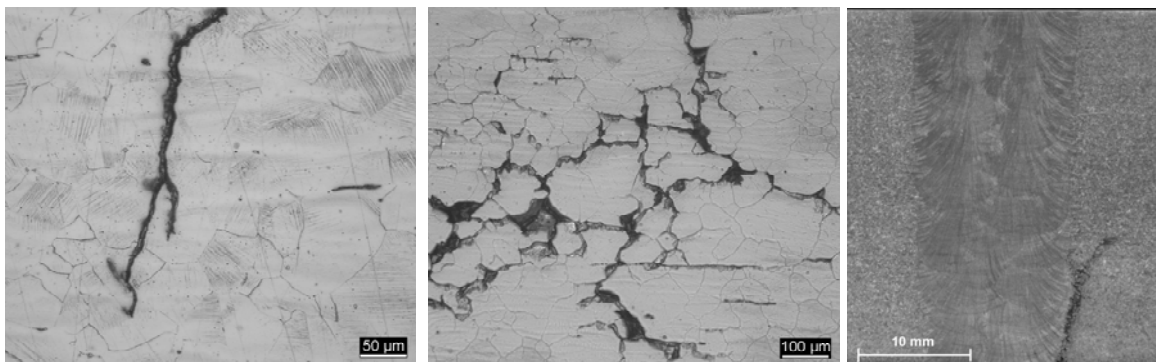
## 1. Einführung

In kerntechnischen Anlagen gibt es verschiedene Alterungsmechanismen, die die Verbesserung von Ultraschallprüfverfahren und ihrer Fähigkeiten hinsichtlich der Fehlerdetektion erfordern [1]. Auf das Auftreten von im Betrieb entstandenen Schäden an Mischschweißverbindungen in verschiedenen ausländischen kerntechnischen Anlagen [2] hat man in Deutschland mit entsprechenden Untersuchungen reagiert. Das Problem der Rissbildung und des Risswachstums durch interkristalline Spannungsrisskorrosion betrifft bei Mischnähten vor allem das Schweißgut aus Nickellegierungen, bei diesbezüglich anfälligen austenitischen Cr-Ni-Stählen neben der Schweißnaht insbesondere auch die Wärmeeinflusszone. Zusätzlich zu den bekannten Schwierigkeiten bei der Ultraschallprüfung dieser Schweißnähte kann bei interkristallinen Spannungskorrosionsrissen die Fehlerbewertung durch die Risseigenschaften erschwert sein. Für solche stark verzweigten Risse können amplitudenbasierte Ultraschallverfahren zur Größenbestimmung versagen, da die komplizierte Rissgeometrie die Fehlersignale erheblich beeinflusst [3]. Wie wir anhand von Simulationsrechnungen für optisch aufgenommene, reale raue Rissflächen illustrieren, wird das ursprünglich spekulär reflektierte Schallfeld bei zunehmender Unregelmäßigkeit der Rissfläche zu einem stark diffus gestreuten Feld. Damit sinkt gleichzeitig die Verlässlichkeit des Ultraschallverfahrens zur Fehlergrößenbestimmung [4].

In diesem Beitrag befassen wir uns daher mit der Detektion und der Größenbestimmung von Spannungskorrosionsrissen in austenitischen Stählen. Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses der Ultraschallprüfdaten, insbesondere für die Rissspitzenanzeigen, verwenden wir die Synthetische Apertur Fokus Technik (SAFT) [5-8]. Mehrere Testkörper mit interkristallinen Spannungskorrosionsrissen mit durchschnittlichen Tiefen von 2.5 mm bis 16 mm wurden untersucht, wobei wir konventionelle Prüftechniken mittels Winkelschallung zur Akquisition der B-Scan-Ultraschalldaten eingesetzt haben. Die Größenbestimmung („Sizing“) erfolgte auf Basis der SAFT-Rekonstruktionen durch Auswerten der Winkelspiegel- und Rissspitzenanzeigen, wobei Ergebnisse vergleichender Untersuchungen mittels Farbeindring- und Durchstrahlungsprüfung zur Verfügung standen. Die Vorteile von SAFT bei der Verbesserung der Erkennung von Rissspitzen werden durch die Ergebnisse bestätigt. Weitere Verbesserungen durch die Kombination verschiedener Prüftechniken inklusive der Time-of-Flight Diffraction Technique (TOFD) wurden in [7] diskutiert.

