

# Herstellung von Testkörpern mit realistischen Fehlern für die Ultraschallprüfung

Sandra DUGAN\*, Sabine WAGNER\*, Stefan ZICKLER\*

\* Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart  
(Kontakt: sandra.dugan@mpa.uni-stuttgart.de)

**Kurzfassung.** Die MPA Stuttgart beschäftigt sich bereits seit längerer Zeit mit der Erstellung von geeigneten Testkörpern für zerstörungsfreie Prüfungen. Insbesondere ist es gelungen, in austenitische Schweißnähte und in Mischnähte interkristalline Spannungs-Korrosionsrisse einzubringen. Auch bei der gezielten Erzeugung von herstellungsbedingten Schweißnahtfehlern wie Erstarrungsrisse wurden an der MPA gute Ergebnisse erzielt. Es werden einige Testkörper mit realistischen Fehlern sowie daran erzielte Ergebnisse von Ultraschallprüfungen vorgestellt.

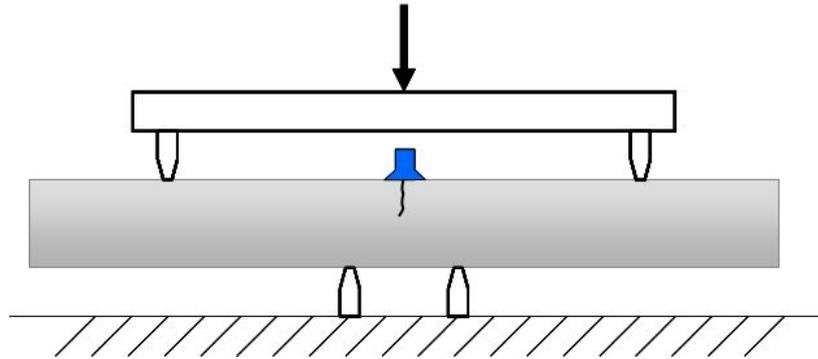
## 1. Einführung

Für den Leistungsnachweis von ZfP-Verfahren und Prüftechniken ist eine Verwendung von Testkörpern mit realistischen Testfehlern von großer Bedeutung. Sollen bei der Herstellung oder im Betrieb entstandene Risse mittels Ultraschallprüfung aufgefunden und bewertet werden, ist die Erprobung der zum Einsatz kommenden Prüftechnik an Testfehlern mit Risscharakter sinnvoll. Verschiedene Risstypen und künstliche Testfehler wie Nuten können sich im Ultraschallreflexionsverhalten deutlich unterscheiden (siehe z.B. [1-3]). Besonders gilt dies für interkristalline Spannungskorrosionsrisse (oft mit dem englischen Begriff „intergranular stress corrosion cracks“, IGSCC, bezeichnet), die stark verzweigen und keine glatten Rissflächen aufweisen. An der MPA Stuttgart wurden in den letzten Jahren einige Untersuchungen zur Ultraschallprüfung an Testkörpern mit Rissen durchgeführt. Dazu wurden Testkörper mit interkristallinen Spannungskorrosionsrisse hergestellt. Die hier dargestellten Beispiele umfassen eine Untersuchung zum Vergleich verschiedener Reflektoren in austenitischen Grundwerkstoffproben [4] sowie eine Prüfung auf Querfehler in einer Mischschweißverbindung [5].

## 2. Spannungskorrosionsrisse

Die Entstehung von Spannungskorrosionsrisse hängt im Wesentlichen von drei Voraussetzungen ab: Vorliegen eines korrosionssensiblen Werkstoffs, eines korrosiven Mediums sowie Spannungen im Material, wobei hier Eigenspannungen durchaus ausreichend sein können. Für die Herstellung der Spannungskorrosionsrisse im Labor wählt man üblicherweise deutlich höhere Spannungen, um ein Risswachstum innerhalb relativ kurzer Zeit sicherzustellen. Austenitische Stähle sind anfällig für Spannungsrisskorrosion, wenn sie einen relativ hohen Anteil an Kohlenstoff und wenig stabilisierende Elemente wie Niob oder Titan aufweisen. Entsprechend dieser Kriterien wurden für die an der MPA hergestellten Testkörper der Grundwerkstoff und der Schweißzusatzwerkstoff ausgewählt. Um den Rissstart definiert festzulegen wird zunächst in den Testkörper eine Starterkerbe in

