

Ultraschallprüfung dickwandiger austenitischer Schweißnähte: Modellierung der Prüfsituation und experimentelle Ergebnisse

Bernd Köhler⁺, Wolfgang Müller⁺, Martin Spies⁺, Volker Schmitz⁺, Alexander Zimmer⁺⁺,
Karl-Jörg Langenberg⁺⁺, Ulrich Mletzko⁺⁺⁺

⁺ Fraunhofer IZFP, Dresden und Saarbrücken

⁺⁺ Universität Kassel, Kassel

⁺⁺⁺ MPA Stuttgart

Abstract

Die Prüfung austenitischer Schweißnähte in dickwandigen Komponenten ist durch die elastisch anisotropen Eigenschaften der sich ausprägenden Stängelkristalle erschwert. Übliche Regeln für die Auswahl der Prüfbedingungen wie einzusetzende Wellenmoden, Frequenzen und Einschallwinkel können nicht mehr in gewohnter Weise angewendet werden. In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Werkzeuge zur Simulation der Schallfeldausbreitung in derartigen Prüfsituationen entwickelt. In dem Beitrag werden diese Werkzeuge auf eine Breitspaltschweißnaht mit einem interkristallinen Spannungskorrosions-Riss angewendet. Es wird demonstriert, dass durch Anwendung mehrerer Simulationswerkzeuge eine schrittweise Einschränkung des Parameterraumes möglich ist. Dadurch wird eine optimierte Prüfkongfiguration definiert, was durch entsprechende Messungen verifiziert wird.

1. Einleitung

Austenitische Schweißverbindungen gehören bezüglich der Ultraschallprüfung zu den "schwer prüfbareren Werkstoffen". Der Grund liegt in der anisotropen und inhomogenen Gefügestruktur. Diese Struktur führt in der Regel zu einer richtungsabhängigen Schallausbreitung hinsichtlich Schallgeschwindigkeit und Polarisierung und zu Modenkonversionseffekten an Grenzflächen und Fehlern. Die Prüfphysik ist somit für austenitische und Mischschweißverbindungen - wie sie vorwiegend in hoch sicherheitsrelevanten Anlagen wie (Kern-)kraftwerken und Chemieanlagen vorkommen - wesentlich komplexer als bei ferritischen Schweißnähten.

Während für ferritische Schweißnähte vergleichsweise überschaubare Regeln für die Ultraschallprüfung existieren, die seit vielen Jahren in der Prüfpraxis erfolgreich angewendet werden, lassen sich solche Regeln für austenitische Schweißnähte nicht aufstellen. Numerische Simulation kann die Situation verbessern, indem für eine konkrete Prüfsituation unter Variation der Prüfparameter die Anzeigen optimiert werden. Grundsätzlich stehen hierfür eine Reihe von Simulationstools zur Verfügung, deren Eignung zur Vorhersage der Schallausbreitung auch in elastisch anisotropen, inhomogenen Schweißnähten von austenitischen Breitspaltschweißnähten nachgewiesen ist^{1,2}. Allerdings ist bisher über die Schallausbreitung durch die ungestörte Schweißnaht hinaus die Simulation des Nachweises realistischer Fehler noch nicht erfolgt. Die bisher verwendeten Testkörper hatten entweder keine Fehler oder nur eine relativ grobe Repräsentation dieser in Form von Nuten. Die vorliegende Arbeit widmet sich nun der Frage, ob die genannten Werkzeuge geeignet sind, eine Optimierung der Prüfung von Breitspaltschweißnähten auch hinsichtlich der Detektierbarkeit weitgehend natürlicher Risse zu ermöglichen und dies experimentell zu verifizieren.

Für diese Aufgabe wurden Testkörper mit eingeschwungenen und Spannungskorrosions-Rissen hergestellt (Abschnitt 2). In Abschnitt 3 werden die Simulationsverfahren auf die vorliegende Schweißnahtgeometrie angewendet und eine optimale Prüfgeometrie für den Fehler-

erwartungsbereich ausgewählt. Ein entsprechender Prüfkopf wurde gefertigt. Impuls-Echo Messungen vom Fehler wurden sowohl mit diesem Prüfkopf als auch mit Standardprüfköpfen durchgeführt und mit verschiedenen Verfahren ausgewertet. Abschließend werden die Ergebnisse mit den Vorhersagen verglichen und Schlussfolgerungen gezogen.

