

# Querfehlerprüfung an anisotropen Engspaltschweißnähten mit Gruppenstrahlern

Uwe VÖLZ, Heinz MRASEK, Thomas HECKEL  
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12200 Berlin  
uwe.voelz@bam.de

**Kurzfassung.** Die Prüfung von anisotropen Schweißnähten auf Querfehler stellt auch heute noch eine Herausforderung für die Ultraschallprüfung dar. Das gilt insbesondere für das Auffinden kleiner rissartiger Fehlstellen in einer unbeschleunigten Wurzel. Ursachen dafür sind zum einen das ausgeprägte Beugungs-, Streuungs- und Reflexionsverhalten solcher Nähte und zum anderen die störenden Formanzeigen aus dem Wurzelbereich, die sicher von den Fehlstellen unterschieden werden müssen, um Fehlinterpretationen bei der Bewertung der Anzeigen zu vermeiden.

In der vorliegenden Arbeit werden an einer 85 mm dicken und 6 bis 10 mm breiten Engspaltschweißnaht mit stängelkristalliner Struktur rissartige Testfehler in Form erodierter Nuten untersucht. Die 2 und 4 mm tiefen Nuten sind mit 5 mm Länge kürzer als die Wurzelbreite. Die Wurzel ist nicht beschleunigt und hat eine Überhöhung von ca. 2 mm. Ziel ist es, die Fehlstellen von den Form- und Gefügeanzeigen zu unterscheiden und sicher zu detektieren. Eine Größenbestimmung ist nicht vorgesehen.

Durch den Einsatz der Gruppenstrahlertechnik ist es möglich, optimale Einschallparameter zu finden, mit denen diese Aufgabe gelöst werden kann. Es werden zwei azimuthal schwenkende lineare Gruppenstrahlerprüfköpfe mit Vorsatzkeil in SE-Technik verwendet, die so auf beiden Seiten der Schweißnaht angeordnet sind, dass sich ihre Schallfelder unabhängig von der Einschallrichtung in der Schweißnahtwurzel überlagern. Damit ist es möglich, optimale Einschallwinkel für das Prüfproblem zu finden und in einer Prüffahrt gleichzeitig in beiden Einschallrichtungen längs der Schweißnaht zu prüfen.

## Einführung

In vielen Bereichen, wie z. B. im Hochtemperaturbereich konventioneller Kraftwerke, werden zunehmend nickellegierte Werkstoffe eingesetzt. Diese Werkstoffe bilden beim Erstarren aus der Schmelze wie auch beim Schweißen Stängelkristallite mit den typischen inhomogenen anisotropen Eigenschaften aus, wie sie von austenitischen Stählen bekannt sind [6]. Insbesondere bei Querfehlern ist die Prüfbarkeit mit Ultraschall deshalb sehr eingeschränkt, da dabei das Schallfeld durch Beugung, Streuung und Reflexion aufgrund der Nahtstruktur besonders stark beeinflusst wird [3][4]. Die Ultraschallprüfung von anisotropen Schweißnähten auf Querfehler stellt deshalb auch heute noch eine Herausforderung dar.

Ist die Wurzel der Schweißnaht dabei nicht beschleunigt, ist eine Unterscheidung kleiner Rissanzeigen von den Formanzeigen aus der Wurzel nur schwer möglich. Insbesondere bei der Verwendung konventioneller Winkelprüfköpfe stößt man dabei schnell an Grenzen [2]. Hier ist der Einsatz aufwändigerer Prüfmethode mit mechanisierter Abtastung und Gruppenstrahlertechnik erforderlich [3][4].