Form einer erodierten Nut oder eines Sägeschnittes eingebracht. Über diese Starterkerbe wird dann ein Bad mit einer geeigneten Chemikalie platziert und eine Belastung, typischerweise als 3-Punkt- oder 4-Punkt-Biegebelastung aufgebracht. Abbildung 1 zeigt schematisch die Versuchsanordnung zur Einbringung der Spannungskorrosionsrisse am Beispiel eines Austenit-Testkörpers unter 4-Punkt-Biegebelastung.

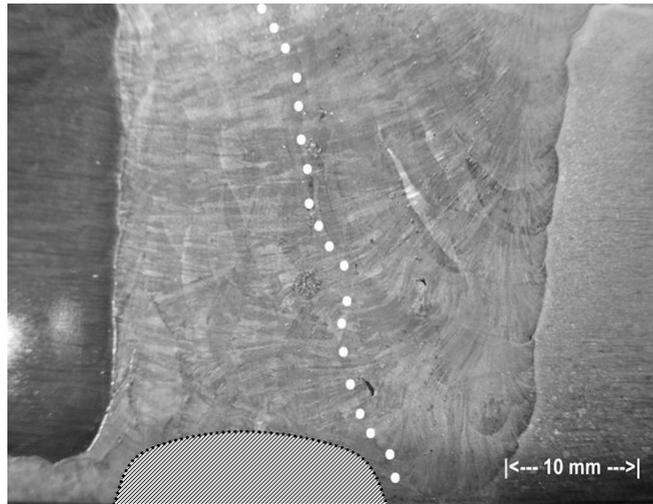


**Abbildung 1:** Anordnung zur Einbringung von Spannungskorrosionsrisse

Zur Erkennung des Rissstarts und zur Überwachung des Risswachstums werden jeweils Schallemissionssensoren appliziert sowie Ultraschallprüfköpfe für eine Durchschallung so angeordnet, dass bei Risswachstum ein Teil des Schalls an der Rissfläche reflektiert wird und so der Nachweis eines Risswachstums möglich wird. Nach erfolgtem Anriss und ausreichendem Risswachstum wird die Starterkerbe abgearbeitet, so dass lediglich der Riss als Testreflektor zurückbleibt.

Als Beispiele für Testkörper mit interkristallinen Spannungskorrosionsrisse sollen hier Kleinproben aus austenitischem Grundwerkstoff und ein Testkörper mit einer Rohrrundnaht zwischen austenitischem und ferritischem Stahl (Mischnaht) vorgestellt werden. Bei den Grundwerkstoffproben handelt es sich um Flachproben mit einer Dicke von 32 mm, einer Breite von 40 mm und einer Länge von ca. 400 mm. Der Riss verläuft jeweils über die gesamte Probenbreite mit Risstiefen von 3,5 mm bis 16 mm. Der Mischnaht-Testkörper ist als Rohrtestkörper ausgeführt (Wanddicke 29,5 mm, Außendurchmesser 327 mm) mit einer austenitischen Rohrrundnaht und austenitischer Pufferung, die Ferrit-Seite ist austenitisch plattiert. In diesen Testkörper wurde ein Spannungskorrosionsriss mit Rissfläche quer zur Schweißfortschrittsrichtung (Querriss) so eingebracht, dass sich der gesamte Riss im Bereich der Pufferung befindet, Abbildung 2. Zur Risseinbringung wurde der Testkörper längs geteilt und beide Halbschalen getrennt belastet. Anschließend wurden die Halbschalen wieder zusammengeheftet, der verbleibende Spalt mit einer Füllmasse ausgegossen. Die Risstiefe des entstandenen Spannungskorrosionsrisses wurde mittels Potentialsondenverfahren auf etwa 6-7 mm abgeschätzt, die Risslänge beträgt ca. 20 mm.

