

SAFT- und TOFD-Auswertung für die Ultraschall-Schweißnahtprüfung von längsnahtgeschweißten Großrohren

Hans RIEDER*, Alexander DILLHÖFER*, Martin SPIES*,
Alfred GRAFF**, Thomas ORTH**, Thomas KERSTING***

*Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Fraunhofer-Platz 1,
67663 Kaiserslautern, Tel. +49-631-316004276, Email Hans.Rieder@itwm.fraunhofer.de

**Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Ehingerstrasse 200, 47259 Duisburg

*** Europipe GmbH – Werk Mülheim, 45473 Mülheim an der Ruhr

Kurzfassung. In diesem Beitrag stellen wir ein mobiles Multikanalprüfsystem für die Prüfung von Schweißnähten an Großrohren vor mit dem Ziel einer Fehlergrößenbestimmung. Der Prototyp wurde für den Vor-Ort-Einsatz zur Schweißnaht-Prüfung mit Transversal- und Longitudinalwellen in Winkeleinschallung von beiden Seiten im kombinierten SE- und IE-Betrieb ausgelegt. Die Rekonstruktions- und Darstellungssoftware erlaubt die SAFT-Berechnung für die jeweilige Oberflächenkrümmung und die Überlagerung der SAFT-Rekonstruktionen von beiden Seiten in eine Gesamtdarstellung der Schweißnaht. Dazu gehört auch die Überlagerung der TOFD-Prüfdaten anhand eines geeigneten Aus- und Bewertungskonzepts. Details hierzu werden ebenso präsentiert wie Prüferergebnisse an Testkörpern zur Validierung und an Schweißnähten längsnahtgeschweißter Großrohre.

1. Einführung

Für die Ultraschallprüfung von Schweißnähten wird das TOFD-Verfahren (Time-of-Flight Diffraction) seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt. Dabei kann die Empfindlichkeitszone im Hinblick auf die jeweilige Bauteildicke durch Variation von Einschallwinkel und Prüfkopfstand in einer V-Durchschallung an die gewünschte Tiefenlage angepasst werden. Die Anwendung der Synthetischen Apertur Fokus Technik (SAFT) liefert darüber hinaus zusätzliche Informationen, die insbesondere beim Auftreten von für die TOFD-Auswertung ungünstigen Fehlerorientierungen ausgenutzt werden können. Beide Verfahren haben sich als effektive Auswerte- und Analyseverfahren im Bereich der Ultraschall-ZfP durchgesetzt. Auf eine nähere Beschreibung verzichten wir aus Platzgründen in diesem Beitrag und verweisen beispielsweise auf [1-4] sowie die entsprechenden weiteren Beiträge in diesem Berichtsband.

In diesem Beitrag stellen wir ein mobiles Zwei- oder Vierkanalprüfsystem für die Prüfung von Schweißnähten an Großrohren vor mit dem Ziel einer Fehlergrößenbestimmung. Der Prototyp wurde für den Vor-Ort-Einsatz zur Schweißnaht-Prüfung mit Transversal- und Longitudinalwellen in Winkeleinschallung von beiden Seiten im kombinierten SE- und IE-Betrieb sowie in Senkrechteinschallung ausgelegt. Die Rekonstruktions- und Darstellungssoftware erlaubt die SAFT-Berechnung für die jeweilige Oberflächenkrümmung und die Überlagerung der SAFT-Rekonstruktionen von beiden Seiten in eine Gesamtdarstellung der Schweißnaht. Dazu gehört auch die Überlagerung der

TOFD-Prüfdaten anhand eines geeigneten Aus- und Bewertungskonzepts. Details hierzu werden ebenso präsentiert wie Prüferergebnisse an Testkörpern zur Validierung und an Schweißnähten längsnahtgeschweißter Großrohre. Das im Prototypen eingesetzte Prüfsystem USIS wird in einem begleitenden Postervortrag vorgestellt [5].

