

Verbesserung und Qualifizierung der Ultraschallprüfung von Mischnähten im Primärkreis von KKW

Steffen MITZSCHERLING¹, Enrico BARTH¹, Sebastian GÖTSCHEL²,
Tobias HOMANN¹, Jens PRAGER¹, Martin WEISER²

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

² Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB), Berlin

Kontakt E-Mail: steffen.mitzscherling@bam.de

Kurzfassung. Die im Primärkreislauf von Kernkraftwerken anzutreffenden austenitischen Schweiß- und Mischnähte sind nicht nur extrem sicherheitsrelevant, sondern stellen auch sehr hohe Anforderungen an die Materialprüfung. Neben der eingeschränkten Zugänglichkeit ist das makroskopische Gefüge der Schweißnaht für die Prüfung mit Ultraschall von höchster Bedeutung.

Um Materialfehler zuverlässig in Position und Größe bestimmen zu können, müssen die Kornorientierungen und die elastischen Konstanten des anisotropen Schweißnahtgefüges bekannt sein. Für die bildgebende Darstellung möglicher Materialfehler kommen folgende Arbeitsschritte zum Einsatz: Zunächst wird die Schweißnaht durchschallt, um mit einem inversen Verfahren wichtige Schweißnahtparameter wie beispielsweise die Kornorientierung bestimmen zu können. Auf der Basis dieser Parameter werden im nächsten Schritt die Schallwege mittels Raytracing (RT) simuliert. Zuletzt werden dieser RT-Simulation die Messdaten (A-Scans) von verschiedenen Sender- und Empfängerpositionen zugeordnet und nach der SAFT-Methode (Synthetic Aperature Focusing Technique) zeitaufgelöst überlagert. Die Kombination aus inversem Verfahren, RT und SAFT gewährleistet auch in anisotropen Werkstoffen eine ortsrichtige Visualisierung der Fehler.

Wir erläutern diese drei Verfahren und stellen die Prüfanordnung von Prüfkörpern mit künstlichen Testfehlern vor. Messdaten sowie deren Auswertung werden mit den Ergebnissen einer CIVA-Simulation verglichen.

Einführung

Zerstörungsfreie Prüfverfahren finden überall in der Materialprüfung Anwendung. Sie sind neben der Überprüfung der Fertigungsqualität insbesondere für die wiederkehrende Prüfung geeignet. Eine besondere Herausforderung an Prüfer und Technik stellen Bauteile in den schwer zugänglichen Bereichen von Großanlagen, wie beispielsweise dem Primärkreislauf eines Kernkraftwerkes. Für den Betrieb und die Sicherheit der Anlagen ist es von höchster Wichtigkeit, dass Materialfehler in den Rohrsystemen zuverlässig identifiziert, lokalisiert und bewertet werden. Ein geeignetes Verfahren ist die Prüfung mit Ultraschall, das jedoch die materialtechnischen Besonderheiten der austenitischen Schweiß- und Mischnähte berücksichtigen muss. Beim Abkühlen des Schweißgutes bilden sich grobkörnige Kristallite, die eine Vorzugsorientierung entlang des dabei auftretenden Temperaturgradienten



aufweisen. Die Korngrenzen verursachen bei der Ultraschallprüfung ein starkes Gefügerauschen und aus der Ausrichtung resultiert eine inhomogene akustische Anisotropie, das heißt die Schallgeschwindigkeiten sind richtungs- und ortsabhängig. Für eine zuverlässige Prüfung müssen die individuellen Besonderheiten einer jeden Schweißnaht sehr genau bekannt sein, was jedoch insbesondere bei Bestandsschweißnähten nicht immer der Fall ist. Aus diesem Grund entwickeln wir ein Prüfverfahren, das zunächst die mechanischen bzw. akustischen Parameter der intakten Schweißnaht bestimmt, um diese in der anschließenden Materialprüfung zu berücksichtigen.

