

Untersuchung zu den Grenzen von Ultraschallanalysemethoden an Mischnähten

Gerd AHLERS¹, Jens GANSWIND², Hans-Jürgen BLEHER³, Bernd GRUHNE³,
Thomas MÖHLENKAMP⁴

¹ E.ON Kernkraft GmbH, Hannover

² VGB PowerTech e.V., Essen

³ EnBW Kernkraft GmbH Kernkraftwerk Neckarwestheim, Neckarwestheim

⁴ Kernkraftwerke Lippe-Ems GmbH, Lingen

Kurzfassung. Anzeigen, die bei wiederkehrenden Prüfungen im Rahmen von zFP an Komponenten des Primärkreises in Leichtwasserreaktoren festgestellt werden und die gemäß dem KTA-Regelwerk als Befunde einzustufen sind, sind diese hinsichtlich ihre Größe und Lage zu bewerten. Eine Möglichkeit dieser Bewertung ist die Anwendung der Ultraschallanalyse, z. B. als SAFT-Analyse, Analyse mit PA-Prüfköpfen, WU-Techniken oder u.U. mit ToFD-Technik.

Die VGB Arbeitsgruppe “Zerstörungsfreie Prüfung” hat eine Untersuchung durchgeführt, deren Ziel es war, die Grenzen der derzeit am Markt verfügbaren Ultraschallanalysemethoden bei der Anwendung an Mischnähten von Primärkreiskomponenten aufzuzeigen. Für die Untersuchung wurden vier Vergleichskörper (VK) ausgewählt (stellvertretend für Mischnähte von DWR- und SWR-Anlagen). Mit Hilfe der VK wurden die Ultraschallanalysemethoden erprobt, verbessert und hinsichtlich ihrer Anwendung als WkP-Prüftechnik bewertet.

Der Schwerpunkt der Untersuchung lag auf zur inneren Oberfläche (plattiert) hin geöffneten Fehlern, welche als Nuten in Längs- und Querrichtung erodiert wurden. Die Durchführung war in zwei Teile untergliedert. Im ersten Teil sollten mit der Suchtechnik alle relevanten Nuten ortsgetreu zur Schweißnaht gefunden werden. Im zweiten Teil war dann die Eignung der Analysetechniken an eben diesen Nuten aufzuzeigen.

Im Rahmen der Vorauswahl der Analysetechniken zeigte sich, dass die TOFD-Technik an Mischnähten nicht erfolgreich einsetzbar war. Daher wurden keine weiteren Untersuchungen mit dieser Technik durchgeführt.

Der Vortrag zeigt exemplarisch Ergebnisse, die während der Durchführung an den Vergleichskörpern erzielt wurden. Gute Ergebnisse für die Analyse wurden an Nuten mit einer Tiefe größer als 2 mm erzielt, sofern die Nuten auf der austenitischen Werkstoffseite lagen und von dieser Seite aus angeschallt wurden. Unterhalb dieser Größe konnten die Signale nicht mehr in Fußpunkt- und Rissspitzensignal aufgelöst werden. In den anderen Werkstoffbereichen liegt die Grenze mit ca. 4 mm Nuttiefe höher, wobei auch hier gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Bei Anwendung der Analysemethoden ist die Prüffrequenz ein wichtiger Parameter. Innerhalb der Untersuchung wurden Prüfköpfe mit Frequenzen zwischen 0,5 und 2 MHz eingesetzt.

Suchbegriffe: Ultraschall Analysetechnik, SAFT-Analyse (SAFT), Phased Array (PA), Time of Flight Diffraction (ToFD), Mischschweißnaht, Suchtechnik, Wellenumwandlung

1. Einführung

Komponenten des Primärkreises werden in Deutschland wiederkehrend zerstörungsfrei geprüft. Die Festlegungen zu diesen Prüfungen wie Prüfintervall, Prüfumfang und Prüfverfahren sind in der zugehörigen KTA-Regel 3201.4 „Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung“ enthalten. Das KTA-Regelwerk wird kontinuierlich fortgeschrieben, die letzte Aktualisierung der KTA 3201.4 erfolgte von 2005 bis 2010 und endete mit der Ausgabe der Fassung 11.2010.

2. Motivation

Im Zuge der Überarbeitung der KTA-Regel 3201.4 wurden u. a. Festlegungen zur Ultraschallprüfung aktualisiert und erweitert. Demnach ist für alle UT-Prüftechniken ein Nachweis der Eignung gemäß Kapitel 4.2.3.3.3 zu erbringen und es sind die Anforderungen der Tabelle 4-1 zu erfüllen. Auf Grund von nationalen und internationalen Ereignissen an Mischnahtverbindungen (z. B. Biblis 2001, Wolf Creek 2008) wurden Festlegungen zur Ultraschallprüfung von Mischnahtverbindungen neu aufgenommen. Die o. g. Festlegungen gelten für ferritische Schweißverbindungen genauso wie für die Prüfung von schwierig zu prüfenden Werkstoffen (Austenit) und Werkstoffpaarungen (Mischnähte) (Abb. 3-1). Insbesondere bei der Prüfung von Mischnahtverbindungen können die Anforderungen der KTA nicht alleine mit nur einer Prüftechnik erfüllt werden, sondern es ist immer eine Kombination aus mehreren Prüftechniken anzuwenden. Eine sinnvolle Kombination stellt dabei die Verwendung von Longitudinal- und Transversalwellen dar.

Eine weitere Forderung der KTA 3201.4 ist, dass bei erstmaligem Auffinden einer Anzeige oder der Vergrößerung einer bekannten Anzeige (Kap. 8.2.1 (6)), eine weitergehende Analyse zur Erlangung weiterer Informationen wie Art, Lage und Größe erforderlich ist. Dieses stellt in Bezug zur Prüfung von Mischnähten eine Neuerung dar, enthielt die vorherige KTA-Regel keine Festlegungen hierzu. Mit der Ausgabe 11.2010 ist nun auch für die Prüfungen von Mischnähten eine anwendbare Analysetechnik vorzuhalten.

