

SAFT und TOFD – Ein Vergleich im Analyseverhalten von Reflektoren

J. KITZE*, D. BRACKROCK*, G. BREKOW*, J. PRAGER*, M. GAAL*,
M. KREUTZBRUCK*, D. SZABO**, K. KUTI**, G. PACZOLAY**

* Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Berlin, Fachgruppe VIII.4,
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, ** Paks Nuclear Power Plant, H - 7031, Paks, POB 71

Kurzfassung. Mit der Gruppenstrahlertechnik der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung sind umfangreiche Untersuchungen an einer plattierten Druckbehälter-Testwand durchgeführt worden. In der vorliegenden Testwand mit einer Wanddicke von 149 mm befinden sich künstliche Testreflektoren im Schweißnaht- und Plattierungsbereich, die mit Gruppenstrahler-Prüfköpfen mit unterschiedlichen Frequenzen, Einschallwinkeln und Einschallrichtungen nachgewiesen und in ihrem Anzeigenverhalten analysiert wurden.

Zur Rekonstruktion der Reflektoranzeigen wurde ein SAFT - Algorithmus verwendet, der die Variation der Einschallwinkel berücksichtigt. Zum Vergleich sind die Reflektoren auch mit der TOFD - Technik analysiert worden. Ziel der Untersuchungen war der direkte Vergleich der Eignung der SAFT- und TOFD-Technik zur quantitativen Reflektorgrößenbestimmung.

Einführung

Der derzeitige Stand der Technik stellt immer neue und vor allem höhere Anforderungen an die Qualität von Bauteilen und Materialien. Insbesondere der zerstörungsfreie Nachweis und die quantitative Bewertung von Fehlern spielen dabei eine wesentliche Rolle. Die Kenntnisse über Existenz und insbesondere über Abmessungen von Fehlstellen im Material sind für die Sicherheit und die Bestimmung des Gefährdungspotentials von hochbelasteten Bauteilen unbedingt erforderlich. Vor allem in kerntechnischen Anlagen ist das Auffinden und Bewerten von Fehlstellen in sicherheitsrelevanten Komponenten von entscheidender Bedeutung[1].

Die zerstörungsfreie Prüfung mit Ultraschall bietet Lösungsansätze, die es ermöglichen, Schäden schon im Anfangsstadium zu erkennen und quantitativ zu bewerten [2]. Aus den Ultraschallmessungen an fehlerbehafteten Bauteilen erhält man zur weiteren Auswertung Echoamplitude, Phasenlage und Echolaufzeit eines registrierten Reflektors. Wurde also eine Anzeige als Fehler im Material identifiziert, müssen anhand dieser Parameter genaue Angaben über Form, Typ und Größe getroffen werden. Dabei ist der Einfluss verschiedenster Parameter so groß, dass diese Ergebnisse bestenfalls eine grobe Abschätzung ergeben. Mit konventionellen Methoden wie der AVG- oder der Vergleichskörpermethode können lediglich vergleichende Aussagen über das Reflexionsverhalten von Reflektoren getroffen. Damit können weder Geometrie noch Orientierung einer Fehlstelle bestimmt werden. Weist das Reflexionsverhalten des Reflektors darüber hinaus einen hohen Grad an Streuung auf oder ist seine Orientierung ungünstig, können Fehlstellen in ihrer Größe nicht zutreffend bewertet werden. Infolgedessen wurden bildgebende Verfahren wie SAFT und TOFD zur Fehlerdetektion und -größenbestimmung entwickelt.

1. Prinzip SAFT

Bei der SAFT - Analyse handelt es sich um eine laufzeitbezogene Messmethode mit anschließender Rekonstruktion. Die Rekonstruktion mit der „Synthetischen Apertur Fokussierungs Technik“ beruht darauf, dass das von den Ultraschallwellen während des Abtastvorganges erfasste Volumen in ein Pixelraster unterteilt wird, in dem die Echosignale laufzeit- und winkelabhängig eingeordnet werden.

Voraussetzung für die Rekonstruktion sind hochfrequente, digitalisierte Ultraschalldaten aus einem möglichst großen Winkelbereich des Prüfstückes. Das Prüfstück wird dementsprechend mit einem möglichst großen Divergenzwinkel mäander- oder linienförmig abgetastet. Eine große Divergenz lässt sich zum einen durch einen konventionellen Prüfkopf mit kleiner Schwingerfläche, zum anderen durch Gruppenstrahlerprüfköpfe mit geschwenktem Schallbündel realisieren.

Im SAFT - Algorithmus wird das in der Einschallebene liegende Prüfvolumen in einzelne Volumenelemente bzw. Pixel unterteilt und diese nacheinander als Reflektorort betrachtet. Bei der rechnerischen Überlagerung der laufzeitabhängigen Echos werden die Phasenlagen berücksichtigt und aufgrund von konstruktiver Interferenz bekommt man nur für wirkliche Reflexionsorte ein großes resultierendes Echo. Für alle anderen Pixel ergibt die Überlagerung aufgrund destruktiver Interferenz keine oder nur kleine resultierende Echos. Jedem Pixel werden letztlich Amplitudenwerte zugeordnet, aus denen das Bild rekonstruiert wird. Das SAFT - Prinzip ist in **Bild 1** schematisch dargestellt.