2. Zielsetzung

Ziel des Gemeinschaftsprojektes war die Entwicklung und Validierung eines effizienten Prüfsystems für den Vor-Ort-Einsatz im Produktionsbetrieb. Die Prüfmodi basieren auf der Winkeleinschallung von Longitudinal- und Transversalwellen von beiden Seiten der Schweißnaht im kombinierten SE- und IE-Betrieb. Besondere Herausforderungen stellten die Berücksichtigung der gekrümmten Oberflächen sowie die Kombination der SAFT- und TOFD-Daten dar. Der Integration von SAFT wurde insbesondere im Hinblick auf die Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses (Signal-to-Noise Ratio, SNR) für Risspitzen-Signale und den damit verbundenen Möglichkeiten einer Risslängenbestimmung (Sizing) durchgeführt.

3. Details zum Prüfsystem

Das Prüfsystem wurde als erweiterbare Hardware-Plattform ausgelegt und besteht aus einer 2-Kanal-Ultraschall-Frontendeinheit, einer Datenerfassungseinheit und einer Steuereinheit für die Manipulationsmodule. Herzstück der Datenerfassungseinheit ist ein am Markt verfügbares PCI-basiertes AD-Wandler-Modul mit hoher Taktrate bei 12 Bit Auflösung. Die positionsgesteuerte Datenaufnahme wird durch eine intelligente Motorsteuereinheit realisiert. Die Auftrennung in Frontend- und Backendeinheit ermöglicht die Erweiterung und die weitere Miniaturisierung des Gesamtsystems für Vor-Ort-Einsätze.

3.1 Module des Standard-Prüfsystems

In der Basisversion besteht das Prüfsystem aus einer Zweikanal-Ultraschall-Elektronik, einem Standard-Datenaufnahme-Modul, einer intelligenten Scanner-Steuerung, einem 3-Achsen-Manipulator mit anpassbarer Prüfkopfhalterung und einem Industrie-Computer. Ergänzt wird das System durch derzeit vier unabhängige MFC-basierte Windows-Applikationen (MFC: Microsoft Foundation Classes) mit Client/Server-Architektur für die Prüfung, die Rekonstruktion, die Visualisierung und die Steuerung der Manipulations-einheit. Durch einen polymorphen Implementierungsansatz in Bezug auf die eingesetzten Gerätemodule kann das System leicht erweitert und angepasst werden. Eine offene Schnittstellenstruktur ermöglicht mittels Windows-Standardmodulen (*.cnf, *.lib. und *.dll) eine weitergehende Signal- und Datenverarbeitung.

MMC-USIS-DAQ ist eine Applikations-Software für die positionsgesteuerte Ultraschallprüfung in Multikanaltechnik für die Parametrierung, Scanner-Kontrolle und Durchführung der automatisierten Prüfung und für die On-Line-Visualisierung während der Prüfung in Form von A-, B- und C-Bildern sowie die Datenspeicherung. Das Verhalten der Abläufe von Datenaufnahme, Manipulationskontrolle, Datenspeicherung und Visualisierung ist prioritätsgesteuert.

MMC-USIS-SAFT ist eine Applikations-Software für die SAFT-Rekonstruktion und die Darstellung von TOFD-Ergebnissen. Das Programm berechnet 2D- und 3D-SAFT-Rekonstruktionen an ebenen und gekrümmten Flächen und bietet als Besonderheit die Möglichkeit der Überlagerung verschiedener Prüftechniken (Einschallwinkel) in direkter Einschallung und über den Sprung. Die Oberflächenkrümmung kann bei Bedarf auch mess-

technisch durch Einsatz eines Enkoders an der z-Achse oder mittels eines externen Luftschallmoduls [6] ermittelt werden.

MMC-USIS-3D ist eine Applikations-Software für die Off-line-2D- und 3D-Visualisierung und liefert auch die standardisierten Darstellungen in Form von A-, B- und C-Bildern. Mittels einer Recorder-Funktionalität können die Messsignale der Prüfung nach Ablauf der Datenaufnahme im Detail visualisiert werden. Ein freier Datenimport ermöglicht darüber hinaus auch die Darstellung von Schallfeldern oder die Visualisierung von 3D-Phased-Array-Daten.