3. Aufgabenstellung

Auf Grund der neuen Anforderungen der KTA 3201.4 (Abb. 3-1) hat der VGB-Arbeitskreis „Zerstörungsfreie Prüfung“ (VGB-AK ZfP) in 2010 die Durchführung einer Untersuchung von Ultraschall-Analysetechniken an Mischnahtverbindungen in Kernkraftwerken beschlossen.

Gegenstand der Studie war der Nachweis der Leistungsfähigkeit einzelner Ultraschall-Prüftechniken zur Analyse (Charakterisierung von Anzeigen) definierter Testreflektoren (Längs- und Querfehler an der inneren Oberfläche) in Mischschweißverbindungen von ausgewählten Vergleichskörpern und das Aufzeigen von Leistungsgrenzen dieser Techniken. Als Prüftechniken wurden die PA-Technik, die Wellenumwandlungstechnik (WU), die SAFT-Technik und, soweit möglich, die ToFD-Technik ausgewählt.

Die Studie umfasste für die Bearbeitung folgende Leistungen:

- Auffinden der Nuten mit einer qualifizierten WKP-Prüftechnik (Suchtechnik) in allen Werkstoffübergängen und Beschreibung hinsichtlich ihrer Lage an den vier Vergleichskörpern

- Voruntersuchungen/Überlegungen zur Auswahl geeigneter Einzeltechniken der unterschiedlichen Analysetechniken (PA, WU, SAFT und ggf. TOFD) und Begründung der Auswahl
- Testmessungen mit den ausgewählten Analysetechniken in allen Werkstoffübergängen der vier VK
- Dokumentation der Ergebnisse aus den Testmessungen in Statusberichten
- Bewertung der Ergebnisse aus den Testmessungen und Charakterisierung der Testreflektoren, ggf. Optimierung der Technik
- Zusammenstellung der Ergebnisse in einem Abschlussbericht

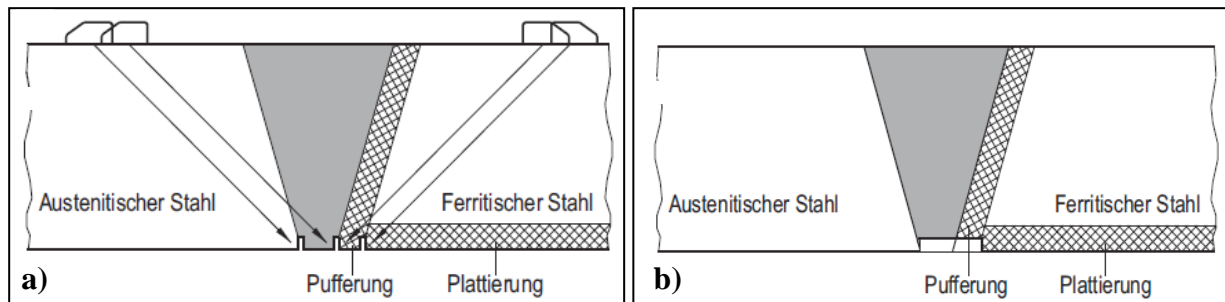


Abb. 3-1: Lage und Einschallrichtungen für die Prüfung von Mischnahtverbindungen (KTA 3201.4, Bild 4-2 c und Bild 4-3)

- a) Längsfehler
- b) Querfehler

4. Projektteilnehmer

Die Studie wurde von dem VGB-Arbeitskreis „ZfP“ initiiert und von der Arbeitsgruppe (AG) „UT-Analysetechniken“ durchgeführt. Die AG setzte sich aus Vertretern der deutschen Betreibergesellschaften EnBW, E.ON und RWE und dem Schweizer Betreiber Gösgen-Däniken AG zusammen

Innerhalb der Studie wurden die Messungen mit mechanisierten Ultraschallprüfgeräten durchgeführt. Es wurden insgesamt sechs Prüfdienstleister aus Deutschland und den Niederlande, die bereits Erfahrungen mit mechanisierten Ultraschallprüfungen in Kernkraftwerken besitzen, mit der Durchführung beauftragt (Abb. 4-1).

Die Dauer der Studie wurde mit zwei Jahren geplant, wobei die Vergleichskörper innerhalb der Prüfdienstleister rotierten und begann in 2011. Auf Grund der Auftragssituation bei den Prüfdienstleistern und von ungeplanten Ereignissen während der Revisionen in einzelnen Kernkraftwerken innerhalb des geplanten Durchführungszeitraums hat sich die Durchführungsdauer um ein Jahr verlängert.