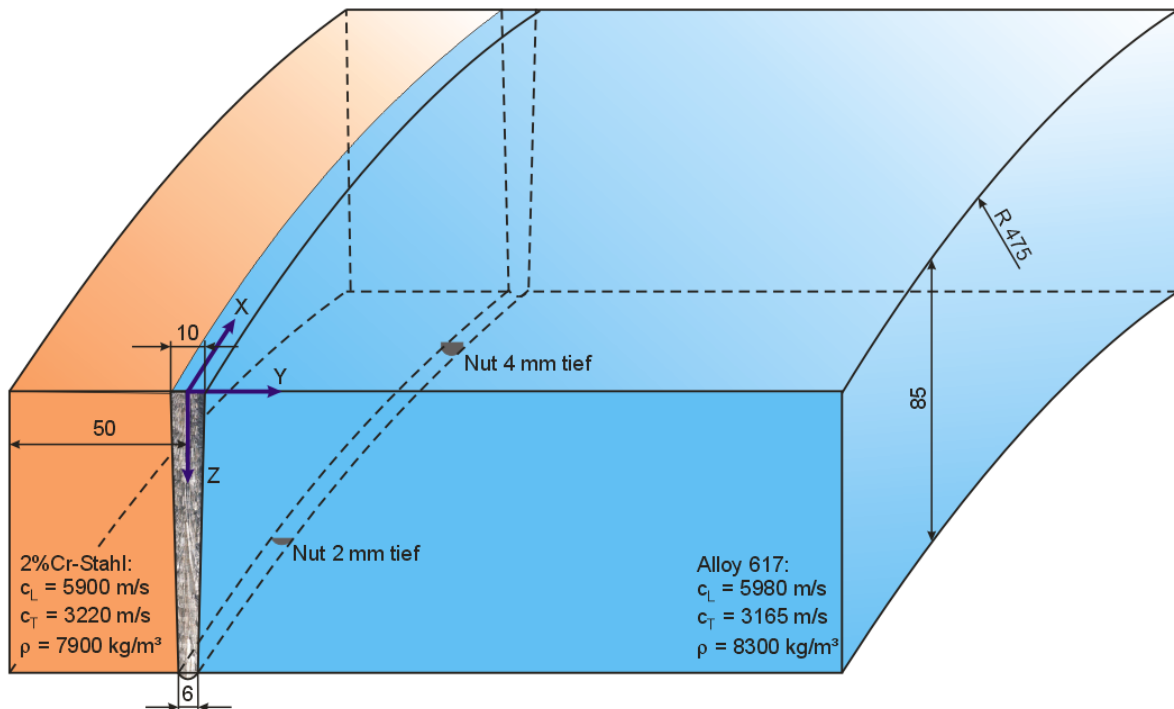
# 1. Prüfaufgabe

## 1.1 Prüfgegenstand

In dieser Arbeit wird ein 85 mm dickes Rohrsegment mit einer Engspaltschweißnaht zwischen 2%-Chromstahl und einer Nickellegierung Alloy 617 (Bild 1 links) untersucht. Das Schweißgut aus Alloy 617 bildet die typischen Stängelkristallite aus, wie im Schliffbild (Bild 1 rechts) zu erkennen ist. Die Wurzel der Naht ist nicht beschliffen und hat einen Durchhang von ca. 2 mm. Eine Übersicht über die Lage der Testreflektoren sowie eine Auflistung der für die Ultraschallprüfung relevanten Materialparameter ist in der Skizze im Bild 2 dargestellt.



**Bild 1.** Prüfgegenstand, links: Gesamtansicht, rechts: Schliffbild der Engspaltschweißnaht



**Bild 2.** Skizze des Prüfgegenstandes mit Materialparametern und Testreflektoren

## 1.2 Testreflektoren

Als Testreflektoren wurden zwei funkenerodierte Nuten quer zur Schweißfortschrittsrichtung in die Wurzel eingebracht, wie in Bild 3 zu sehen ist [3][4][5]. Die Tiefe der Nuten, beginnend von der Oberfläche des Wurzeldurchgangs, beträgt 2 und 4 mm. Die 2 mm tiefe Nut befindet sich also ausschließlich innerhalb des Wurzeldurchgangs, während die 4 mm tiefe Nut noch 2 mm in die eigentliche Schweißnaht hineinreicht. Die Breite von 5 mm wurde so gewählt, dass sich die Nuten ausschließlich in der Naht befinden und nicht ins Grundmaterial hineinreichen.