2. Testkörper³

Austenitische Schweißnähte spielen eine große Rolle in den Hauptumwälzleitungen des Primärkreises von Kernkraftwerken. Die in KKW's verwendeten Werkstoffe X 8 CrNiTi 8 12 (bei den WWER-440 HU Leitungen) bzw. X 6 CrNi 18 11, X 10 CrNiTi 18 9 oder X 10 CrNiNb 18 9 (bei den Reaktoren westlicher Bauart) unterscheiden sich nicht wesentlich in der Dendriten-Ausbildung des Schweißgutes. Es werden auch keine wesentlichen Unterschiede in der elastischen Anisotropie erwartet. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde der Werkstoff X 6 CrNi 18 11 verwendet.

Als Schweißnahtform wurde eine U-Naht mit einer Steghöhe von 2,5 mm, einem Tulpenradius von 6 mm und einem Flankenwinkel von 9 Grad und als Schweißverfahren eine Elektro-Hand-Schweißung mit Stabelektrode gewählt. Im Wurzelbereich wurde mit Schutzgas (WIG) bei den Füll- und Decklagen mit umhüllter Elektrode geschweißt. Es wurde die Stabelektrode Böhler Fox CN 18/11 benutzt von der für die WIG-Wurzelschweißung die Umhüllung entfernt wurde. Die Nähte wurden nach dem Schweißen senkrecht in Proben-Dickenrichtung mittels Röntgen durchstrahlt. Dabei ergaben sich keine Auffälligkeiten, insbesondere keine Hinweise auf das Vorhandensein von Poren, Schlacken, Rissen, Bindefehlern oder Ähnlichem.

Zwei so geschweißte Platten wurden durch Sägeschnitte quer zur Naht in Proben für die Risseinbringung und nachfolgende Ultraschallexperimente* und durch weitere Sägeschnitte der Streifen an den Naht-Enden in Proben für die Metallografie (Querschliffe) zerlegt. Die Abbildung 1 zeigt eine so zerlegte Platte.



Abb. 1: Eine der geschweißten Platten zerlegt in zwei Ultraschallproben (in Bildmitte horizontal liegend) und zwei Metallografieproben (kurze Probenstücke mittig oben und unten)

Nach Einbringung entsprechender Starterkerben wurden zwei der Ultraschallproben mit einem Schwingriss versehen (jeweils ein Riss von der Decklage ausgehend und einer von der Wurzel) und eine Ultraschallprobe mit einem interkristallinen Spannungskorrosions-Riss (IKSRK= interkristalline Spannungsriss-Korrosion) von der Wurzel ausgehend. Eine Probe wurde als Referenzprobe ohne Riss belassen. Alle Proben wurden wurzelseitig um etwa 4 mm

* diese Proben werden nachfolgend kurz Ultraschallproben genannt

und decklagenseitig um etwa 5,5 mm abgearbeitet.

Aus den Seitenabschnitten der Schweißnahtproben wurden Metallografieproben ausgeschnitten und Makro-Schliffe angefertigt. Diese Proben zeigen deutlich ausgeprägte Dendriten in der Schweißnaht, die sich über mehrere Schweißlagen hinweg fortsetzen. Dies erfolgt so regelmäßig, dass eine analytische Beschreibung der Dendritenrichtungen gerechtfertigt erscheint. An allen Proben wurde mit Farbeindringprüfung und Röntgentransmission sowohl der Rissverlauf charakterisiert, als auch die Abwesenheit zusätzlicher Fehler- etwa Lunker - nachgewiesen.

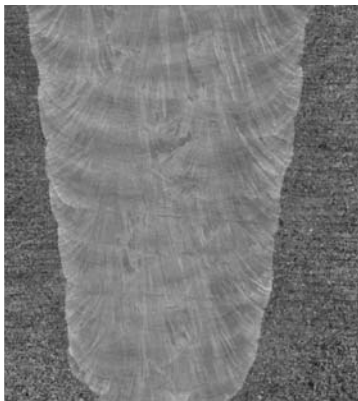


Abb.: 2 Metallografieprobe mit deutlich ausgeprägter Dendritenstruktur

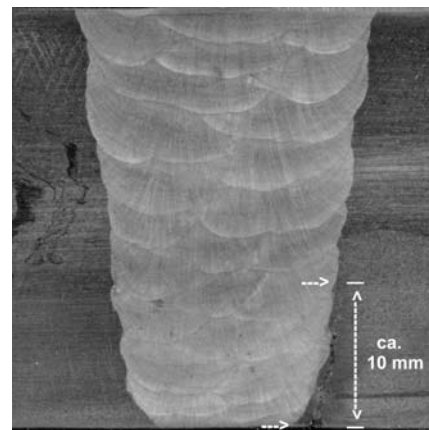


Abb. 3: Ausschnitt aus der Seitenansicht der Ultraschallprobe mit IK Spannungskorrosions-Riss