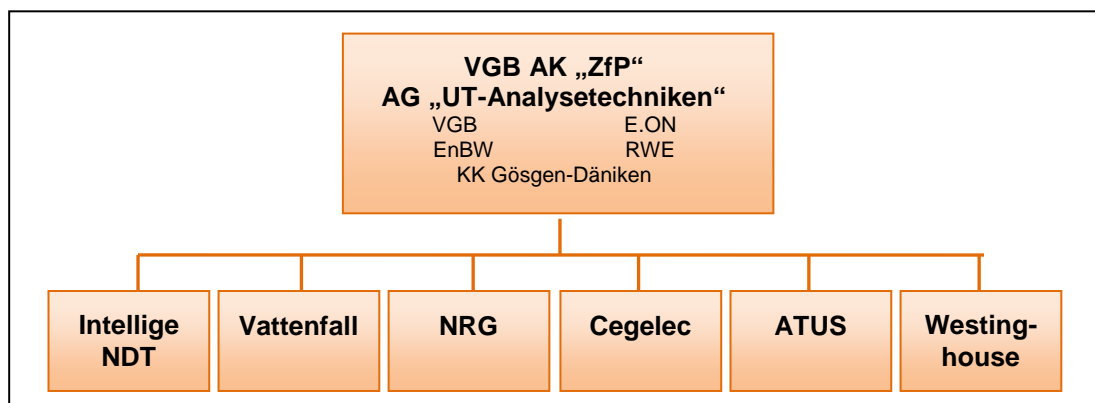


Abb. 4-1: Projektteilnehmer

5. Vergleichskörper

Es gibt eine Vielzahl an Mischnahtverbindungen, die sich in ihrer Schweißnahtausführung (z. B. Schweißfolge, Lagenaufbau, Pufferungsbreite) und der geometrischen Ausführung (konisch, parallel, Wandstärke) unterscheiden. Für die Studie wurden vier verschiedene Mischnaht-Vergleichskörper (innerhalb der Studie mit VK1 bis VK4 bezeichnet) ausgewählt, mit denen ein Großteil der Mischnähte von in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken aus der Siemens/KWU-Baulinie abgedeckt wird. Die Unterschiede liegen hauptsächlich in der Pufferungsbreite, dem Flankenwinkel der Pufferung zum ferritischen Grundwerkstoff und in der Wandstärke der Vergleichskörper. Tabelle 5-1 enthält die wesentlichen Angaben zu den Werkstoffen der ausgewählten Vergleichskörper.

Tabelle 5-1: Werkstoffe der ausgewählten Vergleichskörper

Vergleichskörper	Ferritischer Grundwerkstoff	Austenitischer Grundwerkstoff	Schweißung, Pufferung	Plattierung
VK1	15 NiCuMoNb5 (1.6368)	X6 CrNiNb18 10 (1.4553)	NiCr82 (2.4806)	X5 CrNiNb19 9 (1.4551)
VK2	22 NiMoCr3 7 (1.6751)	X6 CrNiNb18 10 (1.4553)	NiCr82 (2.4806)	X5 CrNiNb19 9 (1.4551)
VK3	20 MnMoNi5 5 (1.6310)	X6 CrNiNb18 10 (1.4550)	NiCr82 (2.4806)	X6 CrNiNb18 10 (1.4550)
VK4	15Mo3 (1.5415)	X5 CrNiNb19 9 (1.4551)	NiCrFe3 (2.4807)	X5 CrNiNb19 9 (1.4551)

Abbildung 5-1 zeigt den schematischen Aufbau der Vergleichskörper. An der äußeren und inneren Oberfläche befinden sich erodierte Nuten. Für die Studie wurden nur die Nuten an der inneren Oberfläche betrachtet. Es wurden nur die bereits vorhandenen Nuten verwendet und keine neuen Nuten eingebracht. Daher können nicht für alle Werkstoffübergänge Kennlinien erstellt werden. Um die Anforderungen der KTA 3201.4 zu erfüllen, müssten mindestens drei bis vier Nuten je Werkstoffübergang vorhanden sein (Referenznut, eine kleinere und eine größere Nuttiefe als die Referenznuttiefe und in einigen Fällen eine ausreichend tiefe Nut zur Abdeckung eines Wanddurchbruches bzw. zum Nachweis der Amplitudensättigung). Ziel der Studie war es, die Grenzen der vorhandenen Analysetechniken aufzuzeigen und nicht eine vollumfängliche Qualifizierung durchzuführen, wozu die vorhandenen Nuten ausreichten. Daher war es nicht erforderlich, weitere Nuten gemäß den Anforderungen der KTA-Regel in die Vergleichskörper einzubringen.

Gemäß Tabelle 4-2 der KTA3201.4 ist die Tiefe der Referenznut abhängig von der Wandstärke der zu prüfenden Komponente. Für Wandstärken größer 20 mm und kleiner gleich 40 mm beträgt die Tiefe der Referenznut 2 mm. Für Wandstärken größer 40 mm beträgt die Tiefe der Referenznut 3 mm.

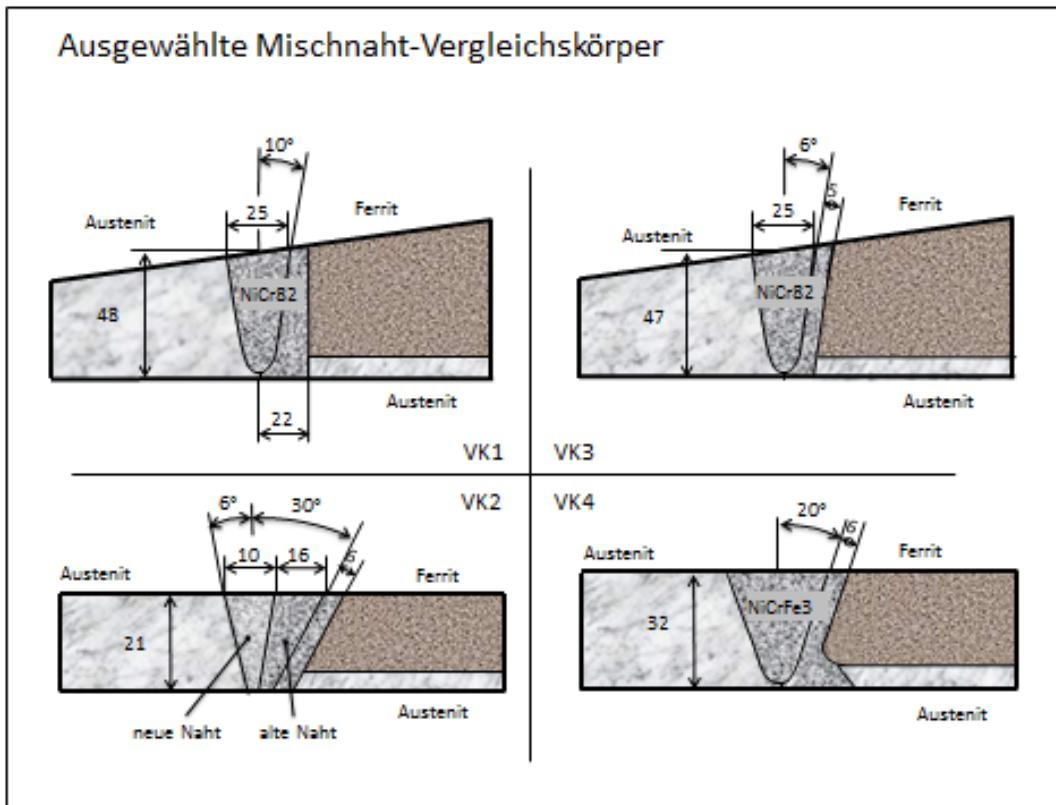


Abb. 5-1: Übersicht der verwendeten Vergleichskörper (schematisch)