## 2. Geometrie interkristalliner Spannungskorrosionsrisse

Interkristalline Spannungskorrosionsrisse unterscheiden sich von künstlichen Fehlern wie Nuten und auch von ermüdungsbedingt entstandenen Rissen in ihrer Geometrie und in der Struktur der Rissflächen. Während Nuten und Schwingrisse eine sehr glatte, senkrecht zur Ausgangsoberfläche orientierte Rissfläche aufweisen, verlaufen die Spannungskorrosionsrisse entlang der Korngrenzen und sind in vielen Fällen verzweigt oder verästelt, so dass eine raue, unregelmäßig orientierte Rissfläche vorliegt. Abbildung 1 zeigt den Vergleich zwischen einem Schwingriss und einem interkristallinen Spannungskorrosionsriss in austenitischem Grundwerkstoff. Interkristalline Spannungskorrosionsrisse in der Wärmeinflusszone an Schweißnähten verlaufen in vielen Fällen zunächst unverzweigt beispielsweise entlang der Schmelzlinie und verästeln erst ab einer gewissen Tiefe; ein Beispiel ist in Abbildung 1, rechts gezeigt.



**Abb. 1** Schwingriss (links) und interkristalliner Spannungskorrosionsriss in austenitischem Grundwerkstoff (Mitte) sowie entlang einer austenitischen Schweißnaht (rechts).

## 3. Streuung von Ultraschallwellen an rauen Oberflächen

Der Wirkung von verzweigten Rissen auf die Streuung bzw. Reflexion von Ultraschallwellen kann mittels eines Modellierungsansatzes für ebene Wellen illustriert werden. In [10] verwenden wir eine von Ogilvy [4] hergeleitete Integraldarstellung zur Analyse des an einem rauen Riss gestreuten Ultraschallwellenfeldes. Unter Nutzung der Kirchhoffschen Näherung und unter der Annahme, dass eine ebene Welle auf den Riss trifft, kann das gestreute skalare Wellenfeld mittels einer im Fernfeld gültigen Integraldarstellung

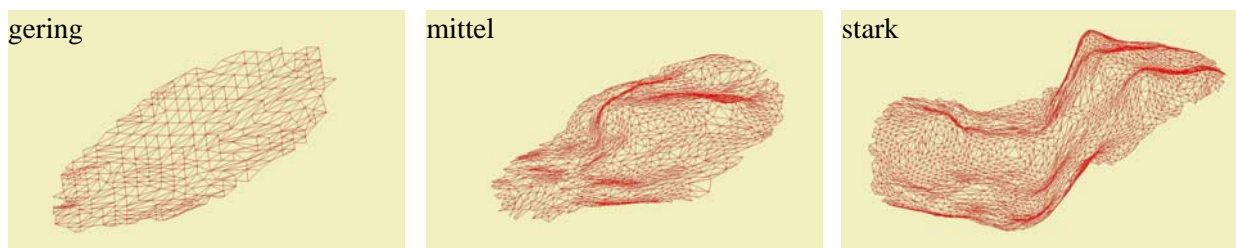
beschrieben werden. Zu deren Auswertung werden die Geometrieparameter der Rissoberfläche - Koordinaten und Normalenvektor(en) - benötigt. Bei diesem Ansatz setzt sich die streuende Oberfläche aus einer Vielzahl von dreieckigen Teilflächen zusammen, deren Knotenpunkte und Normalenvektoren mit einem optischen Messsystem bestimmt werden.