**Bild 3.** Nuten in der Schweißnahtwurzel

Ziel ist es, diese Fehlstellen mit möglichst geringem technischen und zeitlichen Aufwand sicher nachzuweisen. Eine Größenbestimmung der Fehlstellen ist nicht vorgesehen.

## 2. Prüftechnik

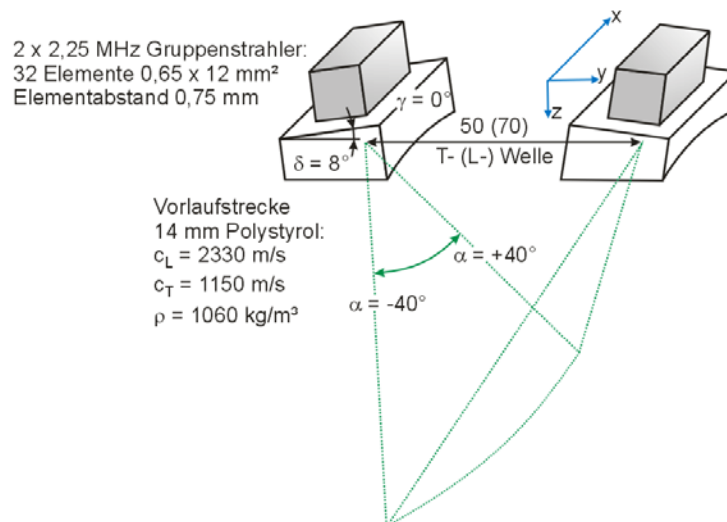
### 2.1 Prüfkopfauswahl

Für die Prüfung wurden handelsübliche Gruppenstrahlerprüfköpfe mit einer für die Austenitprüfung üblichen Arbeitsfrequenz von 2 MHz ausgewählt [6]. Um den Aufwand zu minimieren wurde eine Anordnung verwendet, die es ermöglicht, mit einem Prüfkopf beide Einschallrichtungen längs der Schweißnaht abzudecken. Da dazu ein großer Schwenkbereich des Gruppenstrahlers notwendig ist, wurde ein Prüfkopf mit großer Bandbreite (ca. 90 %) und mit der kleinsten standardmäßig erhältlichen Elementbreite von 0,65 mm, das entspricht dem 0,4fachen der Wellenlänge der Transversalwelle, gewählt [7]. Um eine möglichst große Apertur zu erhalten, wurde ein Lineararray mit 32 Elementen eingesetzt. Im SE-Betrieb mit zwei Prüfköpfen waren somit 64 Elemente anzusteuern.

Als Vorsatzkeil ist eine handelsübliche ebene Vorlaufstrecke ohne Keilwinkel  $\gamma$  an die vorgegebene Geometrie angepasst worden. Die Sohle wurde mit einem entsprechenden Krümmungsradius von 475 mm in Längsrichtung und einem Dachwinkel  $\delta$  versehen (Bild 4).



**Bild 4.** Prüfkopf mit Vorsatzkeil, links: Seitenansicht (Krümmung), rechts: Frontansicht (Dachwinkel)



**Bild 5.** Skizze der Prüfkopfanzordnung

## 2.2 Prüfkopfanzordnung

Für die Prüfung wurde die typische symmetrische V-Anordnung [1][2][3][4] für den SE-Betrieb verwendet (Bild 5). Auf Grund des eingeschränkten Prüfbereiches von 50 mm auf der Stahlseite musste ein sehr kleiner Dachwinkel von  $8^\circ$  gewählt werden, um auch mit Longitudinalwellen im Bereich der Wurzel prüfen zu können. Durch den Keilwinkel von  $0^\circ$  war es möglich, gleichzeitig in beiden Einschallrichtungen längs der Schweißnaht zu prüfen.

Mit der gewählten Anordnung können Longitudinal- und Transversalwellen mit einer empfindlichen Zone im Bereich der Schweißnahtwurzel angeregt werden. Einschallwinkel  $\alpha$  bis  $\pm 40^\circ$  für die Transversalwelle sind realisierbar. Die Verschiebung des empfindlichen Tiefenbereiches durch die Abhängigkeit des Fokuspunktes vom Einschallwinkel kann im interessierenden Einschallwinkelbereich von  $20^\circ$  bis  $40^\circ$  (mit größeren Winkeln können die Testreflektoren aufgrund der begrenzten Abmessungen des Prüfgegenstandes nicht aus beiden Einschallrichtungen erfasst werden) vernachlässigt werden. Der Abstand der Prüfköpfe zueinander muss dabei ausschließlich an die jeweilige Wellenart angepasst werden.