6. Durchführung

Die Ultraschallprüfgeräte müssen einige grundsätzliche Anforderungen in Anlehnung an DIN 25435-1 [2] erfüllen:

- UT-Prüfköpfe, die Ultraschallwellen aussenden und empfangen
- Einsatz von Standardprüfköpfen und/oder PA-Prüfköpfen
- Impuls-Echo-Betrieb (IE)
- Direkte Ankopplung mit Wasser oder ZG-Paste
- Einsatz von mechanischen Prüfeinrichtungen
- Prüfgeräte mit Datenaufzeichnung und Auswertesoftware

Alle Messdaten aus der Such- und Analysemessung wurden in BCD-Bildern dargestellt.

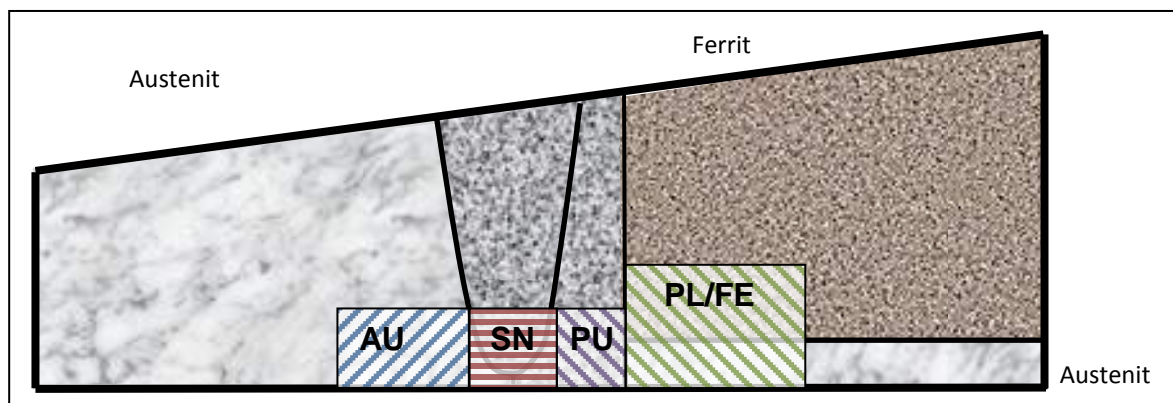


Abb. 6-1: Werkstoffübergänge
 Grundmaterial (AU = Austenit, FE = Ferrit)
 Schweißung (SN = Schweißnaht, PU = Pufferung, PL = Plattierung)

In einem ersten Schritt waren alle Nuten an der inneren Oberfläche der Vergleichskörper aufzufinden und hinsichtlich ihrer tatsächlichen Lage (Grundwerkstoff: FE oder AU, Schweißung: SN, PU, PL) zu lokalisieren, siehe Abb. 6-1. Dazu wurden qualifizierte WKP-Prüftechniken verwendet und ggf. optimiert. Bei den WKP-Techniken kommen Standard-Prüfköpfe wie Winkelprüfköpfe (z. B. MWK45-2, 45ET2 oder 65SEL2) oder PA-Prüfköpfe (z. B. ET1, SEL2) mit 16 oder 32 Schwingern zum Einsatz.

Die Messergebnisse wurden in Statusberichten zusammengefasst und die Daten in farbcodierten BCD-Bildern (gemäß VGB-R 515 [3]) dargestellt. Die Berichte enthielten ebenfalls Nutkennlinien (sofern möglich) und die Signal-Rausch-Abstände.

Nachdem alle Nuten detektiert wurden, konnte im zweiten Schritt die Analyse der Nuttiefen erfolgen. Dazu wurden drei Analysemethoden, die alle nach dem Risspitzenverfahren arbeiten, ausgewählt:

- a) Phased Array-Technik (PA)
- b) Synthetic Aperture Focus Technique (SAFT)
- c) Wellenumwandlungstechniken (WU)

Es war vorgesehen, eine weitere Analysetechnik - Time of Flight Diffraction (ToFD) - in der Studie zu betrachten. Eine Voruntersuchung dieser Analysetechnik zeigte allerdings keine brauchbaren Ergebnisse. Der Hauptgrund hierfür ist in der Schallstreuung und der Überlagerung mit der Schallfeldablenkung aufgrund der Werkstoffübergänge zu sehen. Daher wurde diese Analysetechnik in der Studie nicht weiter verfolgt.

Die Ergebnisse aus den Analysen wurden ebenfalls in Statusberichten zusammengefasst und die Daten in farbcodierten BCD-Bildern dargestellt. Die mit den Analysen ermittelten Nuttiefen wurden mit den bekannten Referenzwerten der Nuten verglichen.

Abbildung 6-2 zeigt einen Teststand für die mechanisierte Ultraschallprüfung. Die Aufnahme des Manipulatorsystems erfolgte dabei über ein Hilfsrohr (blau).

