

Charakterisierung und Grössenbestimmung sicherheitstechnisch relevanter Fehler mit Ultraschall, Einsatz von Phased Array Technik und Rekonstruktionsalgorithmen

Hardy ERNST, Daniel ALGERNON, Klaus DRESSLER
SVTI - Schweizerischer Verein für technische Inspektionen
Richtistrasse 15, CH-8304 Wallisellen

Kurzfassung. Die Phased Array Technik bietet im Vergleich zu konventionellen Ultraschallprüfung verbesserte Möglichkeiten zur Charakterisierung von Anzeigen durch Mustererkennung. Am Beispiel der Ultraschallprüfung von Rohrleitungsschweissnähten wird gezeigt wie man mit Hilfe von Mustererkennung zwischen unbedenklichen Anzeigen, resultierend aus Geometrie oder Gefüge, oder aber sicherheitstechnisch relevanten Anzeigen, infolge betriebsinduzierten Rissen, unterscheiden kann. Typische Anzeigenmuster von betriebsinduzierten Rissen, von Geometrien, aus dem Gefüge und von volumenhaften Fehlern werden aufgezeigt.

Die Vermessung der Fehlertiefenausdehnung betriebsinduzierter Risse erfolgt vielfach mit der Rissspitzentechnik. Messungen an Testkörpern mit realistischen Fehlern zeigen, dass die Rissspitzentechnik bei komplexen Fehlermorphologien und Fehlerlagen, wie zum Beispiel interdendritischen Spannungskorrosionsrissen im anisotropen heterogenen Gefüge von Mischnähten, an ihre Grenzen gelangt. In ersten Testreihen wurden bildgebenden Rekonstruktionsalgorithmen zur Bestimmung der Fehlertiefenausdehnung eingesetzt. Bislang konnten keine Verbesserungen der Prüfaussage im Vergleich zur Rissspitzenmethode erzielt werden.

1 Einleitung

1.1 Zielstellungen

Ziel ist es am Beispiel der Ultraschallprüfung von Rohrleitungsschweissnähten zu demonstrieren, dass mit der Phased Array Technik durch Mustererkennung zwischen unbedenklichen Anzeigen, resultierend aus Geometrie oder Gefüge, oder aber sicherheitstechnisch relevanten Anzeigen, infolge betriebsinduzierter Risse, unterschieden werden kann.

Weiterhin soll analysiert werden, inwieweit die zur Vermessung der Fehlertiefenausdehnung betriebsinduzierter Risse vielfach angewandte Rissspitzentechnik auch bei komplexeren Fehlermorphologien und Fehlerlagen, wie zum Beispiel interdendritischen Spannungskorrosionsrissen im anisotropen und heterogenen Gefüge von Mischnähten, belastbare Ergebnisse liefert. In diesem Zusammenhang soll untersucht werden, ob durch die Anwendung bildgebender Rekonstruktionalgorithmen eine Verbesserung der Fehlertiefenbestimmung erzielt werden kann.

1.2 Stand der Technik und Problemstellungen

Charakterisierung von Anzeigen durch Mustererkennung

Rohrleitungsschweissnähte in Anlagen enthalten häufig geometrische Reflektoren, wie zum Beispiel Andrehkante und Wurzel, die Ultraschallanzeigen hervorrufen. Im Fall von austenitischen Schweissnähten kommen zu den Geometrieanzeigen noch Gefügeanzeigen aus der Schweissnaht hinzu. Diese geometrie- und gefügebedingten Anzeigen sind unbedenklich und müssen von sicherheitstechnisch relevanten Anzeigen, wie betriebsinduzierten Ermüdungsrissen oder interkristallinen Spannungskorrosionsrissen, unterschieden werden. Auf Basis der Anzeigenamplitude kann eine Unterscheidung nicht durchgeführt werden, da das Reflexionsverhalten der Geometrieanzeigen in vielen Fällen besser ist als das von Rissen.