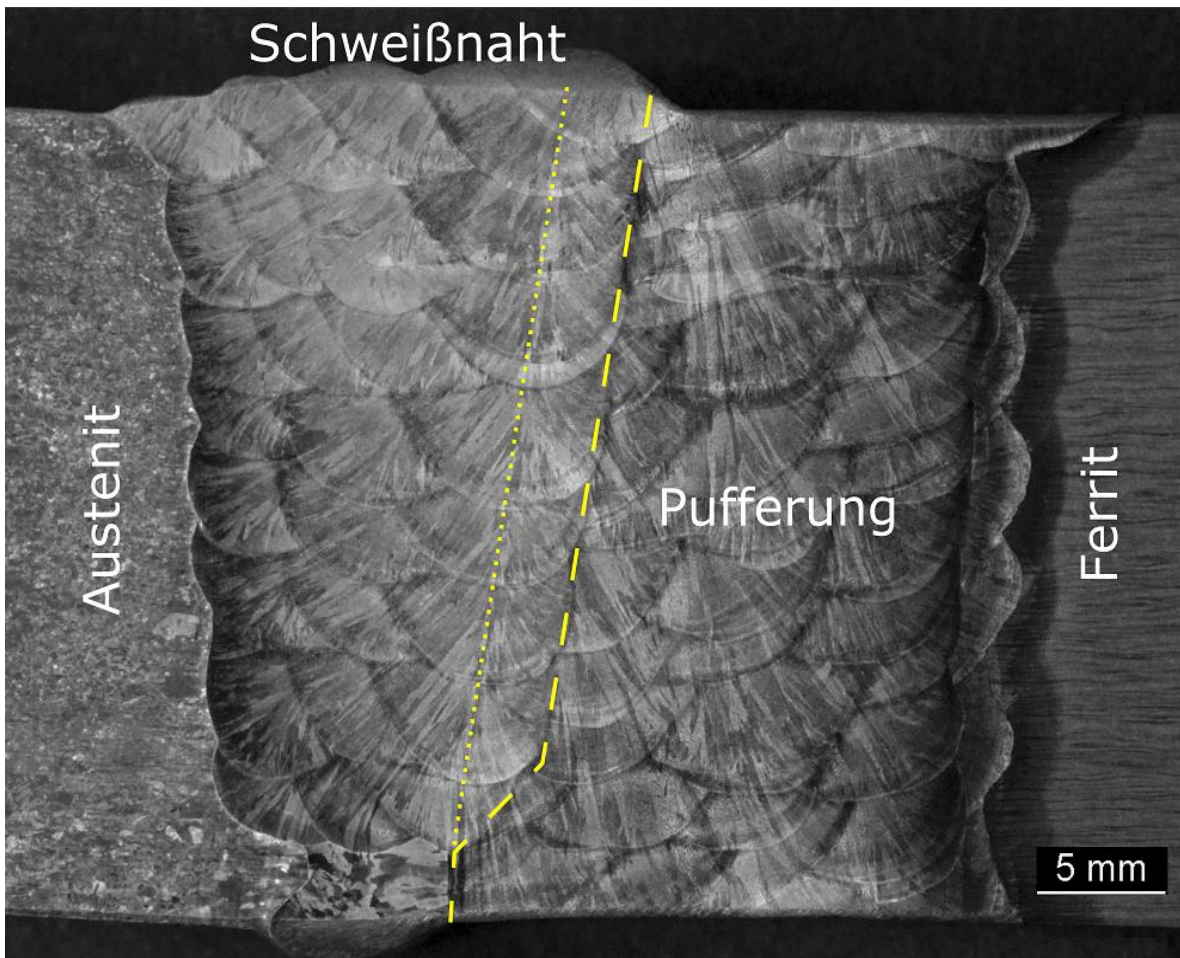


Abb. 1. Schliffbild einer austenitischen Mischnaht. Die gestrichelte Linie bezeichnet den Übergang von Pufferung zu Schweißnaht. In beiden Bereichen sind Kristallstängel zu erkennen, deren Ausrichtung in der Schweißnaht nicht einheitlich ist und sich ausgehend von den Flanken der Kristallmittellachse (gepunktete Linie) annähert. (Bild: MPA Stuttgart)

1. Theoretische Grundlagen

1.1 Beschreibung der Schweißnaht

Die Kornorientierung innerhalb einer Schweißnaht ist abhängig von dem bei der Fertigung auftretenden Temperaturgradienten. Abbildung 1 zeigt das Schliffbild einer typischen Mischnaht. Diese lässt sich in vier Bereiche unterteilen: Die beiden anstehenden Stähle (Austenit und Ferrit), die auf den Ferrit aufgebraute austenitische Pufferung, sowie die austenitische Schweißverbindung. Während in der Pufferung von einer einheitlichen Kornorientierung ausgegangen werden kann, ist die Kornorientierung innerhalb der

Schweißnaht inhomogen. So stehen die Körner der linken Flanke nahezu senkrecht auf dem anstehenden Austenit, während sie an der rechten Flanke der Vorzugsrichtung der Pufferung folgen und von dort in immer flacheren Winkeln zur Mittelachse der Schweißnaht wachsen.

Für die spätere Rekonstruktion der Messdaten ist es wichtig, diesen Verlauf der Kornorientierung mathematisch zu beschreiben. Da das von Ogilvy entwickelte Modell auf symmetrische Schweißnähte beschränkt ist [1], haben wir uns an der von Höhne et al. entwickelten Erweiterung orientiert [2]. Diese berücksichtigt neben den bekannten Abmessungen der Schweißnaht zusätzliche Parameter, die die Lage der Mittelachse, die Kornorientierung auf den Flanken sowie die Änderung des Kristallwachstums beschreiben. Für eine zu prüfende Schweißnaht sind diese Parameter in der Regel unbekannt. Für die Berechnung des Schallverlaufs musste daher auf Erfahrungswerte oder die Schlibbilder von identisch hergestellten Schweißnähten zurückgegriffen werden. Ein inverses Verfahren, das die unbekannt Parameter in situ bestimmt, kann dabei Abhilfe schaffen.