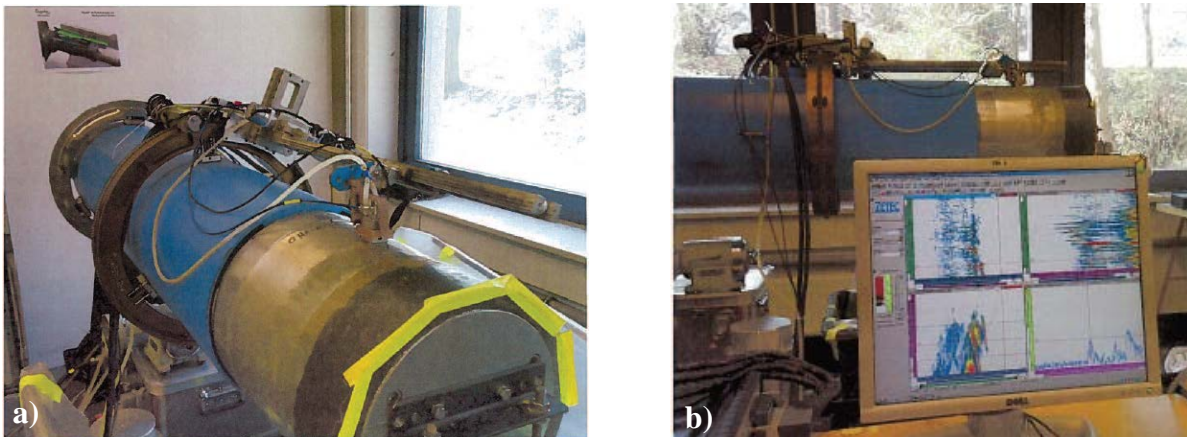


Abb. 6-2: Teststand einer mechanisierten Ultraschallprüfung während der Durchführung;
a) Prüfkopf im Einsatz auf dem Vergleichskörper (im Bild rechts); das blaue Rohr dient lediglich zur Aufnahme des Manipulatorsystems
b) Ultraschallprüfgerät mit Datenaufnahme und Auswertung

7. Ergebnisse

Grundsätzlich konnte mit allen WKP- und ausgewählten Analysetechniken die Reflektoren an der inneren Oberfläche der Mischverbindungen detektiert werden. Dabei war das Signal-Rausch-Verhältnis groß genug, um an allen Werkstoffübergängen die Nuten nachzuweisen.

Mit der Suchtechnik konnten, bedingt durch die Schallfeldeinflüsse des Schweißgutes, nicht alle Reflektoren mit nur einer einzelnen Prüftechnik nachgewiesen werden. Daher wurde für diese Prüfbereiche eine Kombination von Prüftechniken eingesetzt. Mit Longitudinalwellen lassen sich Reflektoren in grobkörnigen Werkstoffen wie Austeniten oder Mischnähten auf Grund ihrer geringeren Schallfeldstörung gut auffinden, zeigen aber über die Tiefe der Reflektoren keine ausgeprägte Amplitudenabhängigkeit. Daher wurden die Transversalwellen als ergänzende Techniken eingesetzt. Deren Reichweite ist in grobkörnigen Gefügen eingeschränkt, zeigen aber eine Amplitudenabhängigkeit über die Reflektortiefe. Zusammen mit diesen beiden Techniken und unter Ausnutzung der Mustererkennung über die Wellenumwandlung oder dem Rissspitzensignal ist ein sicherer und reproduzierbarer Nachweis der Reflektoren möglich.

Bei den Analyse-Methoden konnte nicht für alle Reflektoren eine Tiefenerstreckung bestimmt werden, insbesondere nicht für die Nuten im Interface SN zu PU. Für diese Nuten konnten erst ab einer Tiefe von 4 mm Aussagen über eine Tiefenerstreckung getroffen werden. Für kleinere Nuttiefen haben die Schallstreuung und die Schallfeldablenkung an den Werkstoffübergängen einen deutlichen Einfluss, so dass eine Aussage über die Tiefe nicht möglich war. Im Prüfbereich AU konnten für Reflektoren ab 2 mm Tiefe Analysen zur Tiefenbestimmungen erfolgen. Für kleinere Nuttiefen ist keine Unterscheidung zwischen Rissspitzen- und Fußpunktecho (Hauptecho) mehr möglich.

7.1 Suchtechnik

Wie bereits in Abschnitt 3 genannt, waren zuerst alle bekannten Nutreflektoren mit einer qualifizierten Suchtechnik in allen Prüfbereichen in beiden Einschallebenen (LF und QF) nachzuweisen. Für alle Reflektoren war ihre Lage bezüglich der Prüfbereiche anzugeben. Dieser Schritt war erforderlich, um im nachfolgenden Schritt die Analyse (Tiefenbestimmung) an den Reflektoren durchführen zu können. Alle Prüfdienstleister haben diesen Zwischenschritt erfüllt und die Testreflektoren an der inneren Oberfläche sicher in ihrer Lage im Vergleichskörper nachgewiesen und beschrieben. Der Signal-Rausch-Abstand war für alle Suchtechniken ausreichend groß, um die Daten auswerten zu können. In einigen Fällen diente das Anzeigenmuster des Schweißgutes und das Rauschen des Pufferungsinterfaces SN/PU als charakteristisches Signal zur Unterstützung bei der lokalen Zuordnung der Reflektoren.

7.2 Analysetechnik

Das Rückstreusignal eines Risses zurück zum Prüfkopf ist als Rissspitzensignal bekannt. Diese Rissspitzensignale haben gegenüber den anderen Reflektionssignalen von Inhomogenitäten und Winkelspiegelsignalen ein schwaches Echosignal, was in der kugelförmigen Ausbreitung des Signales begründet ist. Durch die bildgebende Datenverarbeitung können Rissspitzensignale in Mischschweißnähten deutlich dargestellt werden. Auf Grund der Laufzeitdifferenzen zwischen dem Hauptecho (Winkelspiegeleffekt) und dem Rissspitzensignal ist eine Aussage über die Fehlertiefe möglich. Abbildung 7-2.1 zeigt schematisch die Rückstreuechos an einem Fehler.