Im Fall der Ultraschallprüfung von Rohrleitungsschweissnähten konnte das Vorgehen zur Charakterisierung von Anzeigen mittels Mustererkennung in Form von qualifizierten Prüfvorschriften standardisiert werden [1, 2]. Die Standardisierung der Vorgehensweise ist nur möglich gewesen, da die nachzuweisenden Fehlertypen sowie Geometrie und Werkstoff der zu prüfenden Komponenten genau bekannt waren. Das Vorgehen gilt nur für betriebsinduzierte Ermüdungsrisse und Risse infolge interkristalliner Spannungsrisskorrosion in der Wärmeeinflusszone austenitischer Schweissnähte beginnend an der inneren Oberfläche. Im Fall austenitischer Materialien wird zudem vorausgesetzt, dass sich die Risse auf der prüfkopfnahe Seite in der Wärmeeinflusszone der Schweissnaht befinden.

Bestimmung der Fehlertiefenausdehnung - Rissspitzenmethode

Die strukturelle Integrität von Rohrleitungsschweissnähten basiert auf einer durch optimale Konstruktion und Berechnung sichergestellten konservativen Auslegung als auch auf genau quantifizierbaren Grösseninformationen möglicher Fehler.

Die Praxis hat gezeigt, dass die Fehlergrössenbestimmung mit Verfahren, wie Bezugslinien- oder AVG-Methode, welche ausschliesslich auf der Amplitude basierten, nur eine unzureichende Korrelation zu den realen Fehlerabmessungen liefern.

Im Rahmen von Prüfsystemqualifizierungen für Rohrleitungsschweissnähte wurde gezeigt, dass mit der Rissspitzenmethode die Fehlertiefenausdehnung betriebsinduzierter Ermüdungsrisse oder interkristalliner Spannungskorrosionsrisse bestimmt werden kann. Auch hier konnte das Leistungsvermögen der Methodik in praktischen Demonstrationen an repräsentativen Testkörpern vielfach bestätigt werden.

Ebenso wie bei der Charakterisierung ist eine Bestimmung der Fehlertiefenausdehnung bei austenitischen Schweissnähten nur dann sicher möglich, wenn sich die Fehler im Bereich der Wärmeeinflusszone (isotropes Gefüge) auf der prüfkopfnahe Seite der Schweissnaht befinden. Ursache der Einschränkung ist das heterogene, anisotrope Gefüge innerhalb der Schweissnaht, welches die Schallausbreitung in dieser bestimmt. Durch die Streuung an dem stängelkristallinen Gefüge wird das Signal-Rauschverhältnis signifikant verschlechtert. Die ohnehin schon schwachen Beugungsechos der Rissspitzen können leicht im Gefügerauschen untergehen. Dazu kommen Probleme bei der Positionierung des Rissspitzensignals infolge der Schallfeldablenkung. Dies könnte man grundsätzlich durch Berücksichtigung von Anisotropie und Heterogenität korrigieren, da aber gesicherte Informationen über den Schweissnahtaufbau im Feld im Allgemeinen nicht vorhanden sind, ist dies schwierig umzusetzen. Ein weiteres Problem ist, dass zum Beispiel die in Mischnähten auftretenden durch Primärwasser induzierten interdendritischen Spannungskorrosionsrisse eine komplexe Fehlermorphologie mit sehr schlechtem Reflexionsverhalten aufweisen.

2 Charakterisierung von Anzeigen durch Mustererkennung

Am Beispiel der Phased Array Ultraschallprüfung von Rohrleitungsschweissnähten soll erläutert werden, wie man mit Hilfe von Mustererkennung eine Charakterisierung von Anzeigen durchführen kann. Zielstellung ist dabei, zwischen unbedenklichen Anzeigen, resultierend aus Geometrie oder Gefüge, oder aber sicherheitstechnisch relevanten Anzeigen infolge betriebsinduzierter Risse, zu unterscheiden. Die Phased Array Technik bietet im Vergleich zur konventionellen Ultraschallprüfung verbesserte Möglichkeiten zur Charakterisierung von Anzeigen durch Mustererkennung. Im Sektorbild werden die Informationen aller verwendeten Einschallwinkel (Winkelbereich z.B. von 35° bis 70° Transversalwelle) integral dargestellt, was dem Prüfer das Erkennen typischer Anzeigenmuster erheblich erleichtert. Auch bei der mechanisierten Prüfung ergeben sich Vorteile da der Informationsgehalt durch ein Fusionieren der Sektorbilder vervielfacht werden kann.