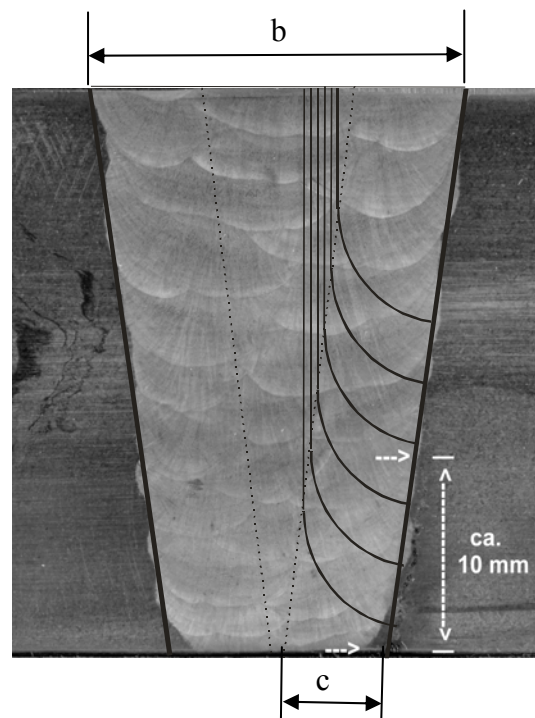


Abb. 4: Radiusmodell für die Orientierungsverteilung der Kristallite einem Schliffbild der IKSRRK Ultraschallprobe überlagert

Die weiteren Betrachtungen konzentrieren sich auf die Probe mit dem interkristallinen Spannungskorrosions-Riss, der von der Wurzellage ausgeht. Abb. 3 zeigt den Riss in der Seitenansicht. Er verläuft von der Wurzellage ausgehend auf beiden Probenseiten weitgehend

parallel zu der Schweißnahtflanke. Die Risstiefe beträgt etwa 10 mm. Auf einer Probenseite verzweigt ein kleiner Riss der bis in eine Tiefe von 3 mm gewachsen ist. Die Farbeindringprüfung auf der Unterseite (Wurzelbereich) zeigt, dass der Riss über die Probendicke etwas wellig und leicht verästelt ist.

Als Ausgangsgrößen für die Modellierung wurden die Schallgeschwindigkeiten im (elastisch isotropen) Basismaterial zu $c_L = 5.77 \text{ mm}/\mu\text{s}$ und $c_T = 3.16 \text{ mm}/\mu\text{s}$ und die Dichte zu $\rho = 7.88 \text{ g}/\text{cm}^3$ bestimmt. Als elastische Konstanten und Dichte des Schweißgutes wurden¹ $C_{11} = C_{22} = 263 \text{ GPa}$, $C_{33} = 217 \text{ GPa}$, $C_{13} = 145 \text{ GPa}$, $C_{44} = 128 \text{ GPa}$, $C_{66} = 82.4 \text{ GPa}$ und $\rho = 7.88 \text{ g}/\text{cm}^3$ verwendet.

Die regelmäßige Ausbildung der Dendriten erlaubt die Anwendung des Radiusmodells zur Beschreibung ihrer Orientierungsverteilung². Seine Parameter sind: die Neigung der Schweißnahtflanke, die Breite der Schweißnaht an der Basis (a) und der Decklage (b) und die Breite der „Eindrehzone“ (c). Aus den verfügbaren Schlibfbildern wurden diese Parameter zu jeweils 8.3° , $a = (13.45 \pm 0.25) \text{ mm}$, $b = (22.75 \pm 0.25) \text{ mm}$ und $c = (6.75 \pm 0.15) \text{ mm}$ bestimmt.