Zur Durchführung dieser Messungen wurde ein optisches High-End-System auf der Basis der Triangulierung eingesetzt [11]. Die projizierten Streifenmuster werden mit zwei Kameras beobachtet (Abb. 2) und die dreidimensionalen Koordinaten für jedes Kamera-pixel mit hoher Präzision berechnet. Am Ende der nachfolgenden Datenverarbeitung stehen die Normalenvektoren und die Scheitelpunkte der facettierten Flächen zur Verfügung; diese werden zur Berechnung der Dreiecksflächen benutzt, aus denen sich die streuende Rissfläche zusammensetzt [10]. Abbildung 2 zeigt auch die exemplarisch untersuchte Probe, ein Fragment einer ferritischen Umfangsnaht. Diese war Teil des Niederdruckvorwärmers im Sekundärkreislauf der früheren kerntechnischen Anlage Greifswald. Bei einem Drucktest vor Inbetriebnahme kam es zu einem Berstbruch der Schweißnaht, daher die bemerkenswerte raue Topologie der Rissfläche.

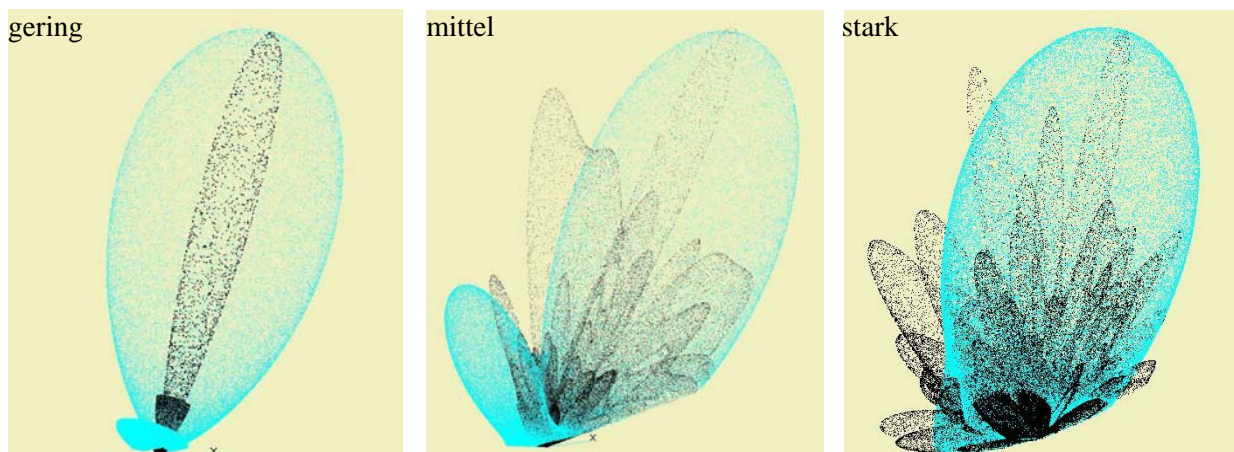


**Abb. 2** Links: optisches Messsystem ATOS II SO wie auf der 'gom' Website abgebildet [11]; rechts: Streifenprojektion auf der ferritischen Schweißnahtprobe 'Greifswald'.

Drei Bereiche mit unterschiedlichen Rauheitsgraden - gering, mittel und stark (Abb. 3) - wurden aus den Messdaten für die weiteren Betrachtungen ausgewählt. Für jedes dieser aufgezeichneten Profile wurden Berechnungen unter der Annahme durchgeführt, dass eine ebene Welle auf einen kreisförmigen Riss mit 2 mm Durchmesser, versehen mit dem jeweiligen Profil, auftrifft. Abbildung 4 zeigt die resultierenden Streu-Richtcharakteristiken für zwei unterschiedliche Frequenzen, die dem Verhältnis von Wellenlänge zu Rissdurchmesser von  $\lambda/D = 1$  und  $\lambda/D = 1/6$  entsprechen. Für die niedrigere Frequenz ähneln die Streukeulen den spekulär reflektierten Richtcharakteristiken für glatte Risse. Im Fall der höheren Frequenz sind die Streuereigenschaften wesentlich diffuser, ein Hinweis auf die schlechtere Detektierbarkeit solcher Risse.