Die Zielstellung ist es, dem Prüfer im Feld eine Zusammenstellung mit typischen Anzeigenmustern von Fehlern und von Geometrie / Gefüge zur Verfügung zu stellen. Auf Basis dieser typischen Anzeigenmuster, welche in einer Prüfvorschrift zu fixieren sind, muss der Prüfer die Anzeigenbewertung durchführen und entscheiden, ob es sich um unbedenkliche Anzeigen oder sicherheitstechnisch relevante Risse handelt.

Die Definition und Zusammenstellung der typischen Anzeigenmuster erfolgt im Allgemeinen durch aufwendige praktische Versuche an repräsentativen Testkörpern. Dabei ist es wichtig, dass die Testkörper das Prüfobjekt hinsichtlich Geometrie, Werkstoff und Gefüge ausreichend genau widerspiegeln. Zudem müssen die Testkörper Fehler enthalten welche dem aufzufindenden Fehlertyp und der gesuchten Fehlerlage entsprechen. Jüngste Fortschritte in der Leistungsfähigkeit kommerzieller Modellierungsplattformen wie CIVA ermöglichen die vollständige Simulation komplexer Prüfkfigurationen. Dies bietet wiederum die Möglichkeit die Definition und Zusammenstellung der typischen Anzeigenmuster mit Hilfe von Modellrechnungen durchzuführen, was im Allgemeinen deutlich kostengünstiger und schneller erfolgen kann, da man die Herstellung der Testkörper umgeht.

In Abschnitt 2.1 und 2.2 werden am Beispiel der Phased Array Ultraschallprüfung von Rohrleitungsschweissnähten typische Anzeigenmuster von betriebsinduzierten Rissen, Geometrie oder Gefüge aufgezählt. Zudem werden in Abschnitt 2.3 zusätzlich typische Anzeigenmuster von volumenhaften Fehlern benannt, da diese leicht fälschlich als Risspitzenechos interpretiert werden können.

2.1 Typische Anzeigenmuster von Fehlern

Die im Folgenden aufgezählten Anzeigenmuster sind typisch für betriebsinduzierte thermische oder mechanische Ermüdungsrisse und interkristalline Spannungskorrosionsrisse in Rohrleitungsschweissnähten beginnend an der inneren Oberfläche. Im Fall der interkristallinen Spannungskorrosionsrisse müssen sich diese auf der prüfkopfnahen Seite der Schweissnaht in deren Wärmeeinflusszone befinden.

Alle aufgezählten typischen Anzeigenmuster sind nicht als obligatorisch, sondern vielmehr als wesentliche Kriterien zu betrachten, die der Prüfer bei der Bewertung zu berücksichtigen hat.

- Die Anzeigenposition variiert beim Scannen längs zur Anzeige, da Risse, im Gegensatz zu geometrischen Reflektoren, nicht zwingend parallel zur Schweissnaht orientiert sind und da die Rissflächen Facetten aufweisen (Abbildung 1).
- Die Anzeigenamplitude variiert beim Scannen längs zur Anzeige und es können mehrere Anzeigenmaxima festgestellt werden, da die Fehlerflächen von Rissen im Allgemeinen Facetten aufweisen, deren Reflexionsvermögen variiert (Abbildung 1).
- Beim Scannen längs der Anzeige kann ein definierter Start- und Endpunkt festgestellt werden, wobei sich die Anzeigenposition von den üblichen Geometrieanzeigen wie

Wurzel und Andrehkante unterscheidet (Abbildung 1).