MMC-Servo ist eine Applikations-Software für die Bedienung der Manipulationseinheit. Durch den polymorphen Ansatz ist dieses Programm ebenfalls in der Lage, verschiedene Manipulationseinheiten zu bedienen. Derzeit werden Hardwaremodule eines namhaften Schweizer Herstellers gesteuert.

Die Vorteile des gewählten Systementwurfs liegen in dem polymorphen Hardware-Ansatz, dem modularen Aufbau und der Implementierung als offenes System. Damit erhält der Kunde den Zugang zu allen Schnittstellen und die Möglichkeit weitere, eigene Entwicklungen einzusetzen. Darüber hinaus kann die Ultraschall-Elektronik durch andere, geeignete Module ersetzt werden. Das Prüfsystem ist für den Laboreinsatz und für Vor-Ort-Anwendungen geeignet. Jede der vier Software-Applikationen kann unabhängig verwendet werden. Die Systempflege und der Support werden durch das Fraunhofer ITWM garantiert (das ITWM setzt ein ähnliches System für die mechanisierte Ultraschallprüfung an Schiffspropellern ein [7]). Damit ist auch der Zugang zu weiteren Entwicklungen des Fraunhofer ITWM inklusive der Unterstützung zu den theoretischen Hintergründen eingeschlossen. Weitere Details zu MMC-USIS sind in [5] zu finden.

3.2 Besonderheiten des SZMF-Systems

Die Besonderheiten des Systems für die Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF) bestehen in der Kombination von insgesamt drei Prüftechniken - zwei Winkeleinschaltungen (+IE und -IE) und einem Pitch-Catch-Modus (ähnlich der TOFD-Applikation) - unter Berücksichtigung der Rohrgeometrie und der Überlagerung der Ergebnisse der SAFT-Rekonstruktion inklusive der TOFD-Bewertung. Die Rekonstruktion erfolgt auch unter Berücksichtigung der Echo-Skips (halber/ganzer Sprung) und verfolgt das Ziel der Rekonstruktion der Fehlergeometrie im Schweißnahtbereich. Das Prüfsystem befindet sich derzeit in der Evaluationsphase.

3.3 Module des SAFT-Systems

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 aufgezzeichneten, 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 vorhandenen Rauschteile durch destruktive Überlagerung vermindert werden. Sowohl der nominelle Einschallwinkel, der Öffnungswinkel, der Schallaustrittspunkt und der exakte Prüfkopfabstand, als auch die Größe der Voxel/Pixel steuern die erzielbare Genauigkeit der SAFT-Rekonstruktion.

Zur Optimierung der Leistungsfähigkeit der SAFT-Rekonstruktion verwenden wir

- die Akquisition und Digitalisierung der Hochfrequenz A-Scans mittels Linien-Scan (in 2D) sowie Mäander-/Kammfahrt in 3D,

- die virtuelle Erweiterung der Prüfkopf-Apertur durch äquidistantes Scannen mit niedrigem Rasterabstand,
- die Auswahl kleiner Volumenelemente (Voxel) zur Erhöhung der Auflösung,
- und die Auswahl von Ultraschallsensoren mit einem kleinen Prüfkopfdurchmesser für eine bessere laterale Auflösung, und einen möglichst großen Schallbündelöffnungswinkel zur Erzielung eines besseren SNR-Wertes.

4. Ausgewählte Ergebnisse an Testkörpern

Eine Vielzahl von Untersuchungen wurde in den Laboren des Fraunhofer ITWM und des SZMF zur Verifikation des Prüfsystems und der Fähigkeiten der Rekonstruktionsalgorithmen SAFT und TOFD durchgeführt. Eine erste Kalibrierung erfolgte an Querbohrungen verschiedener Durchmesser an ebenen Stahlplatten ohne und mit Berücksichtigung des Sprungs an der Rückwand. Die Durchmesser der Querbohrungen konnten mittels Kombination der einzelnen SAFT-Ergebnisse sehr gut dargestellt werden. In den Abbildungen 1 bis 4 sind die SAFT-Ergebnisse der beiden IE-Prüfungen (Abb. 1 und 2), die Ergebnisse der SAFT-Rekonstruktion der V-Durchschallung (Abb. 3) und deren Kombination (Abb. 4) dargestellt. Abbildung 5 zeigt die Benutzerführung (GUI) für die in Abb. 4 gezeigte Kombination der SAFT-Einzelergebnisse. Eine übliche TOFD-Darstellung der Beugungsmuster der Querbohrungen ist in Abbildung 6 dargestellt.