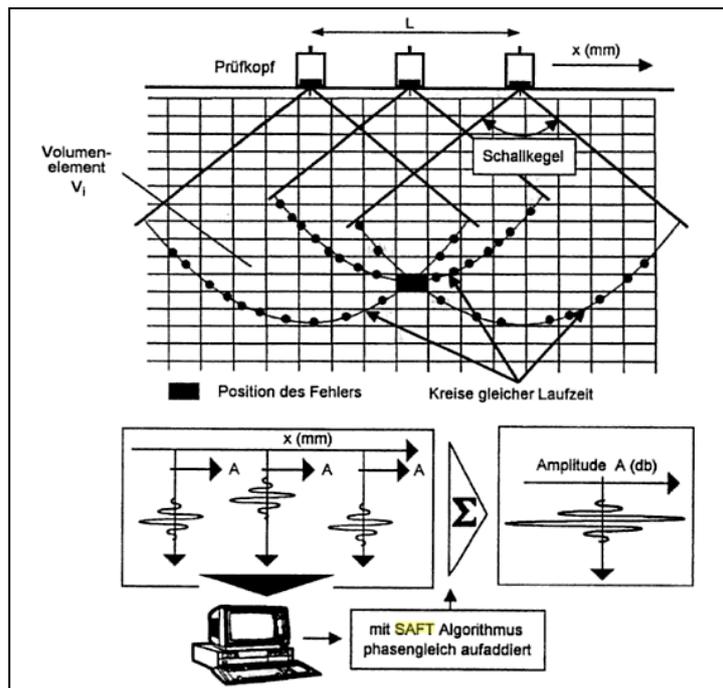


Bild 1: schematisches Prinzip der SAFT - Rekonstruktion

Durch Abtast- und Rechenvorgang wird hier ein Wandler mit einer für den Reflektorort geeigneten fokussierenden Linse simuliert, wobei die Wandlergröße der abgetasteten Fläche entspricht. Auf diese Weise werden Wandlerapertur und Linse durch den Abtastvorgang simuliert bzw. synthetisiert, daher die Bezeichnung „Synthetic Aperture Focusing Technique“. Durch die Signalmittelung können hohe Signal - Rausch - Verhältnisse erreicht werden, da sich Rauschsignale aufgrund ihrer statistisch regellosen Phasenlage teilweise aufheben. Eingeschränkt wird das Signal - Rausch - Verhältnis bei der Nutzung von kleinen, konventionellen Prüfköpfen mit großer Schallbündeldivergenz durch die Aufnahme einer hohen Anzahl an Streusignalen.

Um die Signal - Rausch - Abstände weiter zu erhöhen und das Auflösungsvermögen zu verbessern, können stattdessen Gruppenstrahlerprüfköpfe eingesetzt werden, deren Schwingerfläche nicht mehr klein sein muss, um eine hohe Schallbündeldivergenz zu erreichen. Sie ermöglichen einen Winkelschwenk, bei dem durch Überlagerung der verschiedenen Winkelfunktionen ein divergentes Schallfeld mit ausreichendem Schalldruck und einer ausreichend großen synthetischen Apertur erhalten wird [3], [4].

Bei den Ultraschalluntersuchungen mit anschließender SAFT - Rekonstruktion haben sich Longitudinalwellen in der Praxis bewährt. Prinzipiell eignen sich auch Transversalwellen für die Fehleranalyse mit SAFT, aber die Longitudinalwelle erweist sich bei der Fehlererkennung als vorteilhaft [5]. Ziel ist es, Winkelspiegel- und Beugungsecho zu erzeugen und daraus die Fehlergröße zu bestimmen.

2. Prinzip TOFD

Die Abkürzung TOFD - Technik (**T**ime of **f**light **d**iffraction technique) wird im deutschen Sprachgebrauch mit Laufzeit - Beugungs - Technik übersetzt. TOFD ist eine Ultraschallprüftechnik, bei der zwei Winkelprüfköpfe in V - Durchschallung angeordnet werden. Eine typische Prüfanordnung ist in **Bild 2** dargestellt.