**Abb. 3** Optisch vermessene Rissflächen der Greifswald-Probe, drei ausgewählte Oberflächenprofile mit geringer, mittlerer und starker Rauheit; letztere mit Rauheitswerte von  $R_a = 0.16 \mu\text{m}$  und  $R_{\text{max}} = 0.54 \mu\text{m}$ .



**Abb. 4** Dreidimensionale Punktwolken zur Darstellung des gestreuten Ultraschallfeldes für die Modellfehler mit geringer, mittlerer und starker Rauheit (niedrige Frequenz: blau, hohe Frequenz: schwarz).

#### 4. Eingesetzte Prüftechniken und der SAFT-Algorithmus

Leistungsfähige Ultraschalltechniken beispielsweise zur Inspektion von Schweißnähten arbeiten mit der Winkeleinschallung von Longitudinal- und Transversalwellen von beiden Seiten der Schweißnaht. Dabei ist der Sende-Empfangs-Betrieb, aber auch der Impuls-Echo-Betrieb oder eine Kombination beider möglich [7]. Der Einsatz von 3D-SAFT hat sich als im Hinblick auf die Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses als äußerst leistungsfähig erwiesen. SAFT ist daher zur Anhebung der Rissspitzensignale vorteilhaft, die in vielen Fällen im (Korn-) Rauschen verschwinden. Im Gegensatz zu (ebenen) Ermüdungsrissen sind Spannungskorrosionsrisse 'stumpf' [9], was zu einer zusätzlichen Schwächung der Rissspitzensignale führt. Um die Risslänge zuverlässig zu bestimmen und damit eine Vermaßung der Risse durchzuführen, bietet sich die Rekonstruktion der Rissspitzensignale und der Winkelspiegelanzeigen durch SAFT an.

Das Prinzip der Synthetischen Apertur Fokus Technik besteht darin, das Auswertevolumen (in 3D) bzw. die Auswerteebene (in 2D) in Voxel bzw. Pixel zu unterteilen und die aufgezeichneten, ortsbezogenen Signalamplituden entsprechend ihrer Laufzeit und dem Divergenzwinkel in den Voxeln bzw. Pixeln aufzuaddieren und zu speichern. Die Verstärkung der Nutzsignale (Signale der Reflektoren) erfolgt durch die konstruktive Überlagerung, während die statistisch verteilten Rauschanteile durch destruktive Überlagerung vermindert werden. Sowohl der nominelle Einschallwinkel, der Öffnungswinkel, der Schallaustrittspunkt und der exakte Prüfkopf Abstand, als auch die Größe der Voxel/Pixel steuern die erzielbare Genauigkeit der SAFT-Rekonstruktion. Zur Optimierung der Leistungsfähigkeit der SAFT-Rekonstruktion verwenden wir (i) die Akquisition und Digitalisierung der Hochfrequenz A-Scans mittels Linien-Scan in 2D sowie Mäander-/Kammfahrt in 3D, (ii) die virtuelle Erweiterung der Prüfkopf-Apertur durch äquidistantes Scannen mit niedrigem Rasterabstand, (iii) die Auswahl kleiner Volumenelemente (Voxel) zur Erhöhung der Auflösung und (iv) die Auswahl von Ultraschallsensoren mit einem kleinen Prüfkopfdurchmesser für eine bessere laterale Auflösung sowie einen möglichst großen Schallbündelöffnungswinkel zur Erzielung eines besseren SNR-Wertes.

Das zur Durchführung der Experimente eingesetzte Prüfsystem besteht aus einer Zwei-Kanal-Elektronik zur Ultraschallanregung, einem Standard-Datenakquisitionsmodul, einer intelligenten Scanner-Kontrolleinheit, einem Drei-Achsen-Manipulator mit flexiblen Sensorhalterungen und einem Industrie-PC [12].