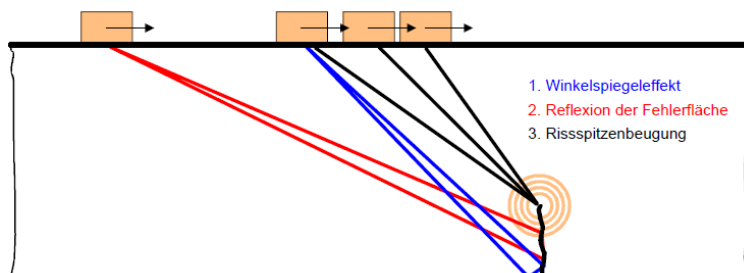


Abb. 7-2.1: Rissspitzensignal an einem Reflektor

Für Reflektoren unterhalb einer bestimmten Tiefenerstreckung können Rissspitzensignal und Fußpunktsignal physikalisch nicht mehr getrennt werden (siehe Abb. 7-2.2). Abhängig von Prüfbereich lag die Grenze der Trennung bei 2 mm für Reflektoren im Prüfbereich AU (Einschallrichtung vom Austenit) und bei 4 mm in den Prüfbereichen SN-PU. Aus der Einschallrichtung vom ferritischem Grundwerkstoff mussten die Reflektoren im Prüfbereich PU-PL durch die Plattierung hindurchgehen, um eine sichere Aussage zur Tiefenerstreckung zu ermöglichen.

7.2.1 Rissspitzenanalyse mit Phased-Array-Technik

Auf Grund der Fokussierung des Schallstrahles bei der PA-Technik kann eine hohe Prüfeempfindlichkeit sowie eine gute Auffindwahrscheinlichkeit erreicht werden. Dabei sollte der Fokuspunkt im Prüfbereich der inneren Oberfläche liegen.

Bei der Anwendung der PA-Technik gibt es unterschiedliche Betriebsarten. Einige Teilnehmer arbeiten mit Schwenkwinkelbereichen, andere verwenden feste Einschallwinkel (vergleichbar einem Festwinkelprüfkopf), wobei der Fokus stets auf die innere Oberfläche ausgerichtet war. In den meisten Fällen wurden Schwenkwinkel für die Suchtechnik eingesetzt, wogegen bei der Analysetechnik vorwiegend Festwinkel oder ein begrenzter Schwenkwinkelbereich zum Einsatz kam. Abbildung 7-2.2 zeigt beispielhaft einige Rissspitzensignale eines PA-Prüfkopfes (45° SEL-2MHz) von Nuten des VK3.

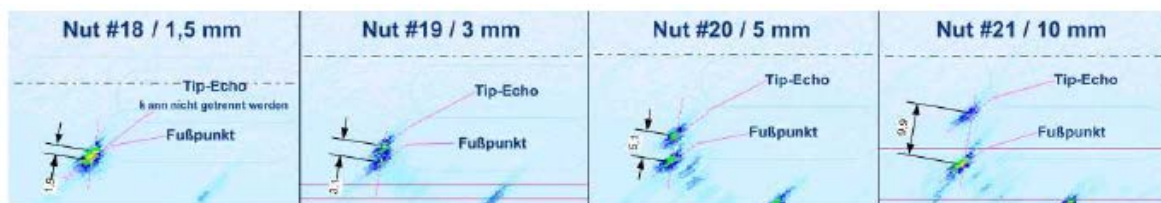


Abb. 7-2.2: Beispiel für eine PA-Technik (45° SEL-2 MHz) am VK3, ESR vom Austenit; für Nuttiefen <2 mm bzw. <4 mm (abhängig vom Prüfbereich) ist eine Trennung von Rissspitzen- und Fußpunktsignal nicht mehr möglich

7.2.2 Rissspitzenanalyse mit SAFT-Technik

Um mit der SAFT-Methode eine Analyse durchführen zu können, ist es notwendig HF-Daten mit einem defokussierten breiten Schallfeld aufzunehmen. Üblicherweise werden die Messungen mit einem 45° -Standardprüfkopf und einer Prüffrequenz von 2 MHz (z. B. MWK45-2) durchgeführt, so wie er von einigen Teilnehmern verwendet wurde. Die aufgenommenen Daten wurden anschließend mit dem SAFT-Algorithmus weiterverarbeitet, welcher im Ergebnis eine Rekonstruktion des Prüfbereiches lieferte. Ein Beispiel für eine SAFT-Rekonstruktion zeigt Abbildung 7-2.3.

In einigen Fällen wurden für die Datenaufnahme PA-Prüfköpfe verwendet. Dabei war es erforderlich das Schallfeld zu defokussieren. Dieses Vorgehen steht im Kontrast zur üblichen Anwendung von PA-Techniken, bei der Schallfelder zur Erlangung einer hohen Prüfeempfindlichkeit auf den Prüfbereich fokussiert werden (siehe auch Abschn. 7.2.1). Es ist nicht zweckmäßig Messdaten aus einer fokussierten PA-Technik mit der SAFT-Methode zu analysieren, da dem SAFT-Algorithmus in diesem Falle keine brauchbaren Daten für eine Rekonstruktion (Fokussierung) zur Verfügung stehen.

Die Ergebnisse aus der SAFT-Analyse sind vergleichbar zu den Ergebnissen, die mit der PA-Rissspitzentechnik erzielt wurden. Die so bestimmten Anzeigentiefen waren gleichwertig, wie Abbildung 7-2.3 exemplarisch zeigt.

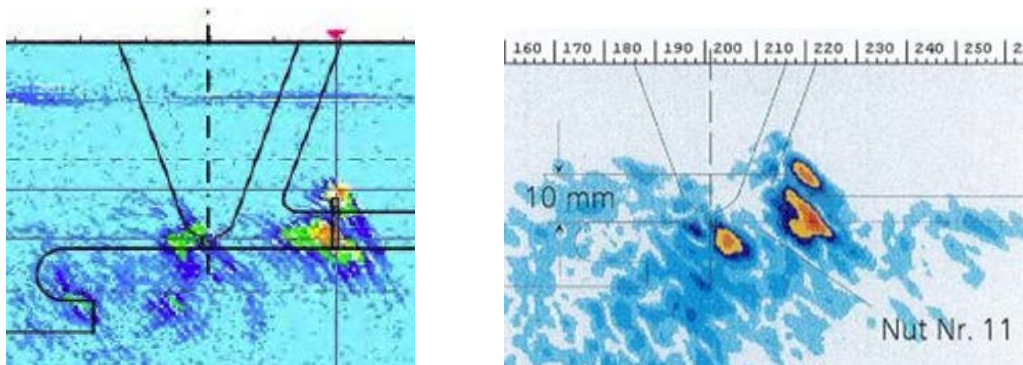


Abb. 7-2.3: Vergleich der Anzeigen-Rekonstruktion des PA-Prüfkopfes 45SEL-2MHz (VK4, Nut-Nr. 11, t=8 mm)
 links: Risspitzensignal PA (t=8,3 mm); rechts: SAFT-Analyse (t=10 mm)