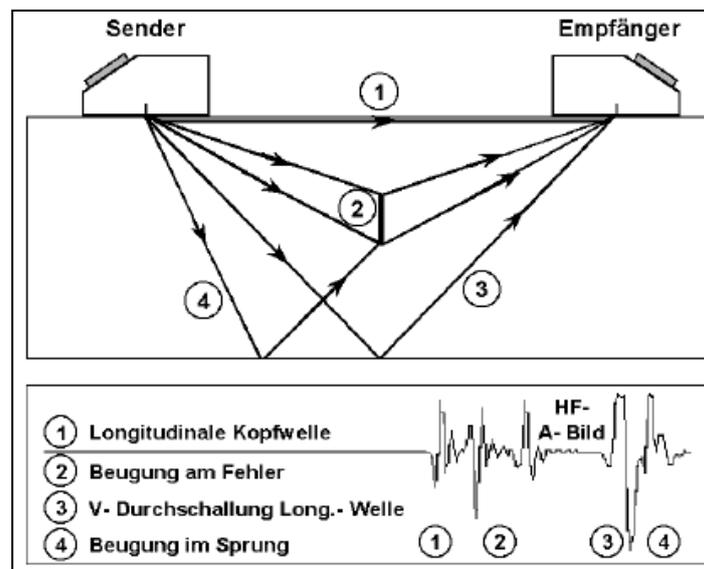


Bild 2: Prinzip TOFD - Technik mit Longitudinalwelle

Vom sendenden Prüfkopf breitet sich eine longitudinale Lateralwelle entlang der Oberfläche des Prüfstückes auf direktem Weg zum empfangenden Prüfkopf aus. Diese erscheint im TD - Bild als Anzeige mit der kürzesten Laufzeit. Eine weitere Echoanzeige entsteht durch Reflexion der sich im Prüfvolumen ausbreitenden Longitudinalwelle an der Rückwand (vgl. Bild 2). Die Laufzeiten dieser beiden Anzeigen bleiben konstant. Zwischen den Anzeigen liegen die fehlerbedingten Beugungsanzeigen. Aus den Laufzeiten der Beugungsechos kann die Tiefenlage der Reflektoren ermittelt werden. Können im TD - Bild die Anzeigen vom oberen und unteren Reflektorrand aufgelöst werden, so kann aus deren Laufzeitunterschied eine Fehlergrößenbestimmung vorgenommen werden. [6]

Ein charakteristisches Merkmal von TOFD ist, dass nicht die starke direkte Reflexion oder das Winkelspiegelecho eines Fehlers registriert werden, sondern schwache Beugungssignale, die durch Kirchhoff'sche Beugung an Fehlerrändern entstehen. Damit bietet TOFD nicht nur die Möglichkeit zum Fehlernachweis, sondern auch zur Fehlergrößenbestimmung.

Normalerweise kommen bei TOFD ebenfalls Longitudinalwellen zum Einsatz, da mit dieser aufgrund der kürzeren Laufzeit eine Identifikation von Anzeigen sicherer durchführbar ist, als mit der Transversalwelle. Zudem ist die Longitudinalwelle bei einem Reflektor unbekannter Orientierung weniger vom Auftreffwinkel abhängig. Gegenüber der Transversalwelle besteht ein günstigeres Verhältnis von Fehlergröße zu Wellenlänge bei gleicher Frequenz.

Bei der Prüfung stehen sich die Prüfköpfe in einem festen Abstand gegenüber und arbeiten im Sende - Empfangs - Betrieb. Der Prüfkopfabstand ist abhängig von der Wanddicke des Prüfstückes und wird so gewählt, dass sich die beiden Schallbündelachsen der zu erwartenden Fehlertiefe überschneiden. Die Darstellung der fehlerbedingten Beugungsanzeigen aus dem Prüfvolumen erfolgt in TD - Bildern (**T**ime - **D**isplacement - Bild). Dabei werden während der Messungen die A - Bilder von allen Prüfkopfpositionen in einer Messdatei gespeichert und bei der Auswertung aneinandergereiht.

3. Messungen

Für die Bestimmung der Möglichkeiten und Grenzen von SAFT und TOFD für die Fehlerortung und -größenbestimmung wurden umfangreiche Ultraschalluntersuchungen an einer plattierten Reaktordruckbehältertestwand (**Bild 3**) durchgeführt.

In der Testwand mit einer Wanddicke von 140 mm und einer Plattierungsdicke von 9 mm befinden sich künstliche Testreflektoren bekannter Größe und Lage im Schweißnaht- und Plattierungsbereich, die mittels Gruppenstrahlerprüfköpfen mit unterschiedlichen Frequenzen, Einschallwinkeln und Einschallrichtungen nachgewiesen und in ihrem Anzeigenverhalten analysiert wurden.



Bild 3 plattierte Druckbehältertestwand, Messaufbau (rechts)

Ziel der Untersuchungen war es, mit Hilfe der Ultraschallverfahren SAFT und TOFD diese Fehler zu detektieren und sofern möglich auch in der Größe zu bestimmen.

Die Messungen wurden manipulatorgesteuert (vgl. Bild 3 rechts) mit dem Gruppenstrahlergerät Compas XL [7] und integrierter SAFT - Software durchgeführt. Das Gerät und die Software wurden in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung entwickelt. Die Ultraschalluntersuchungen erfolgten zum einen mit einzelnen Gruppenstrahlerprüfköpfen in Impuls - Echo - Technik für die Weiterverarbeitung der Messdaten mit dem SAFT - Algorithmus, zum anderen mit jeweils zwei Gruppenstrahlerprüfköpfen in TOFD - Technik.

4. Ergebnisse

Um einen direkten Vergleich der Eignung von SAFT und TOFD zur quantitativen Reflektorgößenbestimmung machen zu können wurde untersucht, ob einzelne Reflektoren mit der jeweiligen Technik detektiert und in ihrer Größe quantitativ bestimmt werden können. Um sicherzustellen, dass die Testfehler in den verschiedenen Bereichen der Druckbehältertestwand optimal im Schallbündelbereich getroffen werden, wurden bei allen Messungen mehrere Spuren mäanderförmig gefahren.

Exemplarisch werden hier jeweils die Ergebnisse einer 8 mm tiefen Nut im Bereich der Plattierung und einer 5 mm großen Keramikscheibe an der Schweißnahtflanke ausgewertet.

4.1 Ergebnisse SAFT

Im Plattierungs- und Schweißnahtbereich wurden Ultraschallmessungen in Impuls - Echo - Technik mit einem 1.5 MHz - und einem 2.25 MHz - Gruppenstrahlerprüfkopf durchgeführt. Die Einschallung erfolgte mit 19° - Vorlaufkeilen für die Einschallung der Longitudinalwelle. Im Plattierungsbereich erfolgten die Messungen mit einem Schwenkwinkelbereich von 0° und 30 - 60° jeweils in horizontalen und vertikalen Spuren. Im Schweißnahtbereich wurde das Prüfvolumen mit einem Schwenkwinkelbereich von 0° und 30 - 55° ebenfalls horizontal und vertikal abgetastet. In **Bild 4** sind die gleichgerichteten SAFT -Rekonstruktionen der 8 mm tiefen Nut im Plattierungsbereich für die beiden Prüffrequenzen dargestellt.