## 5. Ergebnisse für IKS RK-Proben aus austenitischem Grundmaterial

An mehreren austenitischen Stahlproben haben wir Ultraschalluntersuchungen mittels konventioneller Prüftechniken in Winkeleinschallung durchgeführt, um interkristalline Spannungskorrosionsrisse zu detektieren. Mehrere Testkörper mit solchen Rissen mit durchschnittlichen Tiefen von 2.5 mm bis 16 mm standen zur Verfügung, ebenso wie zwei Testkörper mit einer KTA-Nut sowie mehreren Nuten, die über die ganze Probenbreite verlaufen. Tabelle 1 zeigt die untersuchten Proben mit ihren Abmessungen und den Reflektorparametern, die für die IK-Risse mittels Farbeindringprüfung jeweils an beiden Seiten der Probe und mittels Röntgendurchstrahlungsprüfung ermittelt wurden.

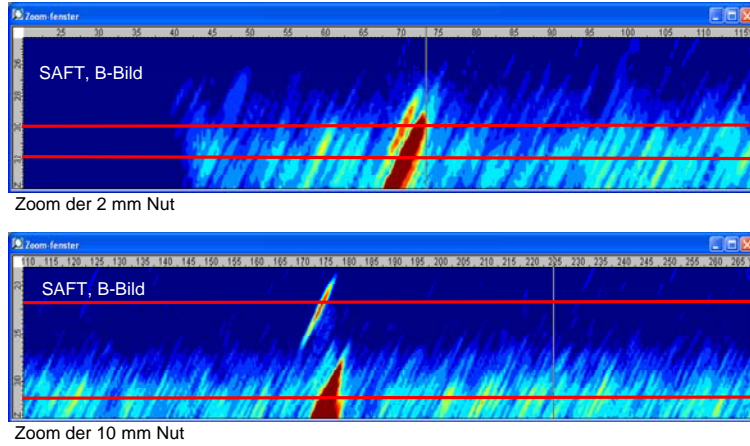
Probe	Abmessungen			Werkstoff-Nr.	Typ	Reflektor				
	Länge [mm]	Breite [mm]	Wand- dicke [mm]			Tiefe				Y- Pos. [mm]
						links [mm]	rechts [mm]	Mittel- wert [mm]	Tole- ranz [mm]	
P29	360	44	32	1.4305	IK- Riss	5 / 6	8 / 5	6	± 2	170
P30	360	44	32			6 / 7	5 / 5	5,75	± 1,25	179
P35	350	40	32	1.4948		19	13	16	± 3	172
P36	320	40	32			9 / 10	12 / 10	10,25	± 1,75	151
P37	319	40	32			17	10	13,5	± 3,5	150
P38	326	46	32			1,5	3,5	2,5	± 1	154
P39	326	41	32			4	3	3,5	± 0,5	155
P22	355	38	32	1.4401		K-Nut	---	---	2	---
					B-Nut	10	10	10	---	125
P27	354	36	32		B-Nut	2	2	2	---	229
					B-Nut	4	4	4	---	125

**Tabelle 1** Materialspezifikation und Dimensionen der untersuchten Proben sowie Kenngrößen der Reflektoren; K-Riss: Kombinationsriss (Schwingungsriß/Gewaltbruch), S-Riss: Schwingungsriß (Ermüdungsriß), B-Nut: ‚breite‘ Nut (über volle Probenbreite in x-Richtung), K-Nut: KTA-Nut (in Probenmitte, 20 mm Länge in x-Richtung).