3. Simulation der Schallausbreitung und der Wechselwirkung mit dem Fehler

Es existiert eine Reihe von Simulationswerkzeugen, die einerseits einen unterschiedlichen Komplexitätsgrad aufweisen und damit qualitativ unterschiedlich aussagekräftige Ergebnisse liefern sich aber andererseits auch in dem erforderlichen numerischen Aufwand wesentlich unterscheiden. Hier werden Strahlverfolgung⁴ (Ray Tracing), die Methode der Gaußschen Strahlen⁵ und die Elastodynamische Finite Integrationstechnik⁶ (EFIT) in einem schrittweisen Verfahren eingesetzt. Für die gegebene Aufgabenstellung - d.h. Geometrie der Schweißnaht und Fehlererwartungsbereich - wird der in Frage kommende Parameterraum (Einschallwinkel, Einschallpositionen, Wellenmoden, Wandleraperturen) - mit Ray Tracing grob eingeschränkt, diese Wahl mit der Methode der Gaußschen Strahlen verfeinert und letztendlich durch wenige EFIT-Rechnungen verifiziert. Dieses Vorgehen vereint die Vorteile aller beteiligten Verfahren: Ray Tracing ist schnell, so dass eine große Anzahl von Parametersätzen interaktiv getestet werden kann, die Methode der Gaußschen Strahlen bezieht die Amplitudeinformation ein und erlaubt dabei immer noch dreidimensionale Rechnungen und EFIT ist vollnumerisch und erfasst automatisch alle Modenkonzersionen ist dabei aber rechenzeitintensiv. Das Vorgehen wird der Einfachheit halber auf die mit piezoelektrischen Prüfköpfen anregbaren Wellentypen eingeschränkt. Grundsätzlich ist das Vorgehen auch auf horizontal polarisierte Transversalwellen anwendbar.

Ray Tracing

Ray Tracing beschreibt die Schallausbreitung näherungsweise durch ein Strahlenbündel. Die Einzelstrahlen werden bezüglich ihrer Energieausbreitungsrichtung verfolgt. An Grenzflächen legt der Nutzer des Programms fest, welcher Wellenmode weiter verfolgt wird. Bei einer Vielzahl von Grenzflächen - wie im vorliegenden Problem - ergeben sich leicht eine große Zahl von Varianten, die aber interaktiv zügig betrachtet werden können. Die Änderung der Schallintensität infolge Bündelverformung und Divergenz kann grob über die Dichte der Strahlen abgeschätzt werden.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Schallstrahlen für den Fall, dass in allen Schichten der eingestrahlte Wellenmode beibehalten wird. Es wird deutlich, dass die vertikal polarisierten Transversalwellen an den Grenzflächen stark gebrochen und die Strahlen in dem Bereich mit veränderlicher Kristallorientierung (Eindrehzonen) stark deformiert werden. Nur wenige Strahlen erreichen den Riss, und diese laufen dann nicht zum Prüfkopf zurück. Die Variante mit durchgehend vertikal orientierten Transversalwellen scheidet mithin aus.

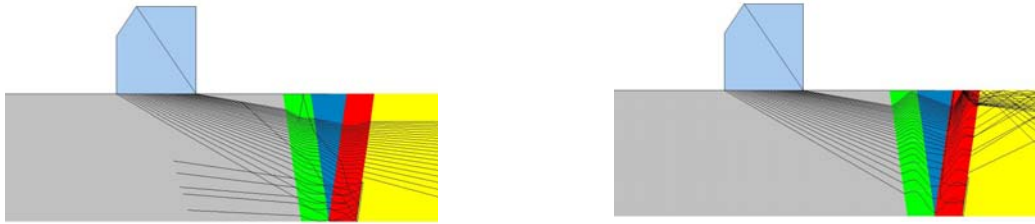


Abb. 5: Schallstrahlen für die Einschallung von Longitudinalwellen (links) und vertikal polarisierten Transversalwellen (rechts) unter 70° . Der entsprechende Wellenmode wird in allen Schichten beibehalten.

Schichten: grau – isotropes Basismaterial, grün – linke „Eindrehzone“, blau – Kernbereich der Schweißnaht mit parallel in Dickenrichtung orientierten Kristalliten, rot – rechte Eindrehzone, gelb – Basismaterial. 10 mm tiefer Riss zwischen rot und gelb

In Abbildung 6 wird die Ausbreitung einer Longitudinalwelle und der an einer der Grenzschichten entstehenden modenkonvertierten vertikal polarisierten Transversalwelle betrachtet. Es wird ersichtlich, dass ein vernünftiger Strahlverlauf, bei dem der Riss angeschallt wird und die Chance besteht, dass Energie in Prüfkopfrichtung zurückläuft, nur mit (quasi-)Longitudinalwellen in allen Schichten gegeben ist. Aus diesen und weiteren Ray-Tracing Rechnungen lässt sich ableiten: Die Prüfung sollte auf Longitudinalwellen im Basismaterial und (quasi-)Longitudinalwellen in allen Schichten der Schweißnaht optimiert werden. Der günstigste Einschallwinkel liegt vermutlich oberhalb von 70° , was aber durch Einbeziehung der Amplitudeninformation weiter zu bestätigen ist.