Die Prüfung erfolgte mit einer mechanisierten mäanderförmigen Abtastung der Schweißnaht mit 0,5 mm Auflösung und einem Winkelschwenk in  $1^\circ$ -Schritten, um die maximale Echohöhe in Abhängigkeit vom Einschallwinkel bestimmen zu können.

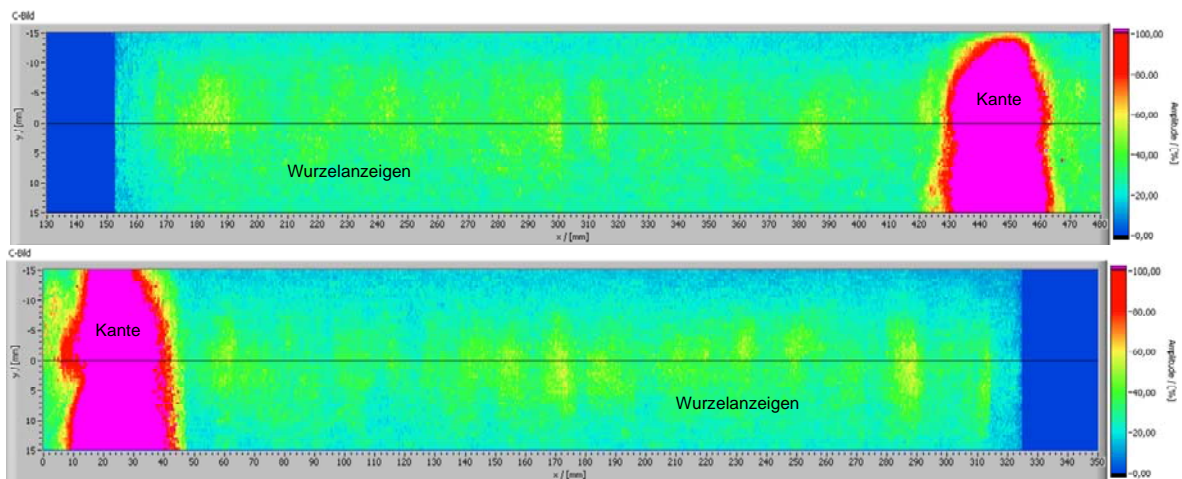
## 3. Prüfergebnis

### 3.1 Longitudinalwelle

Die Prüfung mit Longitudinalwellen zeigt im gesamten Einschallwinkelbereich von  $0^\circ$  bis  $\pm 40^\circ$  (Auftreffwinkel bis  $\pm 50^\circ$ ) Anzeigen aus der unbeschleunigten Schweißnahtwurzel. Die Anzeigen der Nuten lassen sich unter keinem Einschallwinkel von diesen Störanzeigen trennen. Im Bild 6 ist als Beispiel der Standardeinschallwinkel von  $35^\circ$ , das entspricht einem Auftreffwinkel auf die Nut von  $45^\circ$ , gezeigt.

Dass die Nuten mit Longitudinalwellen unter den gegebenen Bedingungen nicht nachweisbar sind, ist vor allem auf den geringen Winkelspiegeleffekt und die deutlichen Formanzeigen aus der unbeschleunigten Wurzel zurückzuführen.