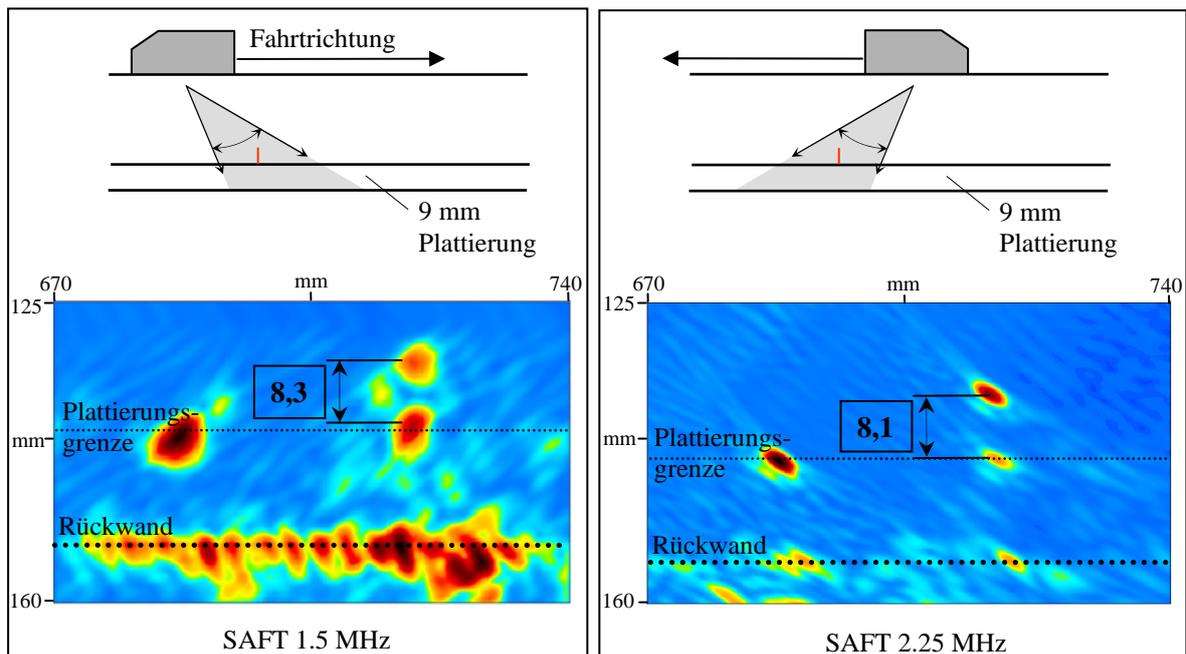


Bild 4 SAFT - Rekonstruktion: 8 mm tiefe Nut im Plattierungsbereich, schematischer Versuchsaufbau (oben)

Die Bilder zeigen, dass die Nut in ihrer Größe mit relativer Genauigkeit direkt aus der SAFT - Rekonstruktion anhand der beiden Anzeigen bestimmt werden kann. Zusätzlich zu dem Reflektor unter 720 mm sieht man links in der Rekonstruktion die Anzeige einer Querbohrung die auf Höhe der Plattierungsgrenze bei 690 mm eingebracht wurde.

In den Bildern ist der Einfluss der Frequenz auf das Auflösungsvermögen deutlich zu erkennen. Sowohl axiales und laterales Auflösungsvermögen steigen mit Erhöhung der Prüffrequenz. Demzufolge ist mit 2.25 MHz die Fehlergrößenbestimmung etwas genauer.

Der Schweißnahtbereich wurde zunächst mit Einschallwinkeln von $30^\circ - 55^\circ$ horizontal über mehrere Spuren abgescannert, um einen Gesamtüberblick über die enthaltenen Fehler zu gewinnen. In **Bild 5** ist die SAFT - Rekonstruktion des gesamten Schweißnahtbereiches und der schematische Versuchsaufbau dargestellt. Man sieht, dass bei dem Scan alle enthaltenen Fehler nachgewiesen werden können. Eine Ausnahme bilden die beiden ersten Reflektoren links im Bild. Hier konnte aufgrund des Versuchsaufbaus der Prüfkopf nicht weit genug zurückgefahren werden, um diese Reflektoren im Schallbündelbereich senkrecht zu treffen. Um genaue Angaben über die Fehlerorientierung und die Fehlergröße treffen zu können wurden in den Bereichen der Fehler zusätzlich vertikale Messungen über mehrere Spuren gefahren, um auch der verschiedenen Fehlerlagen innerhalb der Schweißnaht Rechnung zu tragen.