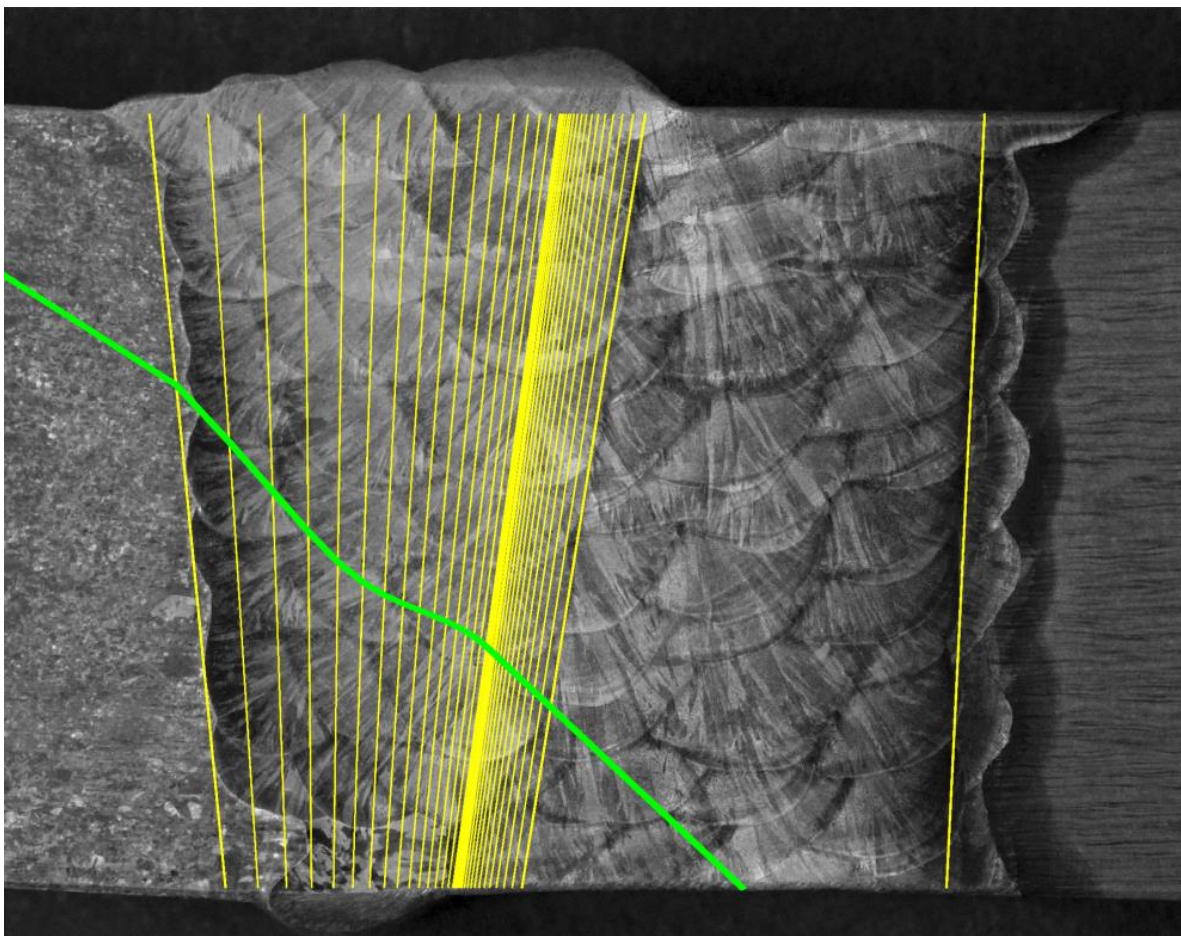


Abb. 2. Raytracing in der diskretisierten Schweißnaht. Bereiche mit identischer Kornorientierung werden als homogene Zonen betrachtet, an deren Grenzen (gelb) der einfallende Schall gebrochen wird. Der auf diese Weise berechnete Schallweg bis zur Rückwand ist grün eingezeichnet.