Die Dokumentation der Spannungskorrosionsrisse mittels Farbeindringprüfung und Durchstrahlungsprüfung sowie Bauteilmetallografie mit Abdrucktechnik (Replika) zeigt, dass dieser Risstyp eine starke Verzweigung aufweist und im Allgemeinen schräg ins Material läuft, wie es typisch für IGSCC ist. Dies ist am Beispiel der austenitischen Grundwerkstoff-Testkörper in Abbildung 3 dargestellt. Aufgrund dieser unregelmäßigen Struktur der interkristallinen Spannungskorrosionsrisse war zu erwarten, dass sich dieser Risstyp im Vergleich zu künstlichen flächigen Oberflächenfehlern (Nuten) im Reflexionsverhalten bei der Ultraschallprüfung unterscheiden würde. Dazu wurde die in Abschnitt 3 beschriebene vergleichende Untersuchung durchgeführt.



**Abbildung 2:** Aufbau der Mischnaht des Testkörpers mit skizzierter Lage des Risses



**Abbildung 3:** Spannungskorrosionsriss in Austenit-Testkörper – Farbeindringprüfung (links) und Durchstrahlungsprüfung (rechts)

### 3. Ultraschallprüfung

#### 3.1 Vergleich des Reflexionsverhaltens von Nuten, Schwingrissen und interkristallinen Spannungskorrosionsrissen

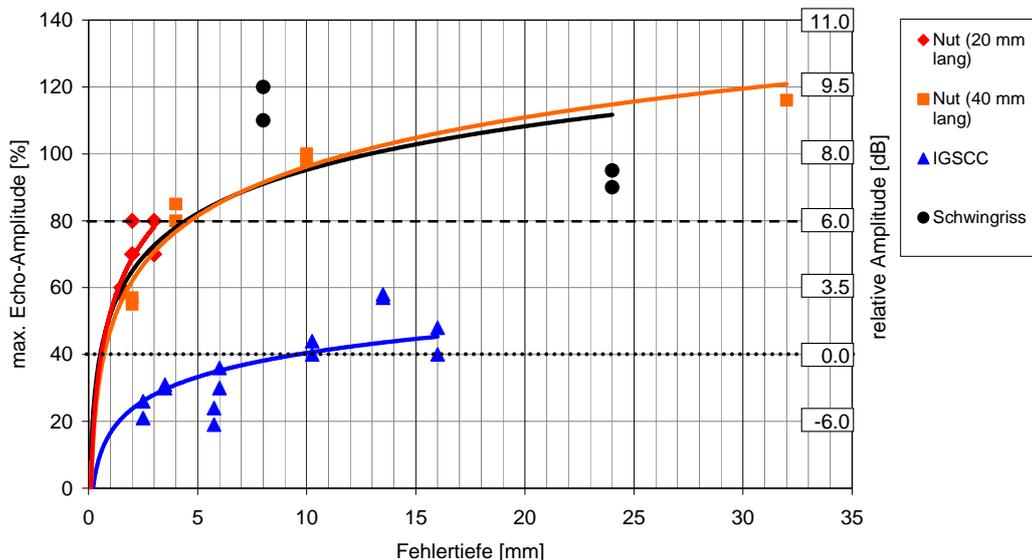
Es ist bekannt, dass in austenitischem Schweißgut oder auch in nickellegiertem Schweißgut die Ausbreitung von Ultraschall durch die Gefügestruktur der Schweißnaht gestört ist. Die im Allgemeinen ausgebildeten Stängelkristalle – große, ausgerichtete, akustisch anisotrope Körner – in der Schweißnaht sorgen für eine erhöhte Streuung des Ultraschalls, Reflexionen am Interface zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff sowie Ablenkung des Schalls beim Durchgang durch die Schweißnaht. Für die vergleichende Untersuchung zur Ultraschallprüfung an Spannungskorrosionsrissen, Schwingrissen und Nuten wurden daher Grundwerkstoff-Testkörper gewählt, um den zusätzlichen Einfluss einer austenitischen

Schweißnaht auf die Ultraschallausbreitung zu eliminieren und so einen systematischen Vergleich zwischen den Reflektoren zu ermöglichen.