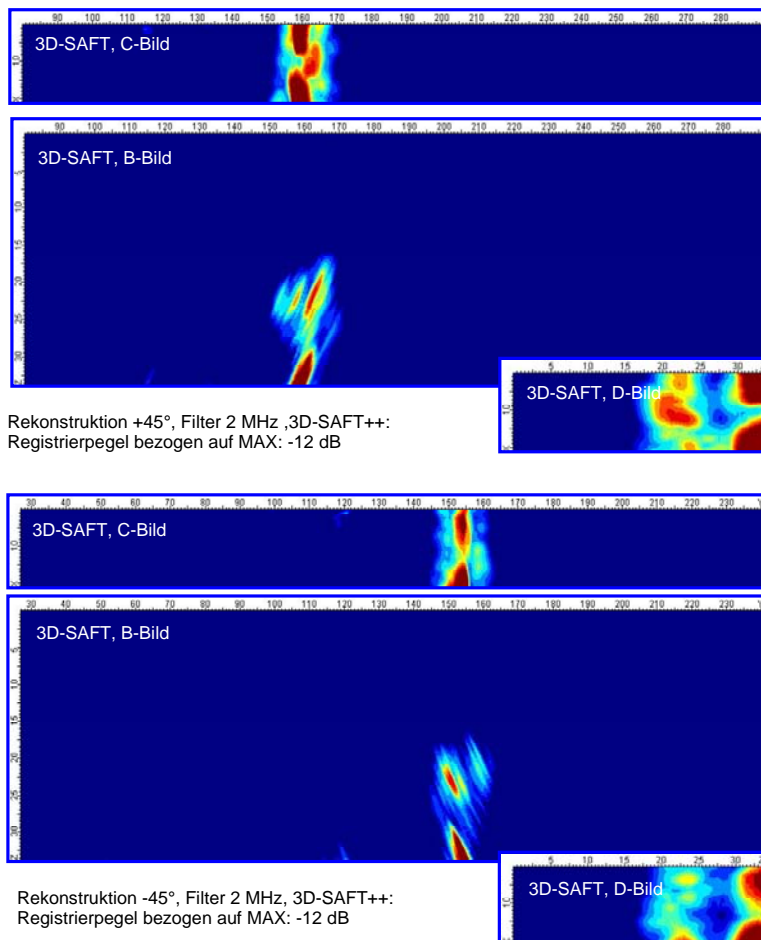
Die Prüfung erfolgte mit 3.5 MHz Standard-Prüfköpfen, die mittels entsprechender Vorlaufkeile Transversalwellen unter einem Einschallwinkel von 45° erzeugen. Die Proben wurden jeweils in zwei Richtungen definiert abgescannt (+45°, -45°) und die so aufgenommenen HF-Daten anschließend mit dem SAFT-Algorithmus bearbeitet. Um die Leistungsfähigkeit des eingesetzten 3D-SAFT-Verfahrens hinsichtlich der Risstiefenbestimmung zu eruieren, wurden zunächst die beiden Proben P22 und P27 untersucht. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Rekonstruktionsergebnisse für die KTA-Nut (2 mm) und die 10 mm-Nut, deren Vermaßung mittels Winkelspiegel- und Rissspitzensignal sehr gut gelingt.

Repräsentativ für die an den IKS RK-Proben erzielten Ergebnisse konzentrieren wir uns im Folgenden auf die Probe P35. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der SAFT-Rekonstruktion der mittels +45° und -45° Einschallwinkel aufgenommenen Ultraschall-daten dargestellt. Die SAFT-B-Bilder zeigen die rekonstruierten Anzeigen in Projektion über die Probenbreite. Die mittels Winkelspiegelecho und den verschiedenen, deutlich erkennbaren Rissspitzenanzeigen ermittelten Risstiefen liegen im Bereich von 13 mm bis 16