1.2 Simulation der Schallwege

Um aus der Schallfeldverteilung an einer Oberfläche die Parameter des durchschallten Materials bestimmen zu können, muss der Schallweg zwischen Sender und Empfänger bekannt sein. Ein geeignetes Verfahren ist die Simulation mittels Raytracing. Dabei wird der Verlauf der sich ausbreitenden Wellenfront als Strahl aufgefasst, der beim Übergang von einem Material in ein akustisch anderes gebrochen wird. In anisotropen Medien muss für die Berechnung der Brechung die Richtungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls berücksichtigt

werden. (Die detaillierte mathematische Beschreibung ist in [1] zu finden.) Wird die gesamte Schweißnaht in Bereiche konstanter Kornorientierungen unterteilt, so ergeben sich mehrere Grenzflächen, an denen der Strahl gebrochen wird. Bei einer hinreichend feinen Diskretisierung ergibt sich so ein quasi-kontinuierlicher Schallweg, wie er in Abbildung 2 schematisch dargestellt ist.

1.3 SAFT-Rekonstruktion

Das SAFT-Verfahren (Synthetic Aperture Focusing Technique) ermöglicht es, Fehlstellen genauer zu lokalisieren und diese korrekt in Größe und Geometrie abzubilden. Zusätzlich wird das Gefügerauschen verringert und somit die Güte der Ultraschallprüfung deutlich erhöht. Aus dem A-Bild (Zeitsignal) einer Impuls-Echo-Messung lässt sich lediglich die Entfernung eines Reflektors und dessen Reflektivität bestimmen. Das SAFT-Verfahren verwendet mehrere Datensätze, um daraus ein Bild zu konstruieren. Die Datensätze entstammen mehreren Einzelmessungen, die wahlweise mit einer bewegten Anordnung aus Sender und Empfänger oder einer festen Anordnung mehrerer Sender und Empfänger („Phased Array“) aufgenommen wurden.

Für jede Sende- und Empfangsanordnung werden den Berechnungspunkten des Prüfkörpers über die jeweiligen Signallaufzeiten die Amplituden aus den A-Bildern zugeordnet. Da die Berechnung der Laufzeiten nur in isotropen Medien trivial ist, ist das SAFT-Verfahren beispielsweise auf Raytracing angewiesen, welches wiederum die Kenntnis der ortsabhängigen Schallgeschwindigkeiten benötigt.

2. Inverses Verfahren

Um mit der SAFT-Methode eventuell vorhandene Materialfehler ortsrichtig darstellen zu können, müssen die Parameter der Schweißnaht bekannt sein. Für die zerstörungsfreie Prüfung sind diese nicht direkt zugänglich, lassen sich aber durch geeignete Verfahren indirekt ermitteln. Unser Ansatz ist es, die Schweißnaht zu durchschallen und diese anschließend aus dem an der Oberfläche gemessenen Schallfeld zu rekonstruieren. Eine Simulation des sich im Prüfkörper ausbreitenden Schalls ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

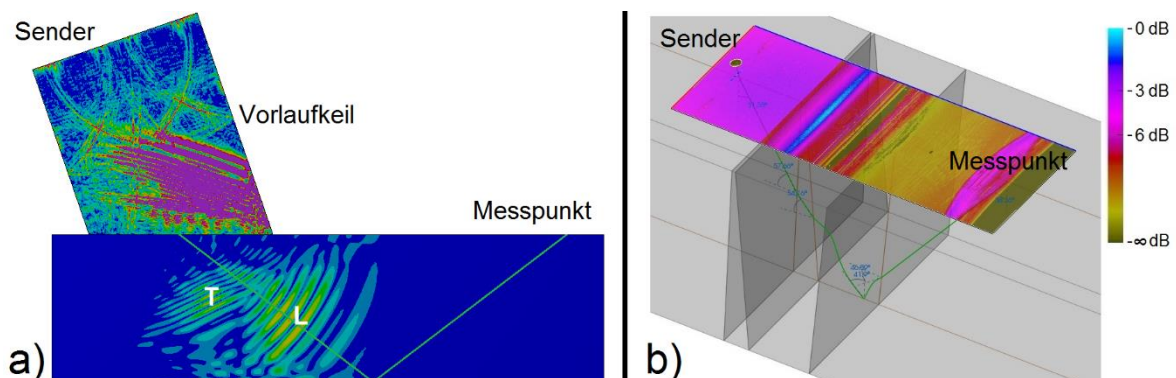


Abb. 3. Simulation des Schallfeldes mit schematischer Darstellung der Schallschnelle in Vorlaufkeil und Prüfkörper (a) sowie an der Oberfläche (b). Der vom Sender emittierte Schall läuft über einen Vorlaufkeil in den Prüfkörper. Nachdem die Longitudinal- und Transversalwellen (L und T) durch die Schweißnaht (in a) nicht dargestellt) propagiert und an der Rückseite reflektiert wurden, kann die Teilchenbewegung an Oberfläche erfasst werden.