Bei den Testkörpern für die vergleichende Untersuchung handelte es sich um die in Abschnitt 2 beschriebenen Flachproben von 32 mm Dicke, 40 mm Breite und ca. 400 mm Länge. Verwendet wurden Testkörper mit interkristallinen Spannungskorrosionsrissen, Schwingrissen sowie funkenenerdierten Nuten, die jeweils über die gesamte Probenbreite verlaufen (40 mm Länge). Zusätzlich wurde ein Testkörper mit drei kurzen Nuten von 20 mm Länge verwendet.

Es wurde der Fall einer Ultraschallprüfung von der Außenoberfläche einer Komponente auf flächige Trennungen an der Innenoberfläche betrachtet. Die für diese Prüfaufgabe typische Prüftechnik ist eine 45°-Winkelschallung mit Transversalwellen zum Nachweis von Fehlern an der Gegenfläche über den Winkelspiegeleffekt. Die Prüfung wurde aus zwei Einschallrichtungen durchgeführt, jeweils als mechanisierte Prüfung mit einem Mäander-Scan über den Fehlerbereich mit Schrittweite und Schussabstand von je 1 mm. Es wurde eine Prüffrequenz von 2 MHz gewählt. Die Ankopplung erfolgte mit manuell aufgebrachttem Koppelmittel.

Zunächst wurde für alle Reflektoren die maximale Echoamplitude für jede Einschallrichtung ermittelt und in Abhängigkeit von der Reflektortiefe in einer Grafik aufgetragen, Abbildung 4. Man erkennt sofort, dass die Echoamplituden für die interkristallinen Spannungskorrosionsrisse deutlich unterhalb der Echoamplituden der anderen Reflektoren liegen. Die Amplituden für die Schwingrisse liegen dagegen ähnlich wie die der Nuten. Dies ist nicht unbedingt überraschend, denn die Schwingrisse verlaufen transkristallin mit relativ glatten Rissflächen und sind somit vergleichbar mit Nuten. Nur wenn Spannungen im Material vorliegen und die Rissflächen stark aufeinander gepresst werden ist zu erwarten, dass das Reflexionsverhalten von Schwingrissen sich deutlich ändert.



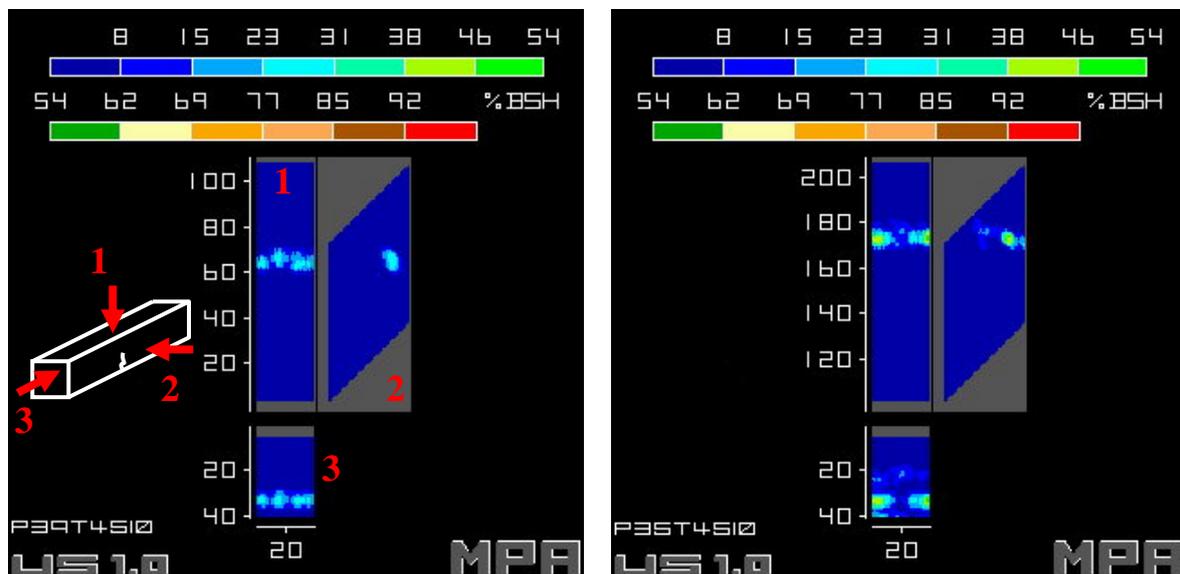
**Abbildung 4:** maximale Echoamplitude für verschiedene Reflektoren