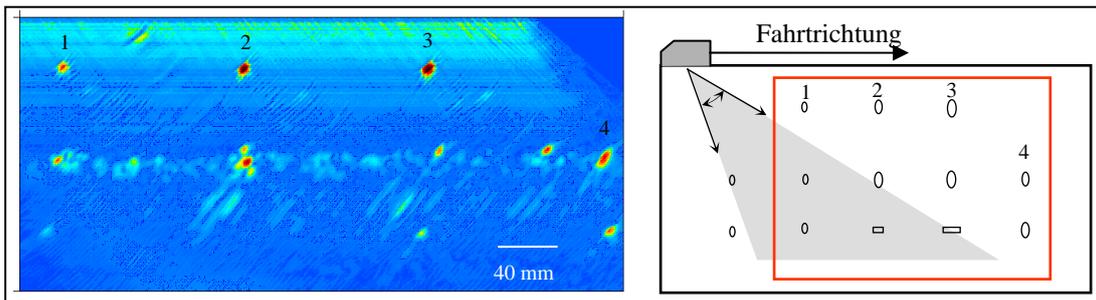


Bild 5 SAFT - Rekonstruktion des Schweißnahtbereiches, schematischer Versuchsaufbau

In **Bild 6** sind die gleichgerichteten SAFT - Rekonstruktionen der 5 mm großen Keramik-scheibe in der Schweißnahtflanke für die verschiedenen Prüffrequenzen dargestellt.

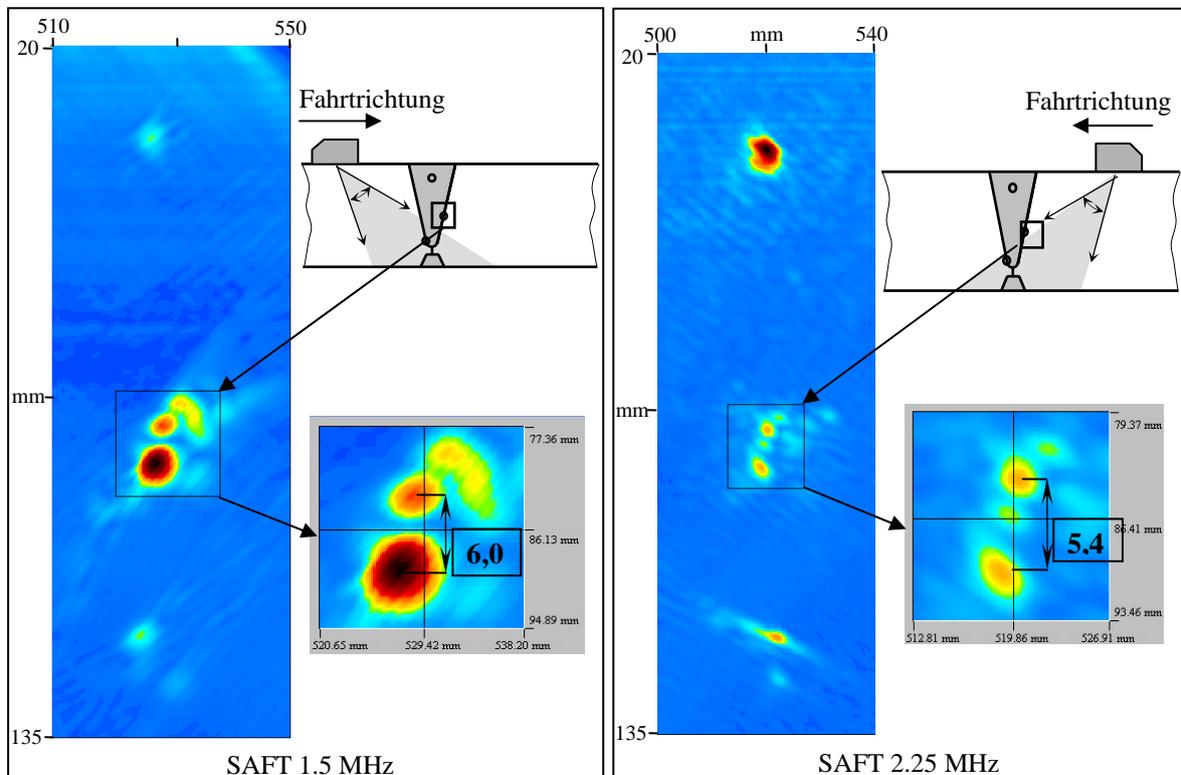


Bild 6 SAFT - Rekonstruktion 5 mm große Keramik-scheibe in der Schweißnahtflanke, schematischer Versuchsaufbau (oben rechts)

Die Bilder zeigen, dass die Keramikscheibe in ihrer Größe bei beiden verwendeten Frequenzen mit relativer Genauigkeit direkt aus der SAFT - Rekonstruktion bestimmt werden kann. Auch hier zeigt sich deutlich der Einfluss der Frequenz auf die Detailerkennbarkeit. Bei höherer Prüffrequenz und damit höherer Auflösung kann man in der Rekonstruktion sogar die leichte Schräglage des Reflektors entlang der Schweißnahtflanke erkennen.

4.1 Ergebnisse TOFD

Die Messungen in TOFD - Anordnung erfolgten ebenfalls mit zwei verschiedenen Prüffrequenzen im Plattierungs- und Schweißnahtbereich.

Die verschiedenen Winkel für die gewünschten Tiefenbereiche im Testkörper wurden vor den Messungen berechnet. Die Prüfkopfabstände konnten an der Halterung variiert werden. Durch die Nutzung von Gruppenstrahlerprüfköpfen konnte die Empfindlichkeitszone durch Variation des Einschallwinkels in der V-Durchschallung an die gewünschte Tiefenlage von 30 mm, 80 mm und 115 mm angepasst und in einem Prüfdurchgang gemessen werden.