2.1 Technische Umsetzung

Die für eine durchschaltete Schweißnaht charakteristische Verteilung der Teilchenschnelle wird mit einem Laservibrometer an der Oberfläche des Prüfkörpers detektiert. Dieses misst unter Ausnutzung des Doppler-Effekts die Bewegung in Richtung des einfallenden Laserstrahls. Um die Bewegungskomponenten senkrecht und entlang der Oberfläche bestimmen zu können, wird jeder Messpunkt unter zwei verschiedenen Winkeln erfasst. Die dritte Komponente entlang der Schweißnahtichtung ließe sich ebenfalls messen, kann in dieser Betrachtungen aber unberücksichtigt bleiben, da die Schweißnaht in Fortschrittsrichtung als homogen angenommen wird. Für ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis haben wir auf dem Messbereich eine Reflexionsfolie angebracht. Abbildung 4 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, denselben Messpunkt aus verschiedenen Winkeln zu treffen. Bei einer Prüffrequenz von 1 MHz entspricht eine Ortsabweichung von 50 μm bereits einer Phasenverschiebung von 3° . Die Wellenlänge der Longitudinalwellen beträgt bei dieser Prüffrequenz im austenitischen Stahl etwa 6 mm. In der Praxis hat sich gezeigt, dass sich der Prüfkörper nicht perfekt parallel verschieben lässt und zusätzlich eine vom Messwinkel abhängige, perspektivische Verzerrung berücksichtigt werden muss. Um die an der ersten Position erfassten Messpunkte nach dem Verfahren des Prüfkörpers zuverlässig wiederzufinden, ist daher eine Korrektur nötig. Dazu vergleicht eine Regelfunktion die Lage der zu einem festen Zeitpunkt nach der Anregung gemessenen Maxima vor und nach dem Verfahren des Prüfkörpers. Werden die Maxima nach der Positionsänderung an einem falschen Ort auf der Probe dargestellt, so wird diese Abweichung in der Ausrichtung des Lasers berücksichtigt und entsprechend korrigiert [3].

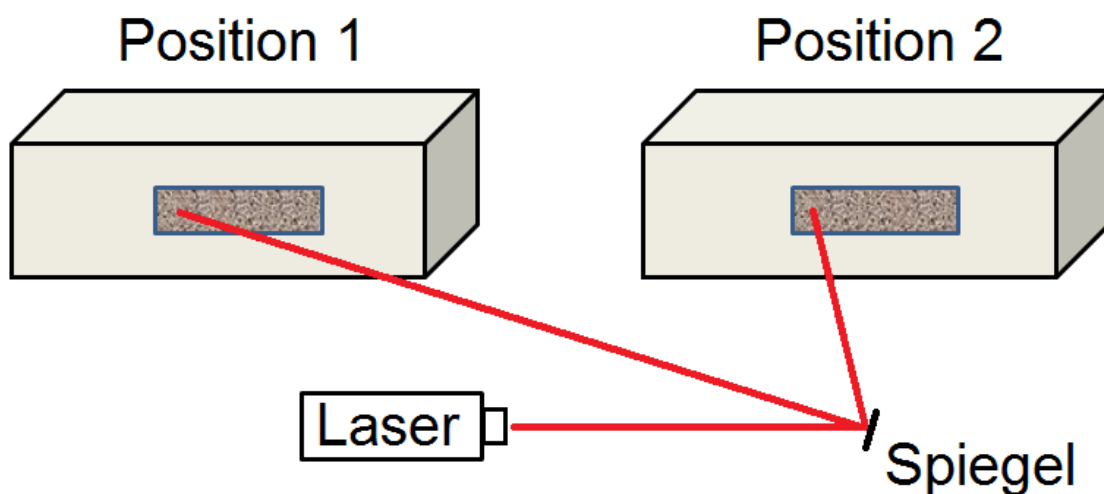


Abb. 4. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Die Messpunkte des Scanbereiches (grau) werden unter zwei verschiedenen Winkeln von einem Laservibrometers abgetastet. Die Positionierung des Prüfkörpers erfolgt über einen Manipulator, die des Messpunktes über einen drehbaren Spiegel.

2.2 Ergebnisse

Abbildung 5 zeigt die gemessenen Schnellekomponenten der Longitudinal- und Transversalwellen für einen einfachen Prüfaufbau mit einem rein isotropen Werkstoff. Die beiden Komponenten der Longitudinalwellen schwingen in Phase, während es bei der Transversalwelle zu einem Phasenversatz zwischen den Bewegungen entlang der Oberfläche bzw. senkrecht dazu kommt. Im Idealfall beträgt der Betrag der Phasenverschiebung exakt π , da die Ausbreitungsrichtung dieses Wellentyps senkrecht auf der Bewegungsrichtung der

Teilchen steht. Der in den Messdaten auftretende, geringfügige Phasenversatz lässt sich auf die technisch nicht vermeidbare Restungenauigkeit der Positionierung sowie Einflüsse des Rauschens zurückführen.