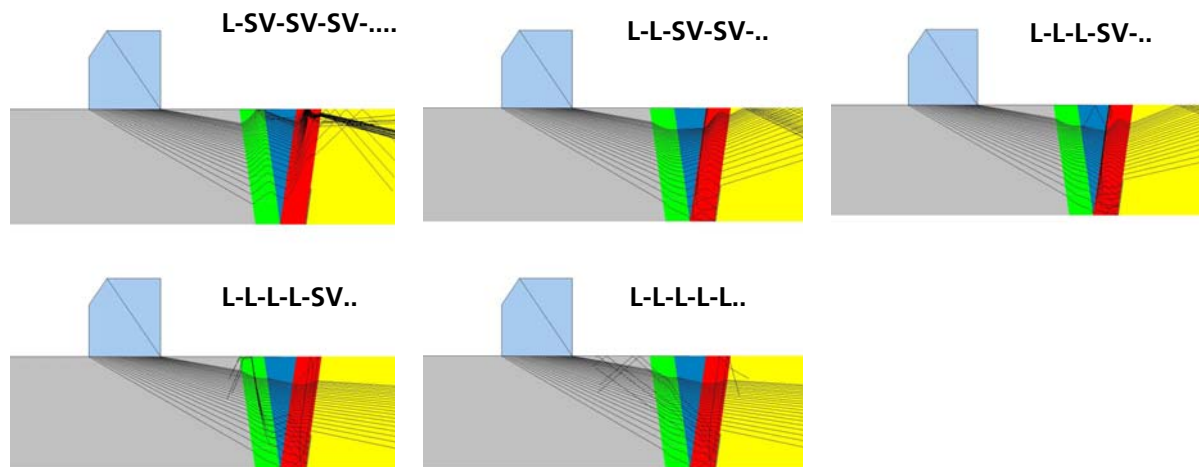
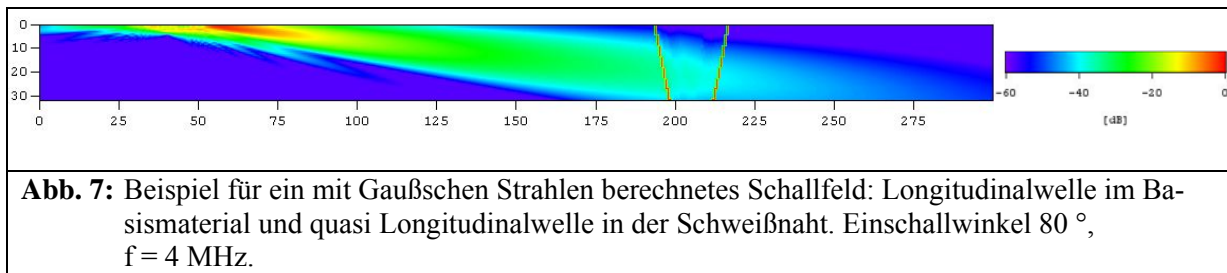


Abb. 6: Strahlverläufe für Modenwandlung an unterschiedlichen Grenzflächen von Longitudinalwellen zu (quasi-)vertikal polarisierten Transversalwellen

Gaußsche Strahlen

Durch die Berechnung der Schallausbreitung mit Gaußschen Strahlen werden zusätzlich Aussagen über die Schallfeldamplituden möglich. Entsprechende Rechnungen zeigen, dass die Longitudinalwelle die Schichten der Schweißnaht durchquert, ohne eine dramatischen Abfall in der Amplitude zu erfahren (Abb. 7). Auch werden die Vorhersagen von Ray Tracing bezüglich geringer Bündeldeformation bestätigt. Impuls-Echo Rechnungen unter Variation der Prüffrequenz sagen einen deutlichen Anstieg der Riss-Echoamplitude vorher, wenn von

2 MHz zu 4 MHz übergegangen wird. Da aber gleichzeitig mit einer erhöhten Streuung an den Kristalliten zu rechnen ist - was die Modelle bisher nicht berücksichtigen - wird die niedrigere Frequenz von 2 MHz für die Experimente vorgezogen.