Im Plattierungs- und Schweißnahtbereich wurden Ultraschallmessungen in Sende - Empfangs - Technik mit jeweils zwei 1.5 MHz - und 2.25 MHz - Gruppenstrahlerprüfköpfen mit 19° - Vorlaufkeilen durchgeführt. Es wurden alle Testnuten längs und quer überfahren, um die geeignetste Möglichkeit zur Fehlergrößenbestimmung herauszufinden.

Im Plattierungsbereich erfolgten die Messungen mit einem Schwenkwinkelbereich von 20 - 50° jeweils in horizontalen und vertikalen Spuren. Im Schweißnahtbereich wurde das Prüfvolumen mit einem Schwenkwinkelbereich von 25 - 70° abgetastet.

In **Bild 7** ist das hochfrequente TD - Bild der 8 mm tiefen Nut im Plattierungsbereich und der schematische Versuchsaufbau dargestellt. Die Bilder zeigen, dass die Nut in ihrer Größe mit relativer Genauigkeit anhand der Beugungsanzeige am oberen Nutrand und der Anzeige der Plattierungsgrenze bestimmt werden kann, wobei die Abweichung von der tatsächlichen Tiefe größer ist als bei der SAFT - Rekonstruktion.

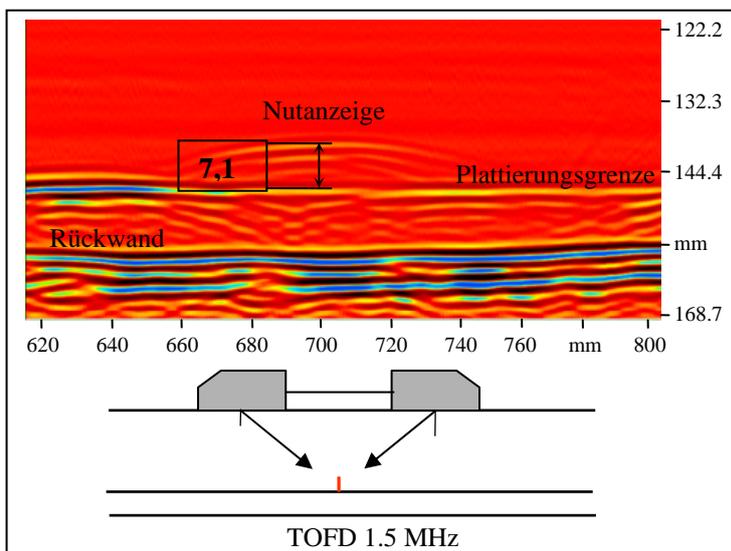


Bild 7 TD - Bild: 8 mm tiefe Nut im Plattierungsbereich, schematischer Versuchsaufbau (rechts)

Der Schweißnahtbereich wurde zunächst mit Einschallwinkeln von 25° - 70° horizontal über mehrere Spuren abgesannt, um einen Gesamtüberblick über die enthaltenen Fehler zu gewinnen. In **Bild 8** ist das TD - Bild des gesamten Schweißnahtbereiches für einen Einschallwinkel von 25° dargestellt. Unter diesem Winkel liegt der Empfindlichkeitsbereich in einer Tiefe von etwa 115 mm bei einem konstanten Prüfkopfabstand. Bei der Auswertung der Daten aus den TOFD - Messungen muss jede

Tiefenlage gesondert betrachtet werden, da für die verschiedenen Tiefenlagen der Testfehler verschiedene Einschallwinkel nötig waren. Man erhält demnach keinen Gesamtüberblick, wie bei den Ultraschallmessungen mit anschließender SAFT - Rekonstruktion, sondern nur Bilder des Schweißnahtbereiches in verschiedenen Tiefenlagen. In **Bild 8** sieht man von 5 Reflektoren lediglich zwei bzw. drei Anzeigen in einer Tiefenlage von 115 mm. Zwei Reflektoren können mit TOFD nicht nachgewiesen werden.

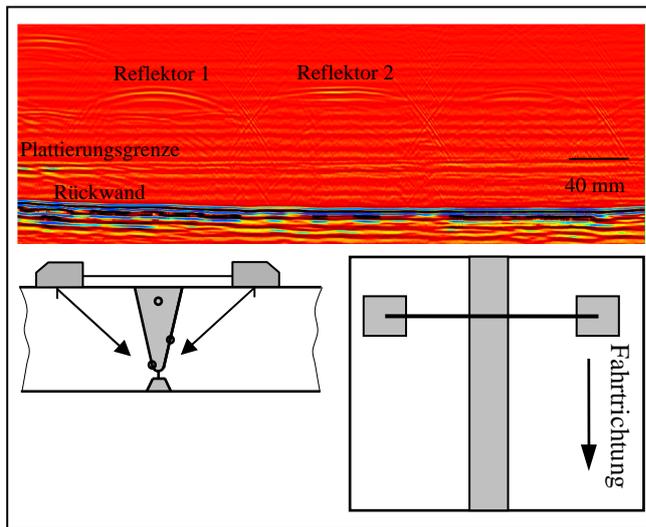


Bild 8 TD - Bild: gesamter Schweißnahtbereich unter einem Einschallwinkel von 25° , 1.5 MHz, schematischer Versuchsaufbau