7.2.3 Risspitzenanalyse mit Wellenumwandlungstechnik

Bei der Wellenumwandlungstechnik (WU) werden Longitudinalwellen-Prüfköpfe mit Einschallwinkeln von 65° oder 70° (üblicherweise SEL-Prüfköpfe) eingesetzt, die unter ca. 33° eine Transversalwelle abspalten. Zusätzlich zum Hauptecho (HE) können bei der WU zwei typische Nebenechos (NE) auftreten. Diese sind als NE1 (long-long-trans) und NE2 (trans-long „Kriechwelle“) bekannt, siehe Abbildung 7-2.4.

Das Nebenecho 1 resultiert aus einer Reflektion der ausgesendeten Longitudinalwelle an der Fläche des Reflektors und der Umwandlung der reflektierten Welle an der inneren Oberfläche in eine Transversalwelle. Um dieses NE 1 zu erhalten, muss der Reflektor eine bestimmte Tiefenerstreckung aufweisen. Im Grundwerkstoffbereich AU reichte dazu schon eine 1 mm tiefe Nut aus. Kleinere Reflektoren erzeugen i. d. R. kein NE 1. In den anderen Prüfbereichen waren deutlich tiefere Nut notwendig (NE 1 erst oberhalb Nuttiefen von 4 mm).

Nebenecho 2 resultiert aus der Umwandlung der ausgesendeten Transversalwelle an der inneren Oberfläche in eine „Kriechwelle“. Diese wiederum steht in Wechselwirkung mit Reflektoren, die zur inneren Oberfläche hin geöffnet sind. Bei der WU-Technik hat das Signal des NE 2 das stärkste Amplitudenverhalten.

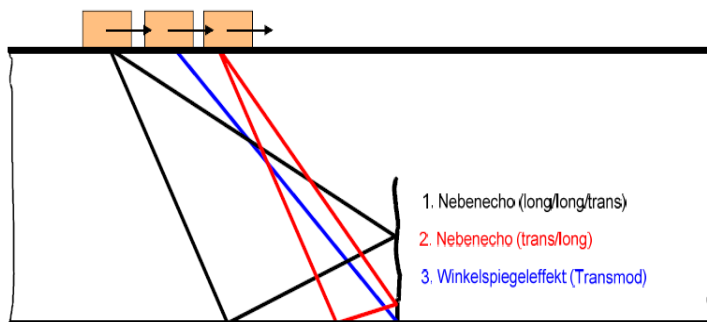


Abb. 7-2.4: Wellenumwandlung:
 Hauptecho HE (blau), Nebenecho NE 1 (schwarz) und NE 2 (rot)

Die WU-Technik konnte nur von der austenitischen Grundwerkstoffseite erfolgreich eingesetzt werden. Bedingt durch die Schallfeldwechselwirkung am Interface Pufferung-Ferrit bzw. am Plattierungsinterface war auf der ferritischen Grundwerkstoffseite die WU nicht sinnvoll nutzbar.

Es können mit Hilfe der WU zwei grundsätzliche Aussagen getroffen werden:

- Wenn das NE 1 vorhanden ist, hat der Reflektor eine Tiefe, die über einer Mindestfehlertiefe liegt und verfügt über eine spezifische Fehlerfläche

(= Anzeige mit Tiefererstreckung). Anderenfalls liegt ein Reflektor mit geringer Tiefererstreckung vor.

- Wenn das NE 2 („Kriechwelle“) vorhanden ist, ist der Reflektor zur inneren Oberfläche hin geöffnet. Anderenfalls besteht ein Ligament zwischen dem Reflektor und der inneren Oberfläche.

Mit Hilfe dieser beiden Aussagen ist es möglich eine Abschätzung über die mögliche Tiefererstreckung zu treffen. So konnten Anzeigen ab einer Tiefererstreckung von 3-4 mm auf Grund der auftretenden oder ausbleibenden Nebenechos NE 1 und NE 2 hinsichtlich ihrer Tiefererstreckung eindeutig zugeordnet werden.

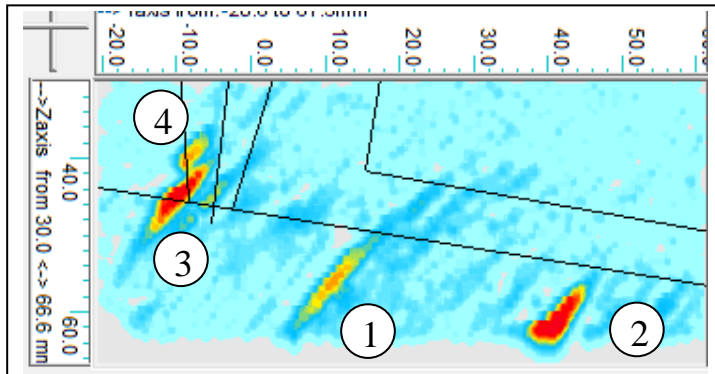


Abb. 7-2.5: Beispiel der WU-Technik am VK 1:

**1: Nebenecho NE1 (trans – Kriechwelle); 2: Nebenecho NE2 (trans – long - long);
3: Hauptecho (Longitudinalwelle mit 60°); 4: Rissspitzenecho**

7.2.4 Time of Flight Diffraction-Technik

Wie bereits in Abschnitt 6 erwähnt, war die ToFD-Methode als weitere Analyse-Technik vorgesehen. Um diese Methode erfolgreich einsetzen zu können, müssen einige essentielle Bedingungen erfüllt werden. Die Anwendung von ToFD beschränkt sich auf einfache Geometrien mit planparallelen Oberflächen wie z. B. Platten oder Rohre und auf un- bzw. niedriglegierten Stahl. Schwierigkeiten bei der Anwendung dieser Technik an Mischschweißnähten treten auf Grund von Schallfeldablenkung sowie Schallfeldstreuung auf [4].