**Bild 6.** C-Bild im Tiefenbereich  $z = 80$  bis  $100$  mm, Longitudinalwelle mit Auftreffwinkel  $45^\circ$ , oben: positive Einschallrichtung ( $\alpha = +35^\circ$ ), unten: negative Einschallrichtung ( $\alpha = -35^\circ$ )

### 3.2 Transversalwelle

Die Prüfung mit Transversalwellen erfolgte im Einschallwinkelbereich von  $20^\circ$  bis  $40^\circ$  (Auftreffwinkel ca.  $25^\circ$  bis  $50^\circ$ ). Im Bild 7 ist als erstes Beispiel wieder der Standard-einschallwinkel von  $35^\circ$  gezeigt. Auch hier sind störende Anzeigen aus der unbeschleunigten Schweißnahtwurzel zu erkennen und eine sichere Trennung der Nutanzeigen ist nicht möglich.

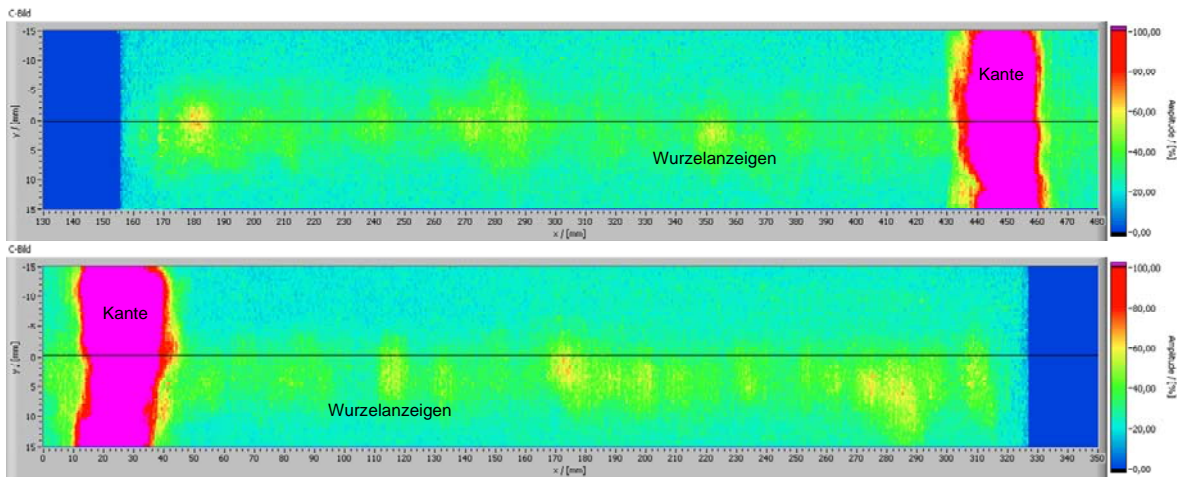
Als Nächstes wurde der Einschallwinkel mit dem größten Signal/Stör-Abstand für beide Einschallrichtungen längs der Schweißnaht gesucht. Als optimale Einschallwinkel ergaben sich  $+23^\circ$  und  $-24^\circ$ , wie in Bild 8 zu sehen ist. Der beste Signal/Stör-Abstand beträgt für die 4 mm tiefe Nut 8 dB und für die 2 mm Tiefe Nut 2 dB bei  $-24^\circ$ . Damit kann nur die 4 mm tiefe Nut zuverlässig nachgewiesen werden. Die 2 mm tiefe Nut ist nur anhand der Echodynamik erkennbar.

Schon geringe Abweichungen vom idealen Einschallwinkel verschlechtern den Signal/Stör-Abstand deutlich. In den Bildern 9 und 10 ist das Ergebnis bei einer Abweichung des Einschallwinkels von  $-2^\circ$  bzw.  $+2^\circ$  dargestellt. Dabei reduziert sich in beiden Fällen der Signal/Stör-Abstand auf 3 dB, auch wenn in Bild 10 die Amplitude höher ist als in Bild 9, da sich bei kleineren Beträgen des Einschallwinkels auch die Echoamplitude der Formanzeigen aus der Wurzel erhöht.