- Die Anzeige hat ein gutes Signal zu Rauschverhältnis, da die Risse sich in gut durchschallbarem isotropen Material befinden.
- Im Sektorbild sind bei gleicher Position oberhalb oder auch unterhalb des Fusspunktes der Anzeige (inner Oberfläche) Beugungsechos von der Riss Spitze oder der Rissfläche zu erkennen (Abbildung 1).
- Die Anzeigenamplitude nimmt nicht oder nur geringfügig ab wenn die Einschallebene des Prüfkopfes nicht mehr senkrecht zu Anzeige orientiert ist (Schwenken des Prüfkopfes) da die Fehlerflächen von Rissen im allgemeinen Facetten aufweisen die optimal zum Schallfeld orientiert sind und somit gut reflektieren (Abbildung 2).
- Die Anzeige kann auch mit den grösseren Winkel im Sektorbildbereich nachgewiesen werden, da das Reflexionsvermögen von Rissen bei diesen Auftreffbedingungen im Gegensatz zur Wurzel oder Andrehkante vergleichsweise gut ist (Abbildung 3).
- Die Anzeige lässt sich bei Einschallung aus der Gegenrichtung bestätigen.
- Ist eine zur Koppelfläche hinreichend parallele innere Oberfläche gegeben und wird mit Longitudinalwellen (z.B. Winkelbereich 40° bis 70° , Schrittweite 1°) eingeschallt, können die mitangeregten Transversalwellenanteile ($\sim 20^\circ$ bis 30°) des Prüfkopfes, welche an der inneren Oberfläche in Longitudinalwellen modengewandelt werden, zur Bestätigung des Risses benutzt werden. Dabei ist die Amplitude des Wellenumwandlungsechos (TLdL: Trans-Long-Defekt-Long) ein Indikator für die Risstiefe. Im Allgemeinen resultieren kleine Risse an der inneren Oberfläche in ein schwaches Signal des TLdL Wellenumwandlungsechos während tiefe Risse ein starkes Wellenumwandlungsecho hervorrufen (Abbildung 4).

2.2 Typische Anzeigenmuster von Geometrie und Gefüge

Die im Folgenden aufgezählten Anzeigenmuster sind typisch für Geometrieanzeigen (Andrehkante, Wurzel) und Gefügeanzeigen aus dem heterogenen, anisotropen Schweissnahtgefüge. Wie in Abschnitt 2.1 sind alle aufgezählten typischen Anzeigenmuster nicht als obligatorisch, sondern vielmehr als Entscheidungshilfen zu betrachten, die der Prüfer bei seiner Bewertung zu berücksichtigen hat.

- Die Anzeigenposition befindet sich im Bereich der Wurzel oder der Andrehkante (Abbildung 1). Um dies zu verifizieren ist vor der Prüfung die Geometrie der inneren Oberfläche zu ermitteln, zum Beispiel durch Aufnahme der Querschnittskontur mit einem Senkrechtprüfkopf.
- Beim Abfahren längs der Anzeige kann die Anzeige im Sektorbild immer oder zumindest mit Unterbrechungen an der gleichen Position und mit vergleichbarer Amplitude detektiert werden (Abbildung 1).
- Die Anzeige kann mit den grösseren Winkeln im Sektorbild nicht oder nur noch sehr schlecht nachgewiesen werden, da das Reflexionsvermögen von Wurzel und Andrehkante bei diesen Auftreffbedingungen im Vergleich zu Rissen schlechter ist (Abbildung 3).
- Im Sektorbild sind im Bereich oberhalb oder auch unterhalb des Fusspunktes der Anzeige keine Beugungsechos von Riss Spitze oder Rissfläche zu erkennen (Abbildung 1).
- Die Anzeigenamplitude nimmt deutlich ab wenn die Einschallebene des Prüfkopfes nicht mehr senkrecht zu Anzeige orientiert ist, da Wurzel und Andrehkante vergleichsweise ebene Reflektoren mit hoher Richtwirkung sind und somit schon bei geringer Missorientierung zwischen Reflektor und Einschallebene ein grosser Teil des Wellenfeldes nicht mehr zum Prüfkopf zurück reflektiert wird (Abbildung 2).
- Die durch die Streuung an dem stängelkristallinen Gefüge austenitischer Schweissnähte entstehenden Anzeigen sind in allen Winkelbereichen des Sektorbildes zu erkennen. Die Anzeigenamplitude der Gefügeanzeigen nimmt deutlich ab wenn die Einschallebe-

ne des Prüfkopfes geschwenkt wird.

2.3 *Typische Anzeigemuster von volumenhaften, eingebetteten Fehlern*

Herstellungsfehler welche bei der Basisprüfung übersehen wurden, wie z.B. Poren oder Schlackeeinschlüsse im Volumen, können bei der Wiederholungsprüfung als Rissspitzen von betriebsinduzierten Fehlern interpretiert werden.

Die im Folgenden aufgezählten Anzeigemuster sind typisch für eingebettete volumenhafte Fehler aus der Herstellung wie z.B. Poren oder Schlackeeinschlüsse.