Die deutlich verminderte Echoamplitude der interkristallinen Spannungskorrosionsrisse kann in der Praxis Einfluss auf die Bewertung der Ultraschallprüfung haben. Würde man beispielsweise bei der hier betrachteten Prüfung die Registrierschwelle auf die Echohöhe der 2 mm tiefen Nut zuzüglich eines Empfindlichkeitszuschlages von 6 dB festlegen (ge-

punktete Linie in Abbildung 4), wären die interkristallinen Spannungskorrosionsrisse erst ab einer Tiefe von 10 mm registrierpflichtig. Eine reine Amplitudenbewertung ist also im Fall der interkristallinen Spannungskorrosionsrisse unzureichend. Der Nachweis der interkristallinen Spannungskorrosionsrisse ist dagegen bei diesen Testkörpern problemlos möglich. Alle Fehler sind mit gutem Signal-Rausch-Abstand nachweisbar. Dies zeigt sich deutlich in der Bilddarstellung der aufgenommenen Ultraschallsignale. Abbildung 5 zeigt die Projektionsdarstellungen für die interkristallinen Spannungskorrosionsrisse von 3,5 mm bzw. 16 mm Tiefe. Die Amplitude ist jeweils farbcodiert dargestellt in der Projektion auf die Prüffläche (top view, 1), rechts daneben die Projektion auf die Seitenfläche (side view, 2), unten die Projektion auf die Stirnfläche (end view, 3).

In der Bilddarstellung kann man neben dem Winkelspiegelsignal vom Fehlerfußpunkt auch Signale aus dem Bereich der Rissspitzen erkennen, so dass bei detaillierter Analyse unter Umständen Rückschlüsse zur Fehlertiefe möglich sind. Bei diesen zusätzlichen Signalen handelt es sich weniger um echte Rissspitzen signale, also Beugung an der Rissspitze, sondern eher um Reflexionen aus den unterschiedlich orientierten Zweigen der stark verästelten Rissspitzen.

Bei Vorhandensein einer austenitischen Schweißnaht ist zu erwarten, dass der Nachweis der Fehler bzw. die sichere Unterscheidung zwischen Fehler und Gefüge- bzw. Interface-Anzeigen nicht so leicht möglich ist. Dasselbe gilt für eine Tiefenbestimmung. In jedem Fall ist bei der Prüfung auf interkristalline Spannungskorrosionsrisse eine mechanisierte Prüfung zu empfehlen mit detaillierter Analyse der Signalmuster.



**Abbildung 5:** Bilddarstellung der Ultraschallsignale für den 3,5 mm tiefen (links) und den 16 mm tiefen (rechts) Spannungskorrosionsriss

### 3.2 Querfehlerprüfung an einer Mischnaht mit interkristallinem Spannungskorrosionsriss

Nachdem etwa ab dem Jahr 2000 einige Fälle von im Betrieb entstandenen Schäden an Mischschweißverbindungen in verschiedenen ausländischen kerntechnischen Anlagen bekannt geworden waren, wurde auch in Deutschland der Prüfung von Mischnähten erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet. Bei den international aufgetretenen Fällen handelte es

sich zunächst um quer zur Schweißfortschrittsrichtung verlaufende, im Schweißgut gelegene Risse (Querrisse), später wurden auch Längsrisse gefunden. Man geht davon aus, dass diese Risse durch interkristalline Spannungsrisskorrosion entstanden bzw. gewachsen waren. Für eine Bewertung der Aussagesicherheit von zerstörungsfreien Prüfungen an Mischnähten auf Querrisse wurde an der MPA Stuttgart der in Abschnitt 2 beschriebene Mischnaht-Testkörper mit Querfehlern hergestellt. Neben dem interkristallinen Spannungskorrosionsriss in der Pufferung quer zur Schweißfortschrittsrichtung (Länge ca. 20 mm, Tiefe ca. 6 mm) wurden einige Nuten mit verschiedenen Tiefen eingebracht, in die Pufferung sowie in den austenitischen Grundwerkstoff.