2.3 Bestimmung der Schweißnahtparameter

Das mit dem Laservibrometer erfasste Schallfeld wird mit Simulationsdaten verglichen, die mittels Raytracing berechnet wurden. In einem iterativen Prozess werden die Parameter der Schweißnaht angepasst, bis die Abweichung zwischen Messung und Simulation minimal ist. Die so bestimmten Parameter fließen in die SAFT-Auswertung der Schweißnahtprüfung ein.

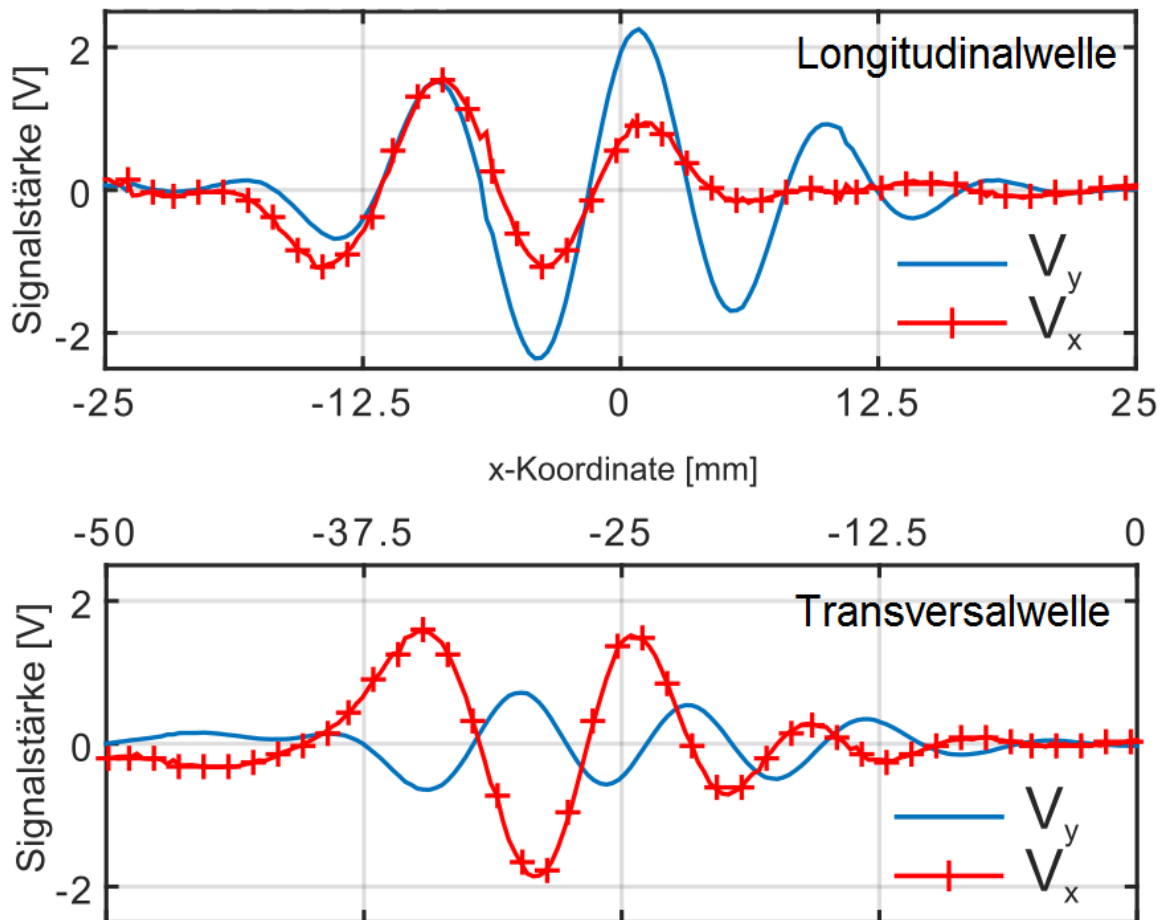


Abb. 5. Gemessene Schnellekomponenten entlang einer Linie zu einem festen Zeitpunkt nach der Anregung. Bei den Longitudinalwellen (oben) schwingen beide Komponenten in Phase. Bei den Transversalwellen (unten) tritt eine Phasenverschiebung von π auf.

3. Prüfung von austenitischen Schweißverbindungen an Rohren

Der Schwerpunkt des hier vorgestellten Projektteils liegt in der Auffindung von Querfehlern in austenitischen Rundnähten und Mischnähten mittels Ultraschall. Die verwendete Prüfanordnung ist in Abbildung 6 dargestellt. Sender und Empfänger müssen links und rechts neben der Schweißnaht platziert werden, da eine gleichmäßige Einkopplung des Schalls nur an glatten Oberflächen gewährleistet ist und reale Schweißnähte in der Regel unbeschliffen sind. Die Ankopplung der Sensoren erfolgt über Keile aus Acrylglas, die der Krümmung des zu prüfenden Rohres angepasst sind, und Wasser als Koppelmittel. In unserer Anordnung wurde das Rohrstück unter der fixierten Sende- und Empfangskombination hinweggedreht,