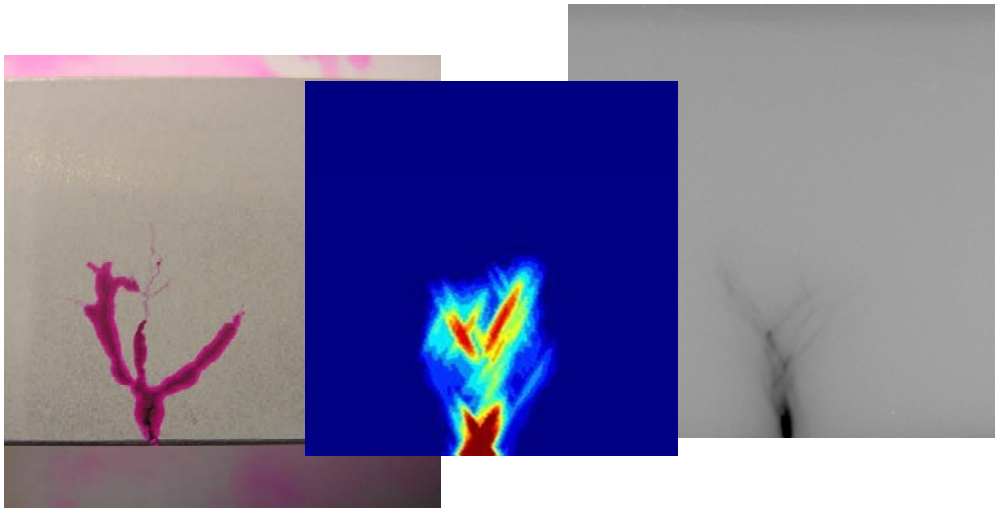
mm und stimmen hervorragend mit den mittels Rot-Weiß- und Röntgenprüfung ermittelten Werten aus Tabelle 1 überein. Überlagert man die Ergebnisse beider Rekonstruktionen (siehe [7]), so ergibt sich eine bemerkenswerte Übereinstimmung der rekonstruierten, verästelten Rissgeometrie im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren; dies ist in Abb. 7 dargestellt. Ähnlich gute Ergebnisse wurden für die Probe P36 erzielt, für die ebenfalls Abbildungen der tatsächlichen Rissgeometrie zur Verfügung standen.



**Abb. 5** SAFT-B-Bilder für Probe P22: Bewertung der 2mm K-Nut und der 10 mm B-Nut anhand der rekonstruierten Rissspitzen- und Winkelspiegelsignale.



**Abb. 6** 3D-SAFT-Rekonstruktionen für Probe P35 für +45°- (oben) und -45°-Winkleinschallung (unten). Die HF-Daten wurden mit einem 2 MHz-Filter vorarbeitet; bei Einsatz eines 4 MHz-Filters ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede.



**Abb. 7** Vergleich der Rissabbildung mittels Farbeindringprüfung (links), Ultraschall und SAFT (Mitte) sowie Röntgendurchstrahlungsprüfung (rechts) für Probe P35 (die Skalen stimmen nicht exakt überein).

Die an allen Proben ermittelten Riss- bzw. Nuttiefen sind in Tabelle 2 den mittels Farbeindring- und Röntgenprüfung bestimmten Werten gegenüber gestellt. Eine größere Abweichung zeigt sich lediglich bei der Probe P37, hier müssen die Werte aus allen Untersuchungen noch einmal im Detail bewertet werden. Die Risse mit Tiefen kleiner als 5 mm (Proben P38 und P39) konnten nicht vermaßt werden, da die rekonstruierten Rissspitzensignale nicht vom Winkelspiegelecho separiert werden konnten. Für IK-Risse mit solch komplexer Geometrie kann angesichts der erfolgreichen Größenbestimmung des IK-Risses in Probe P30 unter den Randbedingungen dieser Studie eine Risstiefe von 5 mm als unterste Auflösungsgrenze angesehen werden. Bei kleineren Risstiefen wird der Riss zwar über die rekonstruierte Winkelspiegelanzeige nachgewiesen, ein Sizing ist allerdings nicht möglich.

Probe	Risslänge	Risslänge SAFT
P22	2/10 mm	2/10 mm
P27	2/4 mm	2/4.5 mm
P29	5-8 mm	5.5-7.5 mm
P30	5-7 mm	5-6 mm
P35	13-19 mm	13-16 mm
P36	9-12 mm	10-13 mm
P37	10-17 mm	8-10 mm
P38	1.5-3.5 mm	- mm
P39	3-4 mm	- mm

**Tabelle 1** Materialspezifikation und Dimensionen der untersuchten Proben sowie Kenngrößen der

## 6. Zusammenfassung

Wir haben Ultraschalluntersuchungen mittels konventioneller Prüftechniken durchgeführt, um interkristalline Spannungskorrosionsrisse in austenitischen Stahlproben zu detektieren und um deren Länge zu bestimmen. Eine wesentliche Verbesserung ergab sich aus der Nachbearbeitung der Ultraschall-HF-Daten mit dem SAFT-Algorithmus. Wir haben gezeigt, dass die 3D-SAFT Bildgebung eine weitergehende Bewertung der Ultraschalldaten und die verlässliche Risslängenbestimmung erlaubt; maßgeblich dafür ist die Verbesserung der Signal-Rausch-Verhältnisse. In der hier adressierten Anwendung hat sich dies

insbesondere bei der Verstärkung der Rissspitzensignale der Spannungskorrosionsrisse bemerkbar gemacht. Die Ergebnisse zeigen eine exzellente Übereinstimmung der SAFT-rekonstruierten und der tatsächlichen Rissgrößen.