Die Ultraschallprüfung wurde auch hier mechanisiert als Mäander-Scan mit 1 mm Schrittweite und 1 mm Schussabstand durchgeführt. Hier wurde der Vorschub in x-Richtung (Umfang) durch Drehung des Rohrtestkörpers um die Längsachse realisiert, in y-Richtung (axial) wurden die Prüfköpfe linear über eine der Achsen des Manipulators verschoben. Die Prüfung erfolgte auf Querfehler (Einschallung in Umfangsrichtung) mit verschiedenen Prüfköpfen, zum einen in Impuls-Echo-Technik mit einem Prüfkopf sowie auch mit zwei Prüfköpfen in V-Anordnung im Sende-Empfangs-Modus. Die verwendeten Prüfköpfe umfassen:

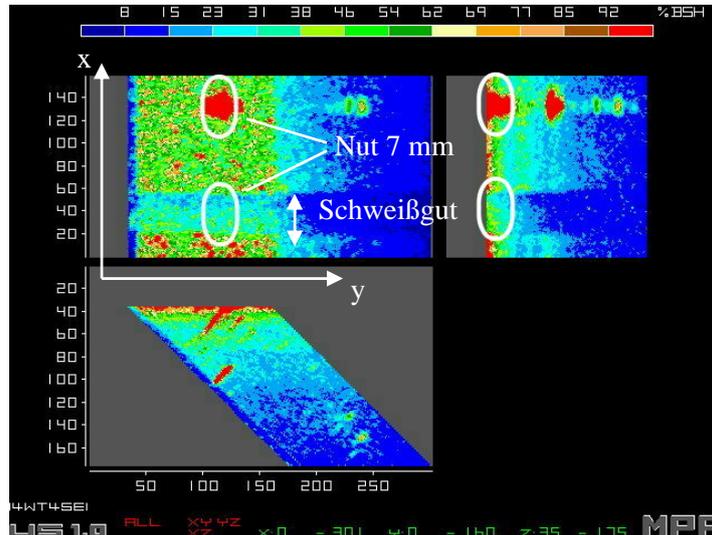
- Impuls-Echo, Transversalwellen, Einschallwinkel  $45^\circ$ , Prüffrequenz 2 MHz
- Impuls-Echo, Longitudinalwellen, Einschallwinkel  $58^\circ$ , Prüffrequenz 2 MHz
- V-Anordnung (Sende-Empfang), Longitudinalwellen, Einschallwinkel  $58^\circ$ , Prüffrequenz 2 MHz, Schielwinkel jeweils  $27^\circ$ , Prüfkopf-Abstand 78 mm

Mit der Einkopf-Technik unter  $45^\circ$  Winkeleinschallung mit Transversalwellen waren von vornherein keine besonders guten Ergebnisse zu erwarten. Zum einen liegt aufgrund der Krümmung des Testkörpers der Auftreffwinkel an der Innenoberfläche bei etwa  $60^\circ$ , so dass der Winkelspiegeleffekt nur sehr eingeschränkt nutzbar ist, zum anderen sind vertikal polarisierte Transversalwellen typischerweise besonders stark von den Effekten im anisotropen Schweißnahtgefüge betroffen (Streuung, Änderung der Ausbreitungsrichtung). Gerade bei der Einkopf-Technik für die Prüfung auf Querfehler in der Schweißnaht ist der Einfluss der Gefügestruktur im Schweißgut besonders groß, weil der gesamte Schallweg im Schweißgut verläuft. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis der Ultraschallprüfung mit der  $45^\circ$  Winkeleinschallung mit Transversalwellen für den Prüfbereich mit zwei 7 mm tiefen Nuten, eine im austenitischen Grundwerkstoff und eine in der Pufferung der Mischschweißverbindung (gleiche axiale Position wie der interkristalline Spannungskorrosionsriss). Die Nut im Grundwerkstoff ist trotz des nicht idealen Auftreffwinkels mit sehr gutem Signal-Rausch-Abstand nachweisbar, während im Bereich der Schweißverbindung keine Anzeige aus der inneren Oberfläche erkennbar ist.