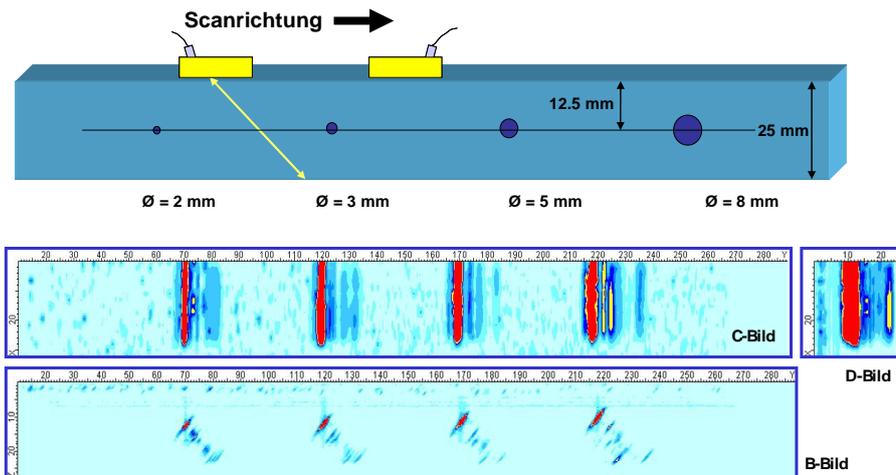


Abb. 1 SAFT-Rekonstruktion der Prüftechnik IE 45° plus.

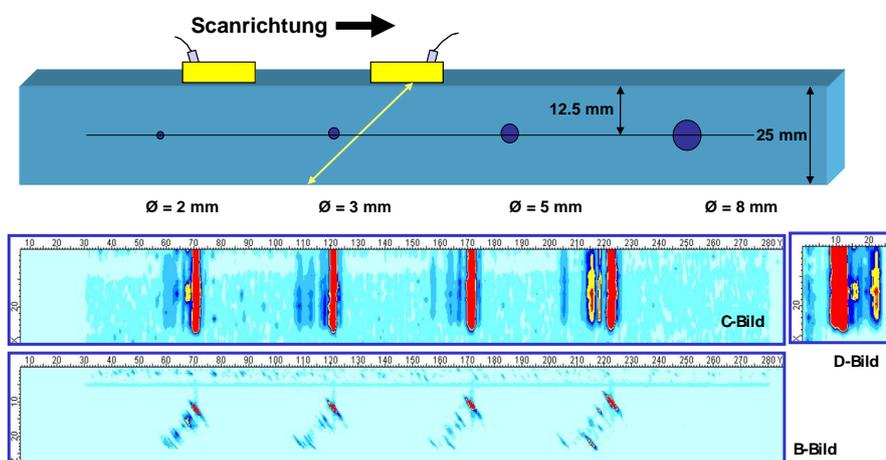


Abb. 2 SAFT-Rekonstruktion der Prüftechnik IE 45° minus.