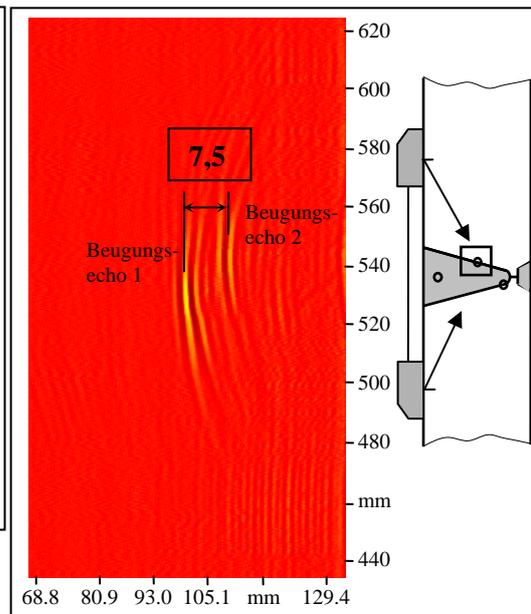


Bild 9 TD - Bild: 5 mm Keramikscheibe in der Schweißnahtflanke, schematischer Versuchsaufbau (rechts)

Um genaue Angaben über die Fehlerorientierung und die Fehlergröße einzelner Reflektoren treffen zu können wurden in den Bereichen der Fehler zusätzlich vertikale Messungen über mehrere Spuren gefahren. Damit wurden auch die verschiedenen Fehlerlagen innerhalb der Schweißnaht berücksichtigt.

In **Bild 9** ist das hochfrequente TD - Bild der 5 mm großen Keramikscheibe in der Schweißnahtflanke unter einem Einschallwinkel von 35° und der schematische Versuchsaufbau dargestellt.

Das Bild zeigt, dass die Keramikscheibe in ihrer Größe anhand der beiden Beugungsanzeigen mit relativer Genauigkeit bestimmt werden kann. Auch in der TD - Bilddarstellung kann man die leichte Schräglage des Reflektors entlang der Schweißnahtflanke erkennen.

5. exemplarischer Vergleich SAFT und TOFD

Beide Verfahren wurden zunächst als Suchverfahren zur Bestimmung der fehlerbehafteten Bereiche genutzt und anschließend als Analyseverfahren unter optimierten Parametern für die quantitative Bestimmung der Fehlergrößen und der Orientierungen.

Unter den vorliegenden Prüfbedingungen konnte anhand des Schweißnahtbereiches gezeigt werden, dass der SAFT - Algorithmus einen schnellen und fast vollständigen Überblick über die verschiedenen Fehler ermöglicht. Bei der Auswertung der TOFD - Messungen hingegen mussten aufgrund der Testkörperdicke einzelne Tiefenlagen unter verschiedenen Einschallwinkeln und damit Empfindlichkeitsbereichen dargestellt werden. Ein Gesamtüberblick über die im Volumen enthaltenden Testfehler war in diesem Fall nicht möglich.

Grundsätzlich konnte nachgewiesen werden, dass sich prinzipiell beide Verfahren zur Fehlercharakterisierung an plattierten Komponenten bei der Ultraschallprüfung eignen.

In Bild 10 sind die prozentualen Anteile für die Möglichkeiten der beiden Verfahren zur Reflektordetektion und -größenbestimmung für eine Prüffrequenz von 1.5 MHz angegeben.

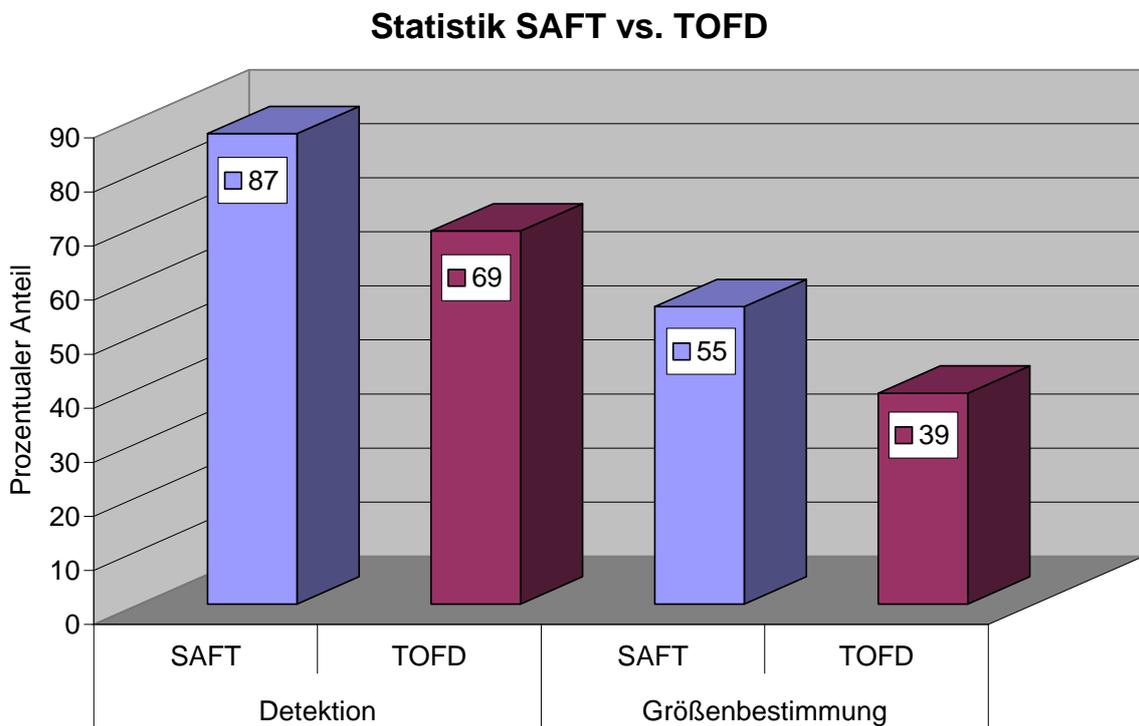


Bild 10 Prozentuale Anteile bezogen auf die jeweilige Gesamtzahl an Reflektoren für SAFT und TOFD bezüglich Detektion und Reflektorgößenbestimmung