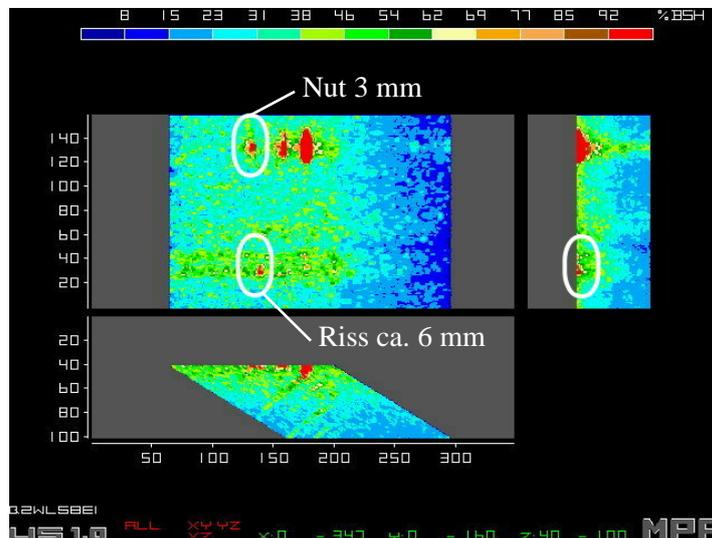
Etwas bessere Erfolgsaussichten hätte man von der Einkopf-Technik mit  $58^\circ$  Longitudinalwellen erwartet, da Longitudinalwellen durch die Stängelkristalle der Schweißnaht weniger stark beeinflusst werden. Bei dem Einschallwinkel von  $58^\circ$  liegt der Auftreffwinkel an der inneren Oberfläche bei etwa  $90^\circ$ , die Innenoberfläche wird also streifend getroffen, so dass ein von der Innenoberfläche ausgehender Fehler durch direkte Reflexion gut nachweisbar sein müsste. Dass dies in der Mischschweißverbindung nicht der Fall ist, zeigte die Prüfung im Bereich der 5 mm tiefen Nuten. Hier konnte nur die Nut im Grundwerkstoff nachgewiesen werden, die Nut im Schweißgut ist nicht erkennbar. Der interkristalline Spannungskorrosionsriss ist mit dieser Prüftechnik nachweisbar, allerdings mit unzureichendem Signal-Rausch-Abstand, Abbildung 7.

Der entscheidende Vorteil der Prüftechnik mit zwei Prüfköpfen in V-Anordnung im Sende-Empfangs-Modus ist, dass – anders als bei der Einkopf-Technik – ein Großteil des Schall-

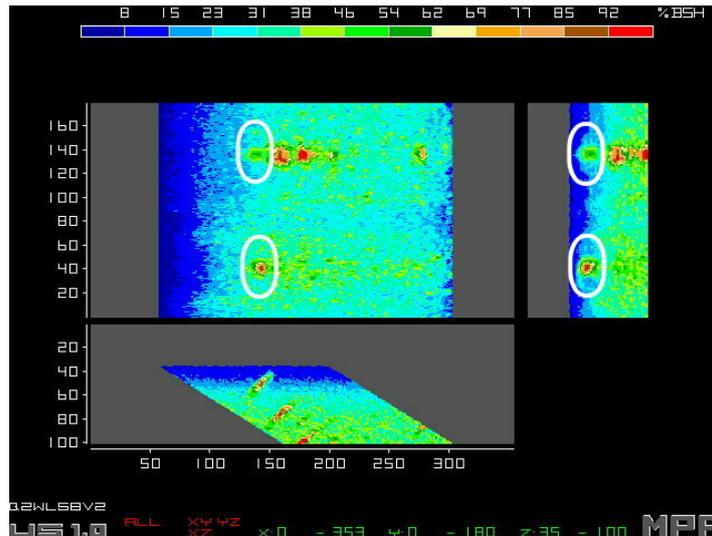
weges außerhalb des Schweißgutes liegt und somit der Einfluss des Schweißnahtgefüges minimiert wird. Die beiden Prüfköpfe sind so angeordnet, dass sich die Schallfelder im Bereich der Innenoberfläche überschneiden und somit der Schallpuls des Senders von einem senkrecht von der Innenoberfläche ausgehenden Fehler zum Empfänger reflektiert wird. Nur im Bereich der inneren Oberfläche muss der Schall durch das Schweißgut. Die so erreichte deutliche Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes beim Nachweis des interkristallinen Spannungskorrosionsrisses ist in Abbildung 8 zu erkennen.