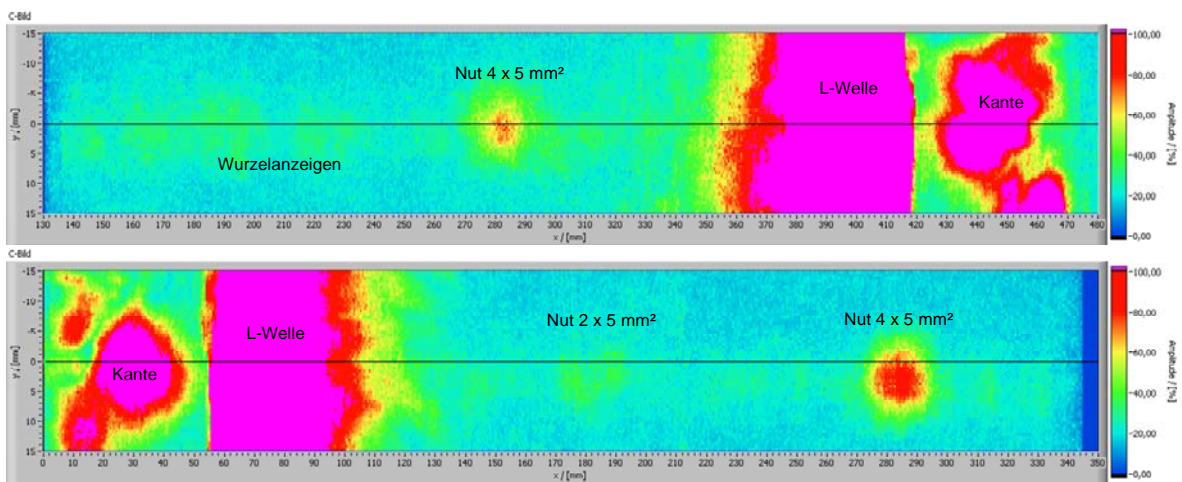
Daraus folgt, dass für ein optimales Prüfergebnis ein hochaufgelöster Winkelschwenk im Bereich der optimalen Einschallwinkel in beiden Einschallrichtungen notwendig ist. Unter den vorgegebenen Bedingungen ist eine Winkelauflösung von  $1^\circ$  im Bereich von  $20^\circ$  bis  $30^\circ$  empfehlenswert.

Die Nuten lassen sich mit Transversalwellen besser nachweisen, obwohl sie durch die Anisotropie der Schweißnaht stärker beeinflusst werden als Longitudinalwellen [6]. Das ist zum einen auf den kurzen Schallweg innerhalb der Naht aufgrund der V-Anordnung und zum anderen auf den Winkelspiegeleffekt zurückzuführen. Allerdings ergibt sich durch die Ablenkung des Schallfeldes ein optimaler Einschallwinkel für die größte Echoamplitude am Winkelspiegel, der deutlich von den üblichen Werten im isotropen Medium abweicht.

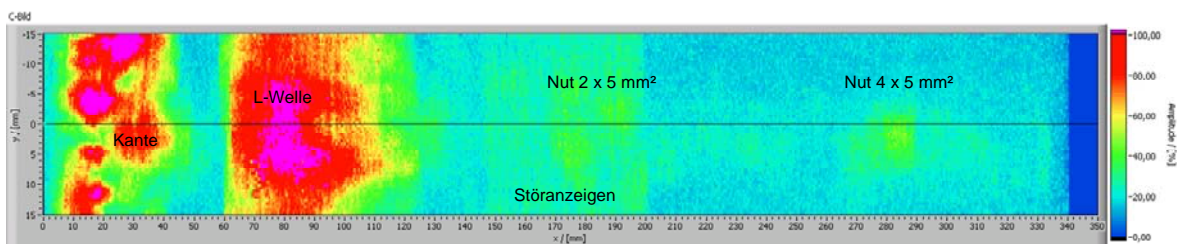
Ein größerer Dachwinkel könnte unter Umständen bessere Ergebnisse ermöglichen. Das setzt allerdings voraus, dass der Prüfbereich auf beiden Seiten der Schweißnaht breit genug ist. Durch ein Beschleifen der Wurzel ist mit geringeren Störanzeigen zu rechnen und die Detektierbarkeit von rissartigen Querfehlern sollte sich dadurch ebenfalls verbessern. In beiden Fällen müsste der ideale Einschallwinkel aufgrund der veränderten Prüfbedingungen erneut ermittelt werden.