Weiterhin ist eine hohe Prüffrequenz einzusetzen (üblicherweise 5MHz und höher), um ein divergentes Schallfeld und eine hohe Auflösung zu erreichen. Aber gerade diese hohe Prüffrequenz ist für die Prüfung von grobkörnigen Werkstoffen wie Austenit und Mischschweißnähte nicht zielführend. Für die Prüfung von grobkörnigen Werkstoffen verwendet man in der Praxis Prüffrequenzen von 2 MHz und niedriger, um bei der auftretenden Schallfeldstreuung eine gute Auflösung zu erreichen. Die zweckmäßige niedrige Prüffrequenz steht im Gegensatz zur angestrebten hohen Auflösung bei der ToFD-technik.

Ein weiterer Grund, warum ToFD nicht erfolgreich an Mischschweißnähten eingesetzt werden kann, liegt in der Schallfeldstreuung in Verbindung mit der Schallfeldablenkung auf Grund der vielen Werkstoffübergänge (FE zu PU, PU zu SN und SN zu AU) sowie den unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten der verschiedenen Werkstoffe. Es existiert kein direkter (ungestörter) Schallausbreitungspfad vom Sender zum Empfänger, welcher allerdings für eine aussagekräftige Analyse notwendig ist.

Voruntersuchungen mit dieser Analysemethode an Mischnahtvergleichskörpern zeigten keine brauchbaren Ergebnisse, insbesondere bei konischer Geometrie, wie sie u. a. bei den in dieser Studie verwendeten Vergleichskörpern vorlagen. Daher wurden keine weiteren Untersuchungen zu dieser Analysemethode durchgeführt.

8. Zusammenfassung

Die Auswahl der Ultraschall-Analysemethode zur Fehlertiefenbestimmung muss unter Beachtung der spezifischen Randbedingungen der jeweiligen Prüfaufgabe erfolgen. Es gibt keine Vorgehensweise, die alle möglichen Anwendungsfälle gleichermaßen abdeckt. Wie diese Studie gezeigt hat, sind verschiedene Methoden zur Fehlertiefenbestimmung verfügbar, die zu vergleichbaren Messergebnissen führen. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass mehr als nur eine einzelne Prüftechnik zur Erfüllung der Aufgabe zum Einsatz kommen kann (insbesondere bei der Suchtechnik).

Das Nachweisvermögen zur Tiefenerstreckung an Mischschweißnähten ist stark abhängig von der Einschallrichtung, dem Einschallwinkel, der Prüffrequenz und der Wellenart. Um eine hohe Tiefenauflösung zu erreichen, ist die Verwendung von niedrigen Prüffrequenzen zwischen 0,5 und 2 MHz zweckmäßig. Auf Grund der Schallfeldablenkung und der Schallfeldstreuung an den Werkstoffübergängen (Interfaces) war es nicht möglich, im Prüfbereich SN-PU und PU-PL/FE eine sichere Tiefenaussage für Reflektoren kleiner als 4 mm zu treffen. Unterhalb dieser Größe waren die Reflektoren zwar auffindbar (Suchtechnik), eine Analyse zur Bestimmung der Tiefenerstreckung war aber nicht möglich. Anzeigen, die auf der austenitischen Grundwerkstoffseite lagen und aus dieser Richtung angeschallt wurden, konnten ab einer Tiefe von 2 mm sicher analysiert werden.

Bei der Analyse ist die Anwendung eines Mustervergleiches zwischen Anzeigenmustern von Reflektoren am Vergleichskörper und an der Komponente hilfreich. Weiterhin kann die WU-Technik zur Abschätzung einer Anzeigentiefe unterstützend angewendet werden, wie im Abschnitt 7.2.3 dargestellt wurde.

Grundsätzlich ist die Longitudinalwelle aus der WU-technik zur Detektion von Reflektion zu bevorzugen (Suchtechnik). Zur Tiefenabschätzung können die Nebenechos NE 1 und NE 2 der WU-Technik als Analysemethode herangezogen werden. Der Einfluss der verschiedenen Werkstoffe (Grundwerkstoffe, Schweißwerkstoffe), Schallfeldstreuung, Schallfeldablenkung und Komponentengeometrie muss bei der Verwendung der WU-Technik berücksichtigt werden. Unter Ausnutzung der WU-Technik ist eine Abschätzung über die mögliche Anzeigentiefe möglich.

Welche Analysemethode zur Anwendung kommt, ist oft schon mit der eingesetzten Suchtechnik vorbestimmt. Bei dem Einsatz von Standard-Prüfköpfen liegt es nahe eine SAFT-Analyse durchzuführen, da hier bereits die notwendige HF-Daten vorliegen oder mit überschaubarem Aufwand aufgenommen werden können. Andererseits stehen bei Verwendung von PA-Prüfköpfen als Suchtechnik diese direkt für eine Rissspitzenanalyse zur Verfügung. Letztendlich kann jede der untersuchten Analysemethoden in Verbindung mit einem Mustervergleich unter Beachtung der schwierigen Prüfbedingungen an Mischschweißnähten und deren Komplexität von Werkstoffpaarungen erfolgreich angewendet werden.

Referenzen

- [1] KTA 3201.4, Fassung 2010-11
Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren,
Teil 4: Wiederkehrende Prüfung und Betriebsüberwachung
- [2] DIN 25435-1:2005-09
Wiederkehrende Prüfungen der Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren,
Teil 1: Mechanisierte Ultraschallprüfung
- [3] VGB-R 515, Richtlinie, Erste Ausgabe 2001
Auswertung von Messergebnissen bei mechanisierten Ultraschallprüfungen,
VGB PowerTech GmbH
- [4] DIN EN ISO 10863:2011-12

Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Ultraschallprüfung -
Anwendung der Beugungslaufzeittechnik (TOFD)