Elastodynamische Finite Integrationstechnik

Die Elastodynamische Finite Integrationstechnik ist ein numerisches Verfahren mit dem das vollständige Wellenfeld erfasst wird, ohne dass Voraussetzungen über die zu betrachtende Wellenmoden etc. gemacht werden müssen.

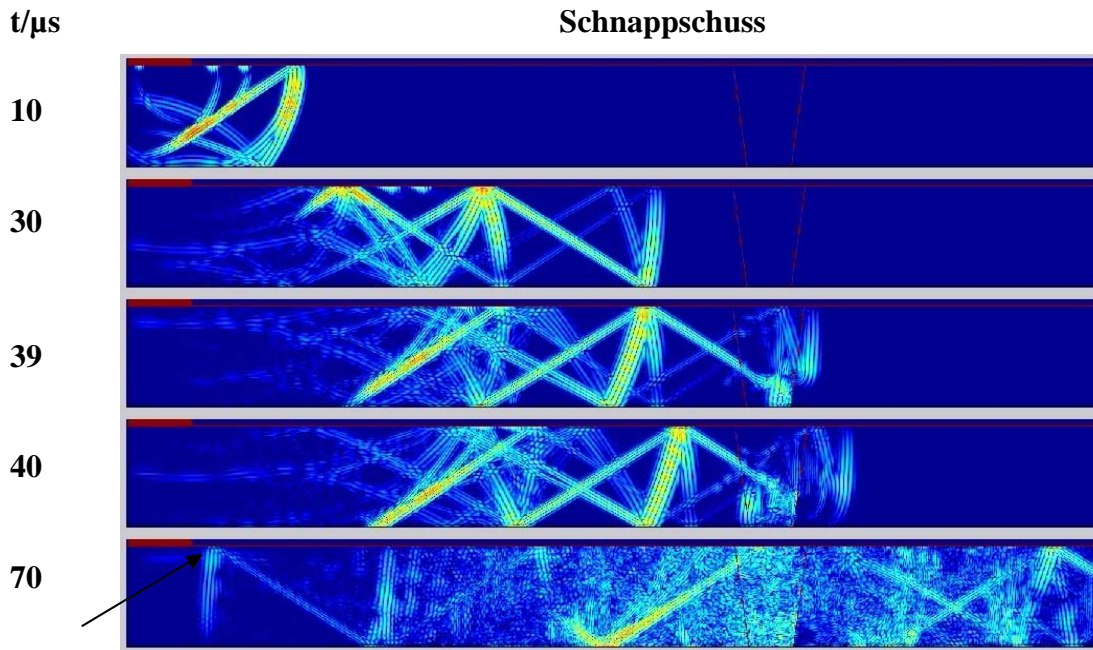


Abb. 8: Schnappschüsse der Wellenausbreitung eines 80° Longitudinalwellenprüfkopfes; deutlich ist die Reflexion an dem Riss zu erkennen; der reflektierte Anteil läuft gerade wieder in die Richtung des Prüfkopfes.

Die Einschallung mit Longitudinalwellen wurde für die vor-ausgewählten Einschallwinkel zwischen 70° und 80° simuliert. Dabei wurde bestätigt, dass Einschallwinkel über 70° die Erkennbarkeit des Risses verbessern. Abb. 8 zeigt beispielhaft Schnappschüsse der Wellenausbreitung für die Einschallung mit 80° Longitudinalwellen für ausgewählte Zeitpunkte. Deutlich sind in den Bildern die verschiedenen Wellenmoden zu identifizieren und die Reflexion am Riss ist zu erkennen. Der am Riss reflektierte Ultraschall läuft in Richtung Prüfkopf zurück, so dass er von diesem empfangen werden kann (siehe Pfeil). Dementsprechend zeigen die simulierten Empfangssignale (A-Bilder, nicht gezeigt) auch deutliche Echoanzeigen vom Riss die in Simulationsrechnungen ohne Riss nicht vorhanden sind. Die Amplitude der Riss-

anzeige steigt mit zunehmendem Einschallwinkel der Longitudinalwelle zunächst an und erreicht dann eine Sättigung. Einschallwinkel von 75° und 80° liefern etwa gleiche Echoamplituden.