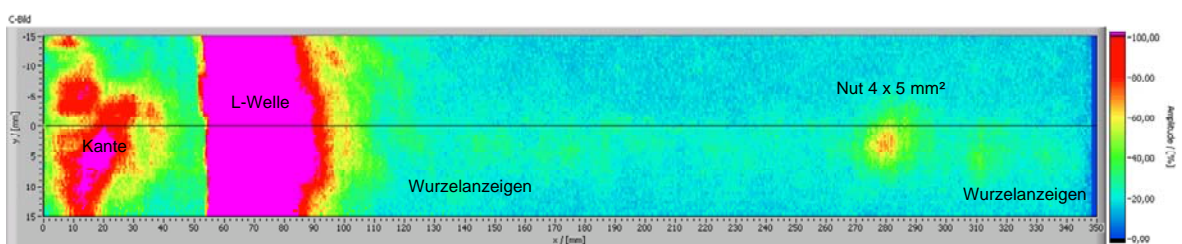
**Bild 7.** C-Bild im Tiefenbereich  $z = 80$  bis  $100$  mm, Transversalwelle mit Auftreffwinkel  $45^\circ$ , oben: positive Einschallrichtung ( $\alpha = +35^\circ$ ), unten: negative Einschallrichtung ( $\alpha = -35^\circ$ )



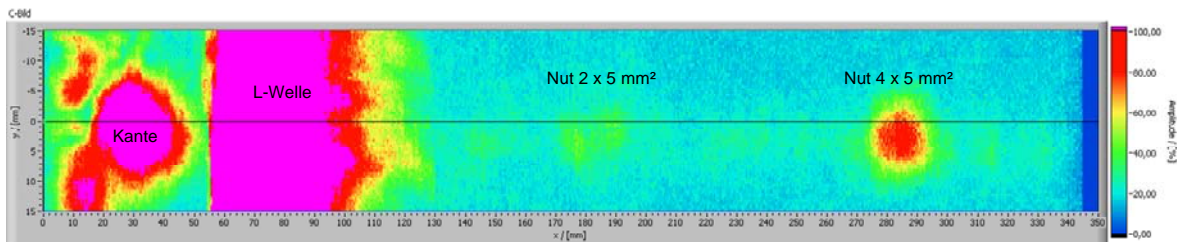
**Bild 8.** C-Bild im Tiefenbereich  $z = 80$  bis  $100$  mm, Transversalwelle mit Auftreffwinkel ca.  $30^\circ$ , oben: positive Einschallrichtung ( $\alpha = +23^\circ$ ), unten: negative Einschallrichtung ( $\alpha = -24^\circ$ )



**Bild 9.** C-Bild im Tiefenbereich  $z = 80$  bis  $100$  mm, Transversalwelle mit Einschallwinkel  $\alpha = -26^\circ$



**Bild 10.** C-Bild im Tiefenbereich  $z = 80$  bis  $100$  mm, Transversalwelle mit Einschallwinkel  $\alpha = -22^\circ$



**Bild 11.** C-Bild im Tiefenbereich  $z = 80$  bis  $100$  mm, Transversalwelle mit Einschallwinkel  $\alpha = -24^\circ$ , mit Berücksichtigung der unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten beim Senden und Empfangen und der Kompensation des Krümmungseinflusses durch Fokussierung

Die vorliegende Prüfaufgabe lässt sich ideal mit der Gruppenstrahlertechnik lösen. Vor allem durch die Bestimmung eines optimalen Einschallwinkels können die Prüfergebnisse deutlich verbessert werden. Die Möglichkeit zur Kompensation des Einflusses der Oberflächenkrümmung durch Fokussierung sowie die getrennte Steuerung des Einschallwinkels beim Senden und Empfangen in Abhängigkeit von der Schallgeschwindigkeit des Grundmaterials auf der betreffenden Seite der Schweißnaht zeigen hier keine Vorteile, wie im Bild 11 zu sehen ist.