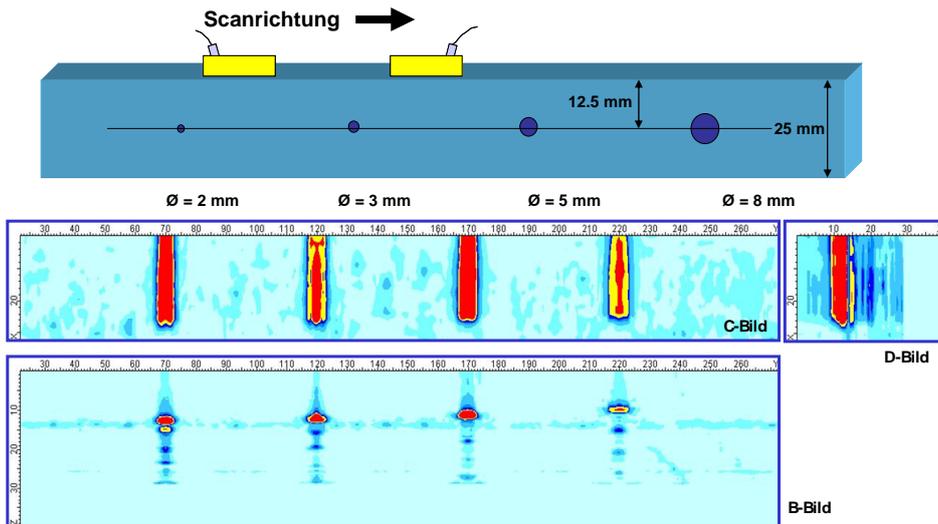


Abb. 3 SAFT-Rekonstruktion der Prüftechnik V-Durchschallung (TOFD).

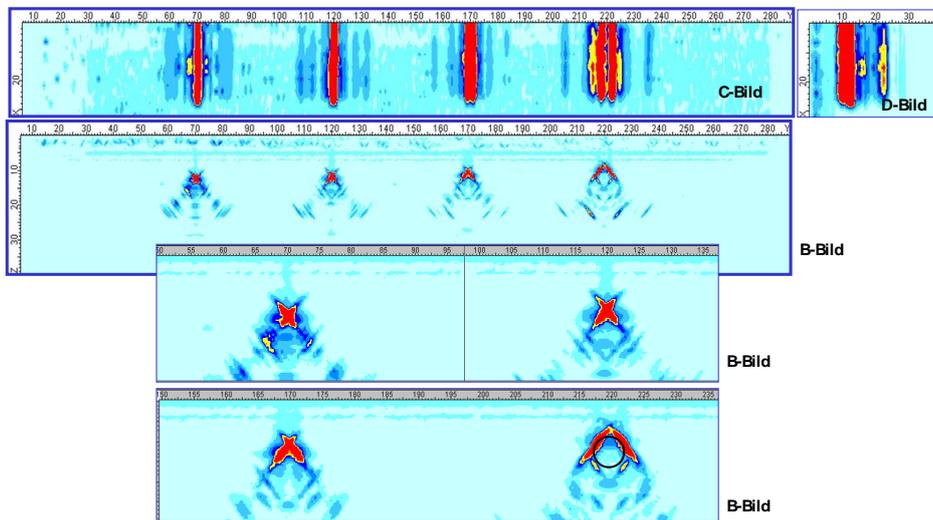


Abb. 4 Kombination der SAFT-Rekonstruktionen der IE-Prüftechniken und Darstellung der Fehlerrandabtastung.

Summation der IE +45°, IE -45° und PC

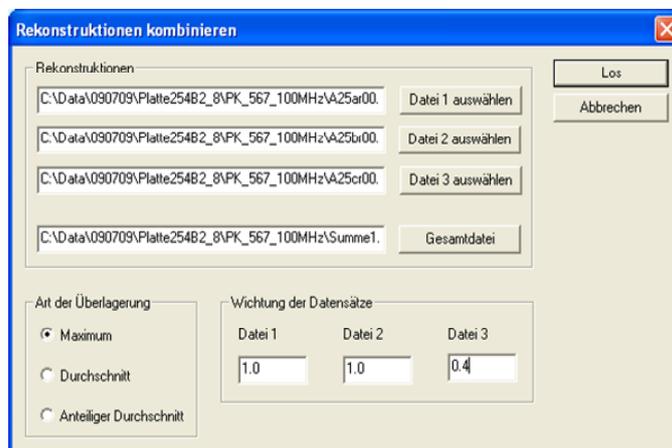


Abb. 5 Benutzerschnittstelle (GUI) für die Kombination der SAFT-Rekonstruktionen.