4. Messungen zur Verifikation der Vorhersagen der Simulation

Für die Messungen wurden Breitbandprüfköpfe mit auswechselbaren Vorlaufkeilen (der Prüfkopf ist in die Keile einschraubbar) verwendet. Keile waren für Einschallwinkel bis 70° kommerziell verfügbar. Die Simulationsrechnungen sagen aber eine Verbesserung der Risserkennbarkeit für Einschallwinkel $> 70^\circ$ vorher. Deshalb wurde ein Keil durch Abfräsen der Prüfkopfsohle auf einen Einschallwinkel von 80° umgearbeitet. Bei derartig großen Einschallwinkeln kann der erforderliche Keilwinkel nicht mehr einfach über das Snelliussche Gesetz bestimmt werden⁷. Entsprechend erfolgte die Bestimmung des Keilwinkels über systematische Simulation mit einem Prüfkopfoptimierungsprogramm. Der hergestellte Prüfkopf wurde in üblicher Weise am K1 Testkörper charakterisiert⁸.

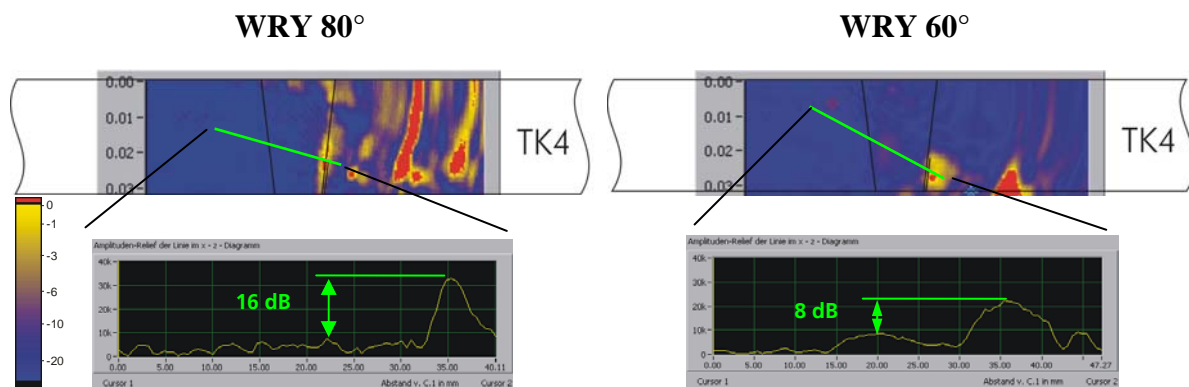


Abb. 9: SAFT-Abbildungen für Einschallung mit Longitudinalwellen, die Abbildungen sind der Zeichnung des Testkörpers überlagert. Unten: Amplitudendynamik entlang der grünen Linie in den SAFT Bildern

Die Messungen erfolgten automatisiert mit EASYSCAN. Der Riss wurde durch die Schweißnaht angeschallt, wobei der Prüfkopf über eine lineare Apertur senkrecht zur Schweißnaht verfahren wurde. Es wurden mehrere solche parallele Spuren mit einem Versatz in Schweißnahtichtung aufgenommen. Weder in den A-Bild Anzeigen noch in HF-B-Bildern konnten Echosignale von dem Riss identifiziert werden. Letzteres ist erstaunlich weil in vorangegangenen Untersuchungen mit Nuten die HF-B-Bilder entsprechende, gut identifizierbare Anzeigen lieferten. Offensichtlich ist aber die Echoamplitude eines natürlichen Risses so gering, dass sie vollständig von dem Gefügerauschen aus der Schweißnaht überdeckt wird. Erst die im SAFT Algorithmus implizit gegebene Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses war erfolgreich. Der Riss konnte durch die Schweißnaht hindurch sehr deutlich abgebildet werden (Abb. 8). Weitere in dem Bild auftauchende Anzeigen rühren von Ausbreitungswegen unter Beteiligung von langsameren (quasi-transversalen) Wellenmoden her. Dementsprechend tauchen diese Anzeigen von der Prüfkopfseite gesehen hinter der Schweißnaht und dem Riss auf. Sie stellen mithin bei der Auswertung von Messungen kein Problem dar wenn die Lage der Schweißnaht und der Fehlererwartungsbereich bekannt sind.

Der Signal/Rausch-Abstand wurde entlang einer Linie durch die maximale Rissanzeige bestimmt, die so gelegt wurde, dass die größten Anzeigen vor der Rissanzeige erfasst wurden. Der auf diese Weise bestimmte Signal Rausch Abstand beträgt 8 dB, 14 dB und 16 dB für die Einschallung mit Longitudinalwellen unter 60° , 70° und 80° . Damit konnte die Vorhersage der Simulation „Winkel $> 70^\circ$ sind zu verwenden“ bestätigt werden, wenn auch der Gewinn

gegenüber einem Einschallwinkel von 70° gering ausfällt.