## Zusammenfassung

Mit Hilfe der Gruppenstrahlertechnik ist es möglich, an inhomogenen, anisotropen Schweißnähten den Einschallwinkel für den Nachweis von Querfehlern zu optimieren. Zusätzlich kann der Prüfaufwand durch gleichzeitiges Prüfen in beiden Einschallrichtungen längs der Schweißnaht mit einer SE-Anordnung aus zwei Gruppenstrahlerprüfköpfen gering gehalten werden. Die gezielte Auswahl der Prüfkopfparameter ermöglicht dabei einen Schwenkbereich für den Einschallwinkel der Transversalwelle von  $\pm 40^\circ$ .

Durch eine feine Winkelauflösung von  $1^\circ$  in einem ausreichend großen Winkelbereich von  $20^\circ$  bis  $30^\circ$  kann unter den vorliegenden Bedingungen eine  $4$  mm tiefe Nut quer zur Schweißnaht mit einem Signal/Störabstand von  $8$  dB zuverlässig nachgewiesen werden. Kleinere Fehlstellen sind aufgrund der starken Formechos aus der unbeschleunigten Schweißnaht nicht sicher nachweisbar.

Die Ergebnisse decken sich nicht zwangsläufig mit den theoretischen Erwartungen. Im vorliegenden Beispiel können die rissartigen Fehlstellen nur durch den Winkelspiegel-effekt mit Transversalwellen nachgewiesen werden. Auch wenn Longitudinalwellen aufgrund ihrer Eigenschaften für die Prüfung anisotroper Schweißnähte von Vorteil sind, ist es in diesem Fall nicht möglich, die Testfehler damit sicher zu erkennen. Ursache dafür sind die starken Formanzeigen aus der unbeschleunigten Wurzel. Außerdem ist es nicht möglich einen optimalen Dachwinkel für die SE-Anordnung einzustellen, da der Prüfbereich auf einer Seite der Schweißnaht stark eingeschränkt ist. Für eine Verbesserung der Ergebnisse bei der Querfehlerprüfung an anisotropen Engspaltschweißnähten ist es daher empfehlenswert, einen ausreichenden Prüfbereich zur Verfügung zu stellen sowie die Wurzel zu beschleifen.



## Referenzen

- [1] G. Herberg, E. A. Khodarev, H. Röhrs, G. Kirchner  
In-Service Inspection and Monitoring of LMFBRs  
International Atomic Energy Agency, International Working Group on Fast Reactors,  
Specialists Meeting, Bensberg 1976  
[http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/09/362/9362352.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/09/362/9362352.pdf)
- [2] E. Schulz  
Manuelle Messungen an Prüfungsstücken mit Ultraschall  
ZfP-Zeitung 84, 2003, Seite 36-42  
<http://www.ndt.net/article/dgzfp/pdf/zfp84-schulz.pdf>
- [3] G. Brekow, D. Tschardt, V. Munikoti, A. Erhard  
Querfehlerprüfung an Mischnahtverbindungen mit Ultraschall  
DGZfP-Jahrestagung 2003  
<http://www.ndt.net/article/dgzfp03/papers/v14/v14.htm>
- [4] A. Erhard, V. Munikoti, G. Brekow, U. Tessaro, D. Tschardt  
Modeling for the Improvement of Dissimilar Weld Inspection  
WCNDT 2004  
[http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/signal\\_processing/561\\_erhard.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/signal_processing/561_erhard.pdf)
- [5] T. Just, J. Wessels  
Qualifizierung von Ultraschallprüfungen an austenitischen Schweißnähten und an Mischschweißnähten -  
Vorgehensweise und Nachweis der Eignung  
DGZfP-Jahrestagung 2009  
<http://www.ndt.net/article/dgzfp2009/Inhalt/mi1b2.pdf>
- [6] K. Matthies u. a.  
Ultraschallprüfung von austenitischen Werkstoffen  
DGZfP Berlin, Verlag DVS Media, 2009
- [7] U. Völz, H. Mrasek  
Vergleich von Modellrechnung und Schallfeldmessung an Gruppenstrahlerprüfköpfen  
DGZfP-Jahrestagung 2010  
<http://www.ndt.net/article/dgzfp2010/Inhalt/di1b3.pdf>