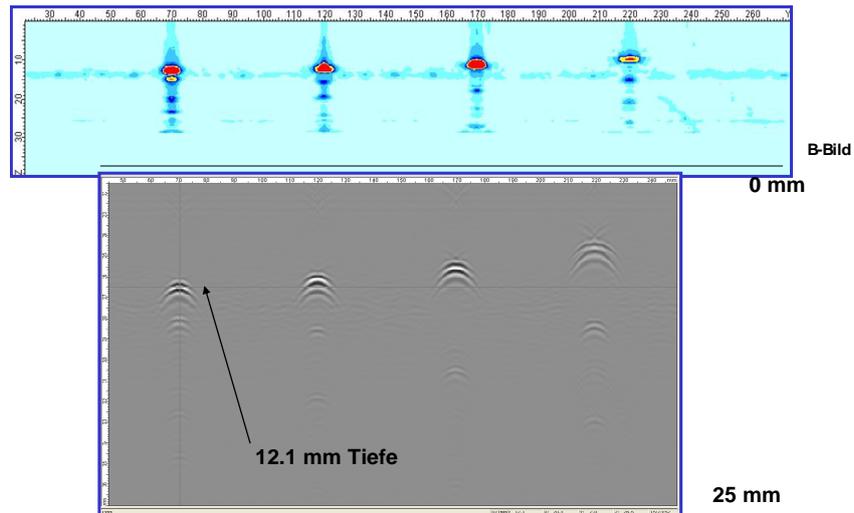


Abb. 6 TOFD-Darstellung mit der üblichen Darstellung der Beugungssignale.

Im nächsten Schritt wurde das Prüfsystem an die Gegebenheiten der Rohrgeometrie angepasst und hinsichtlich der Prüfaussagen erfolgreich im Labor und vor Ort in der Produktion getestet.

5. Vor-Ort-Ergebnisse an Großrohren

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen exemplarisch den Aufbau des Prüfsystems vor Ort bei der Schweißnahtprüfung an Großrohren bei Europipe. In Abbildung 7, links ist die Position der Manipulationseinrichtung auf dem Großrohr dargestellt. Davor befinden sich das Prüfsystem, die Manipulatorsteuerung und das Wasserankoppelsystem. In Abbildung 7, rechts wird das Prüfkopfsystem inklusive Halterung gezeigt.



Abb. 7 Halb-automatische SAFT-Prüfung von Schweißnähten an Großrohren.

Die Abbildung 8 zeigt exemplarisch ein Ergebnis der Kombination der SAFT-Rekonstruktion der beiden IE-Prüftechniken an einem Abschnitt der Schweißnaht; gezeigt wird die Überlagerung der beiden Prüftechniken ohne Berücksichtigung des Sprungs an der gekrümmten Rohroberfläche.

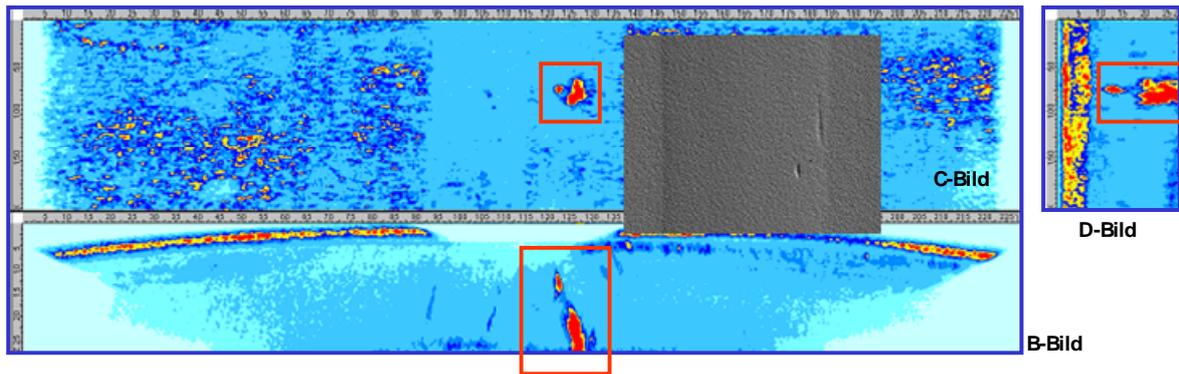


Abb. 8 Kombination der SAFT-Rekonstruktionen eines Schlackeneinschlusses. Die Fehleranzeigen sind in den roten Kästchen zu sehen; zum Vergleich ist das Durchstrahlungsbild gezeigt (nicht maßstäblich).