Schlussfolgerungen

Die Anwendung von Simulationsverfahren auf konkrete Prüfsituationen bei Austenitischen Schweißverbindungen stellt eine große Herausforderung dar. Die Ausbildung des Schweißgefüges bei Breitspaltschweißnähten ist relativ stabil, so dass ein analytisches Modell für die Kristallorientierungsverteilung in den Modellen benutzt werden kann (Radiusmodell). Durch Kombination der Vorzüge verschiedener Simulationsverfahren kann eine Prüfkongfiguration erarbeitet werden, die sich auch im Experiment als optimal herausstellt.

Das Gefügerauschen ist signifikant und verdeckt die Anzeigen von natürlichen Rissen sowohl in einzelnen A-Bildern, als auch in HF-B-Bild Darstellungen. Die nachfolgende Auswertung mittels SAFT verbessert die Situation wesentlich und bringt den Riss zur Anzeige. Dies gilt für die untersuchte Breitspaltschweißnaht offensichtlich auch bei der Anwendung des konventionellen SAFT, bei dem die Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in der Schweißnaht nicht berücksichtigt wird.

Einen offenen Punkt stellt derzeit noch die Erfassung des Gefügerauschens in den Simulationsrechnungen dar. Aussagen der Simulation zu optimalen Prüffrequenzen sind in der Regel fehlerhaft, weil die mit steigender Frequenz ansteigende Streuung unberücksichtigt bleibt. Hier gibt es weiteren Forschungsbedarf.

Danksagung: Die dargestellten Ergebnisse wurden in einem mit den Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit unter dem Kennzeichen 150 1231 geförderten Projekt gewonnen, wofür an dieser Stelle herzlich gedankt wird.

Literatur:

1. F. Walte, C. Schurig, "Untersuchungen zum Leistungsstand moderner Ultraschallverfahren zum Fehlernachweis und zur Größenbestimmung für bestehende und hinsichtlich Prüfbarkeit optimierte austenitischen Schweißnähte im Primärkreis von KKW's", Abschlussbericht zum BMBF Forschungsvorhaben RS 1500931, Saarbrücken 18. 12. 1995.
2. B. Köhler, Ch. Schurig, F. Walte, M. Spies, R. Hannemann, R. Becker, V. Schmitz, "Modellbasierte Bewertung realer Ultraschall-Prüfsignale zur Optimierung von Prüfparametern für die Ultraschallprüfung fehlerbehafteter Schweißnähte in austenitischen Bauteilen des Primärkreislaufes von KKW's", Abschlussbericht zum BMWA Forschungsvorhaben 1501024, Dresden Juni 2001.
3. U. Mletzko, Herstellung von Schweißnaht- und Metallografie-Proben einschließlich Risseinbringung und Metallografie, Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA), Technischer Fachbericht, Universität Stuttgart, Juli 2002.
4. V. Schmitz, F. Walte, S.V. Chakhlov: "3D-Ray Tracing in Austenite Materials"; NDT&E International, Vol. 32, N. 4; 1999, 201-213.
V. Schmitz, S. Chakhlov, M. Kröning: "Modelling of Sound Fields", in: Chimenti, D. E.; Thompson, D. O.; Review of Progress in QNDE 19A; Proceedings of the Twenty-sixth annual Symposium on QNDE; ISBN 1-56396-930-0, 969-975; Montréal 1999.
5. M. Spies, „Modeling of Transducer Fields in Inhomogeneous Anisotropic Materials Using Gaussian Beam Superposition“ NDT&E International, 33, 155-162 (2000)
6. R. Marklein, "Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik", Shaker Verlag, 1997.
7. E. Kühnle, "The limitations of Snell's law for the refraction of finite beams", Wave Motion 35 (2002) 1-15.
8. B. Köhler, V. Schmitz, M. Spies, A. Zimmer, „Modellbasierte Verifikation der in den Projekten Austenit I und Austenit II entwickelten Methoden zur Verbesserung der realen Ultraschallprüfung austenitischer Schweißnähte durch ihre Anwendung auf eine reale Schweißnaht mit einem Fehler“, Projektbericht, Dresden, September 2004.