Es wurde auch gezeigt, dass Berechnungen auf der Basis geeigneter Modelle hilfreiche Informationen zur Interpretation der physikalischen Hintergründe liefern und zur Optimierung solch komplexer Prüfsituationen herangezogen werden sollten. Zukünftige Arbeiten, auch mit Blick auf das IKS RK-Problem bei austenitischen Schweißnähten, werden auch diesen Aspekt berücksichtigen.

## Referenzen

- [1] S.R. Doctor, Nuclear Power Plant NDE Challenges – Past, Present and Future, in: Review of Progress in QNDE, Vol. 26, AIP Conference Proceedings CP894, 17-31 (2007)
- [2] Schäden an Mischnähten der Reaktordruckbehälterstützen in den Kernkraftwerken Virgil C. Summer (USA) und Ringhals 4 (Schweden) entdeckt im Herbst 2000. GRS-Weiterleitungsnachricht WLN 2001/05, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln (2001)
- [3] S. Dugan, S. Wagner, S. Zickler, Herstellung von Testkörpern mit realistischen Fehlern für die Ultraschallprüfung, DGZfP-Berichtsband BB122–CD, Jahrestagung 2010, DGZfP, Berlin (2010), Di.2.B.3
- [4] J.A. Ogilvy, Theory of Wave Scattering From Random Rough Surfaces, Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York (1991)
- [5] S.R. Doctor, G.J. Schuster, L.D. Reid, T.E. Hall, Real-Time 3D SAFT UT System Evaluation and Validation, Report Pacific Northwest National Laboratory, USA, NUREG/CR-6344 PNNL-10571 (1996)
- [6] V. Schmitz, Nondestructive Acoustic Imaging Techniques, in Imaging of Complex Media with Acoustic and Seismic Waves, Topics Appl. Phys. 84, edited by M. Fink et al., Springer, Berlin (2002), 167-190
- [7] H. Rieder et al., SAFT- und TOFD-Auswertung für die Ultraschall-Schweißnahtprüfung von längsnahtgeschweißten Großrohren, DGZfP-Berichtsband BB122–CD, Jahrestagung 2010, DGZfP, Berlin (2010), Mi.2.A.1
- [8] M. Spies, H. Rieder, Synthetic Aperture Focusing of Ultrasonic Inspection Data to Enhance the Probability of Detection of Defects in Strongly Attenuating Materials, NDT&E International, Vol. 43, No. 5 (2010), 425-431
- [9] H.M. Nykyforchyn, W. Dietzel, Investigations of the Influence of the Mechanical Conditions at the Crack Tip on SCC Test Results, in: Proceedings of the 13th European Conference on Fracture, ECF 13, Sept. 6-9, 2000, San Sebastian, CD-ROM
- [10] M. Spies, W. Satzger, J. Bamberg, Evaluation of Ultrasonic Scattering at LCF Cracks Including Opticaly Measured, Real Roughness Profiles, in: Review of Progress in QNDE, Vol. 26, AIP Conference Proceedings CP894, 1823-1830 (2007)
- [11] 'gom Optical Measuring Techniques' Website: <http://www.gom.com> .
- [12] H. Rieder, A. Dillhöfer, M. Spies, MMC-USIS - Entwicklung eines kompakten LAN-basierten Prüfsystems für die automatisierte Ultraschallprüfung, SAFT-Bewertung und 3D-Visualisierung, DGZfP-Berichtsband BB122–CD, Jahrestagung 2010, DGZfP, Berlin (2010), P46