6. Zusammenfassung

Für die Prüfung von Großrohren bei Europipe wurde für das SZMF ein mobiles Multi-kanalprüfsystem aufgebaut, welches die Fehlergrößenbestimmung von Schweißnahtfehlern zum Ziel hat. Das Prüfsystem wurde für den Vor-Ort-Einsatz zur Schweißnaht-Prüfung mit Transversal- und Longitudinalwellen in Winkeleinschallung von beiden Seiten im kombinierten SE- und IE-Betrieb sowie in Senkrechteinschallung ausgelegt. Die Rekonstruktions- und Darstellungssoftware erlaubt die SAFT-Berechnung für die jeweilige Oberflächenkrümmung und die Überlagerung der SAFT-Rekonstruktionen von beiden Seiten in eine Gesamtdarstellung der Schweißnaht. Dazu gehört auch die Überlagerung der TOFD-Prüfdaten anhand eines geeigneten Aus- und Bewertungskonzepts. Die bisher gewonnenen Erfahrungen zeigen, dass das Prüfsystem mit den vorliegenden technischen Komponenten robust arbeitet und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Bei der Interpretation der verschiedenen Fehlersituationen besteht in Bezug auf die SAFT-Rekonstruktion in Kombination mit einer standardisierten TOFD-Bewertung noch Entwicklungsbedarf. Diese Arbeiten werden derzeit weitergeführt. Außerdem werden ergänzende Methoden für eine geeignete Fehlerkalibrierung im Sinne der bildgebenden Fehlerrekonstruktion erarbeitet.

Referenzen

- [1] S.R. Doctor, G.J. Schuster, L.D. Reid, T.E. Hall. Real-Time 3-D SAFT UT System Evaluation and Validation. NUREG/CR-6344 PNNL-10571, Report Pacific Northwest National Laboratory, USA (1996)
- [2] V. Schmitz. Nondestructive Acoustic Imaging Techniques. In: Fink et al. (Eds.): Imaging of Complex Media with Acoustic and Seismic Waves, Topics Appl. Phys. 84, 167–190 (2002), Springer, Berlin
- [3] S.J. de Geus, F.H. Dijkstra, T. Bouma. Advances in TOFD Inspection. In: Proceedings of the 15th World Conference on NDT, Rome, Italy (2000) (<http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn073/idn073.htm>)
- [4] S. Lin, H. Fukutomi, T. Ogata. Analysis of Wave Propagation for the TOFD Method by Finite Element Method: Optimization of Test Configuration and Proposal of a New TOFD Method. Review of Progress in Quantitative NDE (2005), Vol. 25, Melville, New York, (AIP Conference Proceedings CP820), 103-110
- [5] H. Rieder, A. Dillhöfer, M. Spies. MMC-USIS - Entwicklung eines kompakten LAN-basierten Prüf-systems für die automatisierte Ultraschallprüfung, SAFT-Bewertung und 3D-Visualisierung. In diesem Berichtsband, P46
- [6] A. Dillhöfer, H. Rieder, M. Spies. Roboterbasierte Detektion von Oberflächenstrukturen in komplexen Freiformflächen mittels Luftultraschall und Methoden der Bildverarbeitung. DGZfP Berichtsband 115-CD DGZfP Jahrestagung (2009), P45
- [7] H. Rieder et al. Schweißen und Prüfen statt Verschrotten – Zerstörungsfreie sicherheitstechnische Bewertung der Reparatur eines 100 Tonnen schweren Schiffspropellers. In diesem Berichtsband, P67