**Abbildung 6:** 45° Transversalwelle 2 MHz, Impuls-Echo, Nuten (7 mm Tiefe) im austenitischen Grundwerkstoff bzw. in der Schweißnaht



**Abbildung 7:** 58° Longitudinalwelle 2 MHz, Impuls-Echo, Nut 3 mm im austenitischen Grundwerkstoff und Riss 6 mm im Schweißgut



**Abbildung 8:** 58° Longitudinalwelle 2 MHz, V-Anordnung (S-E), Nut 3 mm im austenitischen Grundwerkstoff und Riss 6 mm im Schweißgut

#### 4. Zusammenfassung

Als Testfehler für die Ultraschallprüfung wurden an der MPA Stuttgart erfolgreich interkristalline Spannungskorrosionsrisse in austenitischem Grundwerkstoff und Schweißgut eingebracht. Die Risse sind stark verästelt und verlaufen schräg zur Oberfläche. Dadurch ergeben sich große Unterschiede im Reflexionsverhalten im Vergleich zu Schwingrisse oder Nuten. Bei der Mischnahtprüfung hat sich gezeigt, dass erwartungsgemäß der Fehler nachweis bei langen Schallwegen in austenitischem Schweißgut besonders erschwert ist. Erst mit optimierter Prüftechnik (V-Anordnung, S-E-Modus) lassen sich Fehler im Schweißgut sicher nachweisen. Bei interkristallinen Spannungskorrosionsrisse ist eine reine Amplitudenbewertung der Ultraschallsignale unzureichend. Es ist eine mechanisierte Prüfung zu empfehlen, die eine detaillierte Analyse der Signale bzw. Signalmuster erlaubt. Die Vorgehensweise der Empfindlichkeitsjustierung an künstlichen Fehlern als definierte und reproduzierbare Referenz ist grundsätzlich sinnvoll. Zum Nachweis der Leistungsfähigkeit von Prüftechniken können Vergleichskörper mit realistischen Fehlern eine wichtige Ergänzung darstellen.

#### Referenzen

- [1] H. Waidele et. al.: „Bewertung der Aussagefähigkeit von Ultraschall- und Wirbelstromprüfung austenitischer Plattierungen von Reaktordruckbehältern“, BMU Vorhaben SR2318, 1. Technischer Bericht 884 01 001, Stuttgart, 2000
- [2] A. Erhard, U. Mletzko, V. Schmitz: „Zur Bedeutung von Ultraschall-Testkörpermessungen auf Empfindlichkeitseinstellung und Anzeigenbewertung von Rissen im oberflächennahen Bereich“, Abschlussbericht BMU Vorhaben SR 2238, 1999
- [3] F. Walte, W. Müller: “Influence of crack inclination and roughness on the ultrasonic inspection using focussed sound fields”, 6th International Conference on NDE in the Nuclear Industry, 1983
- [4] U. Mletzko, S. Zickler: „Erste Bewertung der Aussagesicherheit von zerstörungsfreien Prüfungen an Mischschweißverbindungen auf Querrisse“, BMU Vorhaben SR 2501, Technischer Bericht 1.1, Stuttgart, 2007
- [5] U. Mletzko, S. Zickler: „Verbesserte Bewertung der Aussagefähigkeit von zerstörungsfreien Prüfungen an Komponenten aus Nickelbasislegierungen oder austenitischen Werkstoffen“, BMU Vorhaben SR 2501, Technischer Bericht 1.2, Stuttgart, 2007