6. Schlussfolgerung

Welches Verfahren als Such- und / oder Analyseverfahren angewendet wird ist grundsätzlich abhängig von den vorliegenden Randbedingungen bezüglich Testkörper, vorhandener Prüftechnik, Fehlerorientierung, Zeit und Kosten. Man kann aus den dargestellten Ergebnissen jedoch eindeutig sehen, dass SAFT als Analyseverfahren, d.h. zur Bestimmung von Fehlergrößen, besser eignet ist als TOFD. SAFT bietet als bildgebendes Verfahren den Vorteil der hochauflösenden Fehlerdetektion bei einfacher Interpretation der Anzeigen. Als Suchverfahren hingegen ist SAFT aufgrund der hohen Rohdatenmenge nur bedingt geeignet. Vor allem bei großflächigen Bauteilen und unbekannter Fehlerorientierung ist TOFD das geeignete Mittel der Wahl.

Im Folgenden werden allgemein Vor- und Nachteile der beiden Verfahren differenziert.

Vorteile SAFT:

- durch die Aufsummierung der Amplitudenwerte werden stochastische Fehler weggemittelt, insgesamt verbessert sich das Signal - Rausch - Verhältnis
- Bestimmung von Lage und Größe in einer Messfahrt
- berechnete SAFT - Rekonstruktionen leichter zu interpretieren
- Abtastung von gesamter Schweißnahtbreite einschließlich Wärmeeinflusszone
- Ultraschallprüfung von Schweißnähten auch bei einseitiger Zugänglichkeit und Schweißnahtüberhöhung
- sequenzieller Aufbau der Prüfkopfapertur im Schwenkwinkelbereich erlaubt nachträglich winkelselektiv angepasste Rekonstruktion zum Aufspüren und Verringern von Artefakten und zur Hilfe bei der Fehleranalyse

Nachteile SAFT:

- große Rohdatenmenge
- aufgrund der großen Rohdatenmenge bei großen Testkörpern und unbekannter Fehlerorientierung nur als Analyseverfahren geeignet

Vorteile TOFD:

- Bestimmung von Lage und Größe in einer Messfahrt bei dünnwandigen Bauteilen
- da Diffraktionssignale genutzt werden, sind Fehler in beliebiger Schräglage, bezogen auf die Darstellungsebene nachweisbar
- hohe Prüfgeschwindigkeit
- Fehlerbestimmung und -bewertung bei einfacher Schweißnahtprüfung mit geringem Anspruch an den Rissnachweis schnell und einfach möglich

Nachteile TOFD:

- Lagebestimmung schwieriger, da sichelförmige Anzeigen
- Zugang von beiden Seiten der Schweißnaht erforderlich
- tote Zone in der Nähe der Oberfläche und der Gegenfläche von ca. $2 \cdot \lambda$
- Nachweis kleiner Risse kritisch, ebenso bei Fehlerneigungen senkrecht zur Darstellungsebene

7. Referenzen

- [1] TÜV Nord EnSysHannover GmbH & Co.KG: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben SR 2521 „Analyse und Bewertung des Gefährdungspotentials durch Korrosion in deutschen LKR - Anlagen, Kapitel 6 Maßnahmen gegen Ursachen und Folgen von Korrosion, BMU 2007-698
- [2] Lorenz M., van der Wal L.F., Berkhout A.J: Ultrasonic Characterization Of Defects In Steel, Non Destructive Testing 92, C. Hallai and P. Kulcsar (Editors)

- [3]Chahbaz A., Sicard R.: Comparative Evaluation Between Ultrasonic Phased Array And Synthetic Aperture Focusing Techniques, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation 2003, Vol. 22, American Institute of Physics
- [4]Matsuoka C., Nakahata K., Baba A.: Comparative Study On Ultrasonic Imaging Methods With Array Transducers, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation 2008, Vol. 27, American Institute of Physics
- [5]Tessaro U., Erhard A., Schmitz V., Müller W., Waas A., Eser B., Just T., Mletzko U.: Nachweis und Charakterisierung von rissartigen Fehlern im Plattierungsbereich, Schriftreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU – 2003-617TÜV Nord EnSysHannover GmbH & Co.KG: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben SR 2521 „Analyse und Bewertung des Gefährdungspotentials durch Korrosion in deutschen LKR-Anlagen, Kapitel 6 Maßnahmen gegen Ursachen und Folgen von Korrosion, BMU 2007-698
- [6]Silk M.G., Kear P.E.: TOFD – The time of Flight DiffractionTechnique – Theoretical Aspects and Practical Applications, In: Il Giornale delle Prove non Distuttive Monitoraggio Diagnostica, 2/93, S. 28-38
- [7]Schenk G., Völz U., Dohse E., BAM Berlin, Bauer L., ASIC Design Werder: COMPAS-XL - Outstanding number of channels with a new phased array system, Beitrag zu: Moderne Systemtechnik bei Prüfungen mit Ultraschall, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung 2007