so dass der vollständige Rohrumfang untersucht werden konnte. (Für die Prüfung fester Rohre müsste die Anordnung entsprechend modifiziert werden.) Das vom Sender abgeschaltete Signal (Mittelfrequenz 2,25 MHz) wurde von den in die Schweißnaht eingebrachten Testfehlern reflektiert und am Sender nach der entsprechenden Laufzeit registriert. Insgesamt wurden 3600 Messpositionen angesteuert, was einer Verfahrstrecke von 0,235 mm zwischen den einzelnen Positionen und damit etwa 10% der auftretenden Longitudinalwellenlänge entspricht. Der so entstandene Datensatz wurde mit dem SAFT-Verfahren ausgewertet, wobei hier die Zylindersymmetrie berücksichtigt werden musste. Da die Entwicklung des inversen Verfahrens noch nicht abgeschlossen ist, wurden die Schweißnahtparameter dem Schliffbild aus Abb. 1 entnommen. Abbildung 7 zeigt die Signalstärke in der Rekonstruktionsebene, die den Rohrquerschnitt innerhalb der Schweißnaht abbildet.

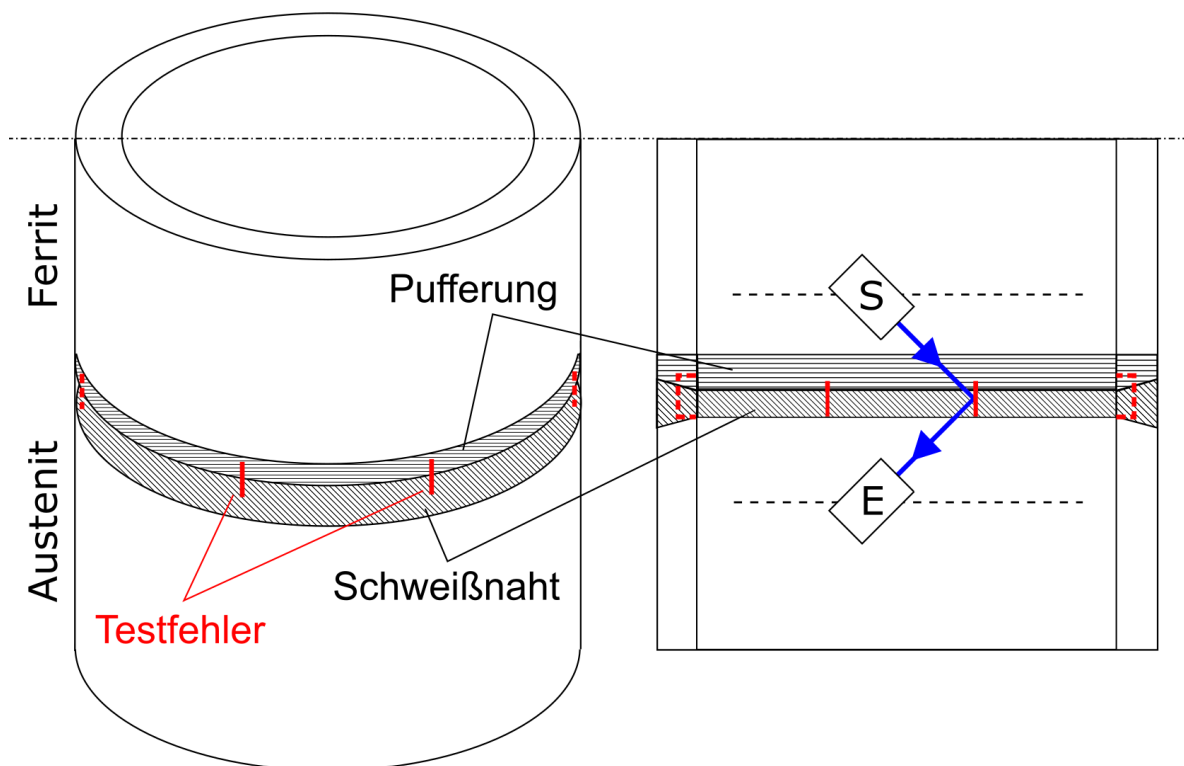


Abb. 6. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Ultraschallsender (S) und -empfänger (E) werden neben der Schweißnaht positioniert und V-förmig ausgerichtet. Nach jeder Teilmessung wird das Rohr gedreht, d.h. Sender und Empfänger verfahren parallel zur Schweißnaht, um den gesamten Rohrumfang abzubilden.

Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben uns mit der Ultraschallprüfung austenitischer Mischnähte an Rohren befasst und dabei besonderes Augenmerk auf die korrekte Darstellung von Testfehlern gelegt. Hierfür kam eine SAFT-Rekonstruktion zum Einsatz, die auf eine genaue Kenntnis der Schweißnahtparameter angewiesen ist. Diese Parameter wurden einem Schliffbild entnommen, sollen in Zukunft aber über ein zerstörungsfreies, inverses Verfahren ermittelt werden, bei dem die Schweißnaht durchschallt und die Schnelleverteilung an der Oberfläche abgetastet wird. Wir konnten zeigen, dass dieses Verfahren messtechnisch möglich ist und skizzierten einen iterativen Raytracing-Algorithmus, der aus den gewonnenen Messdaten die gesuchten Schweißnahtparameter rekonstruiert.

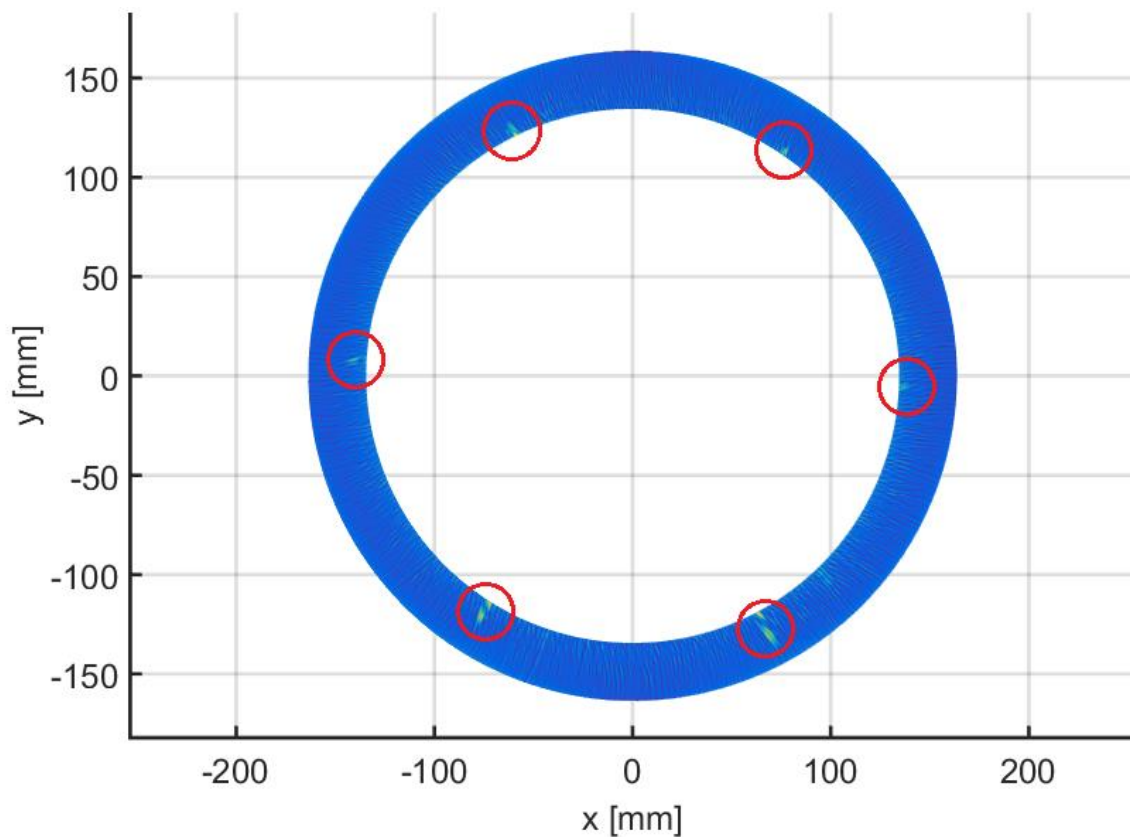


Abb. 7. SAFT-Rekonstruktion in der Schweißnaht-Ebene. Die sechs Testfehler (Nuten) wurden gefunden und entsprechend ihrer Tiefe richtig abgebildet.

Danksagung

Wir danken unseren Projektpartnern der MPA Stuttgart und des IZFP Saarbrücken für die Zusammenarbeit, sowie der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit für die Finanzierung dieses Vorhabens mit der Nummer 1501480.

Referenzen

- [1] J.A. Ogilvy. „Computerized ultrasonic ray tracing in austenitic steel“. NDT International, 18 (2), 1985.
- [2] C. Höhne, S. Kolkoori, M.-U. Rahman, R. Boehm, J. Prager. „SAFT imaging of transverse cracks in austenitic and dissimilar welds“. Journal of Nondestructive Evaluation, 32, 2012.
- [3] E. Barth, P.T. Homann, J. Prager. „Einpunkt-Laser-Doppler-Vibrometer für die mehrdimensionale Analyse des Schwingungsverhaltens auf Festkörperoberflächen im MHz-Bereich“. 43. Jahrestagung für Akustik, Kiel, 2017.