- Die Anzeige hat eine Position im Volumen, es kann kein durch den Winkelspiegeleffekt an der inneren Oberfläche induziertes Fusspunktecho festgestellt werden (Abbildung 5 A).
- Die Anzeige kann im gesamten Winkelbereich des Sektorbildes mit vergleichbarer Amplitude nachgewiesen werden (Abbildung 5 B).
- Die Anzeige kann aus allen Richtungen nachgewiesen werden (Abbildung 5 C).
- Beim Abfahren längs der Anzeige kann nur eine geringe Anzeigenlänge festgestellt werden.
- Die Anzeige kann mit einem Senkrechtprüfkopf gut, das heisst mit einer im Vergleich zu planaren Fehlern grossen Amplitude, nachgewiesen werden (Abbildung 5 D).

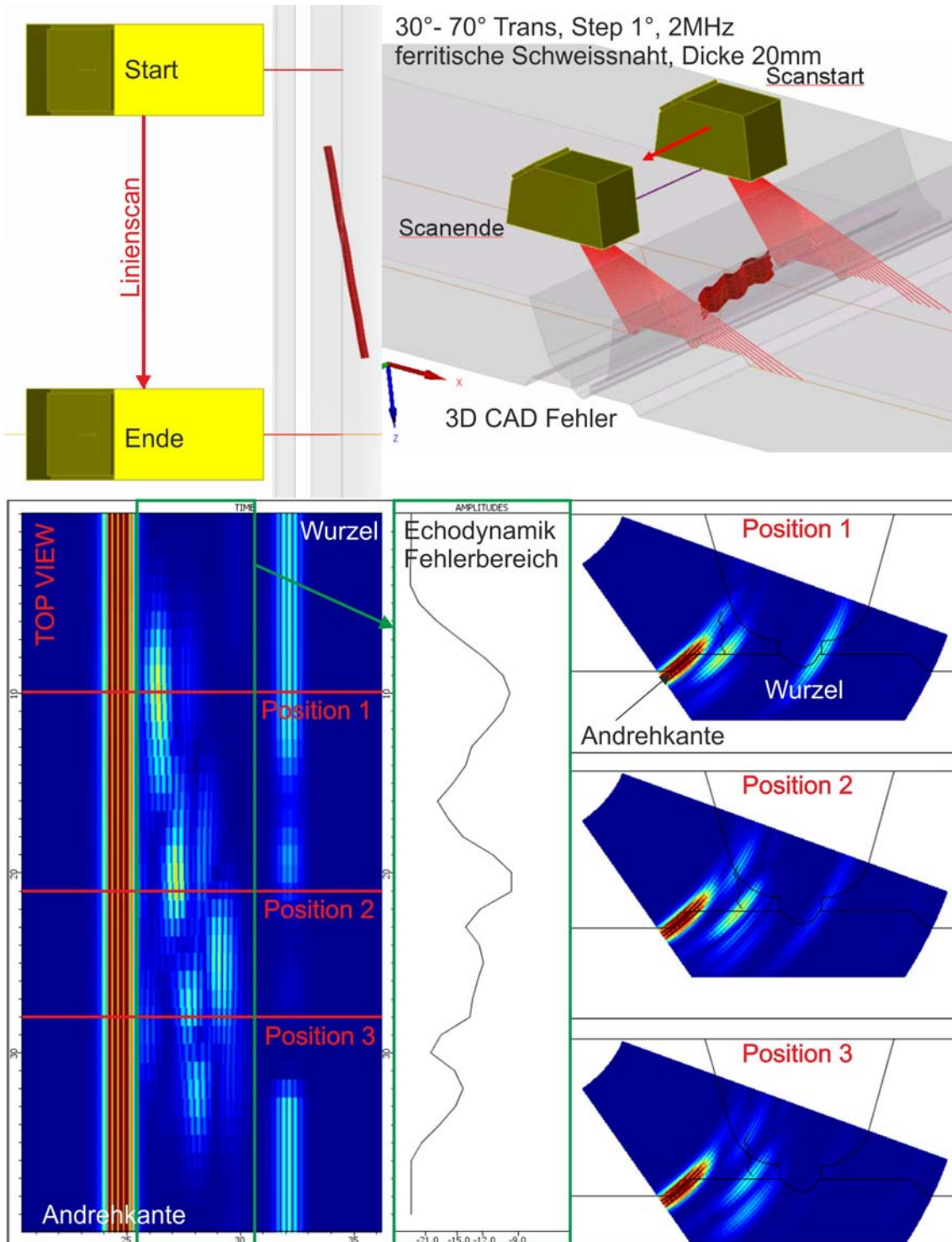


Abbildung 1: Typische Anzeigenmuster von Fehler und Geometrie

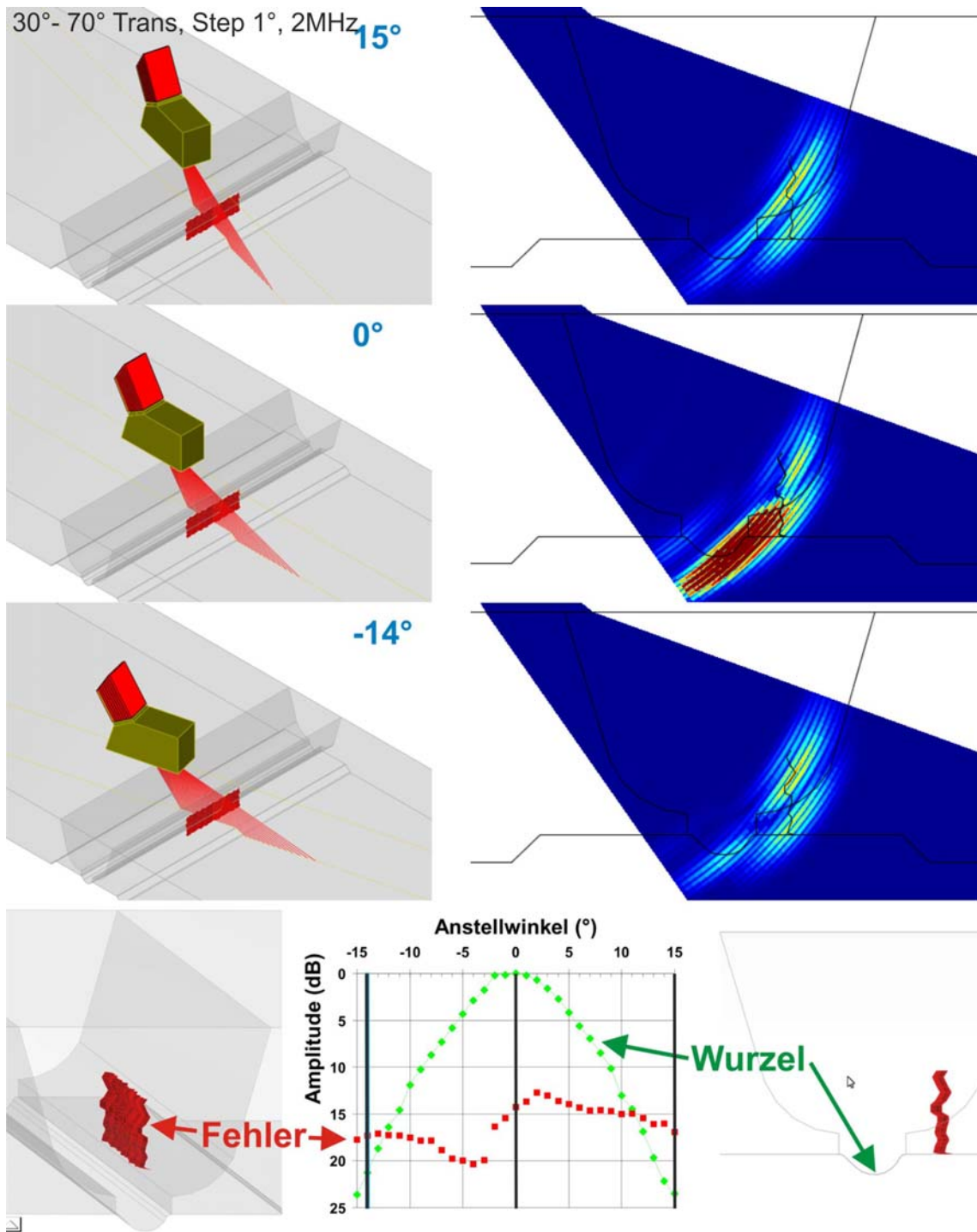


Abbildung 2: Typische Anzeigenmuster von Fehler und Geometrie

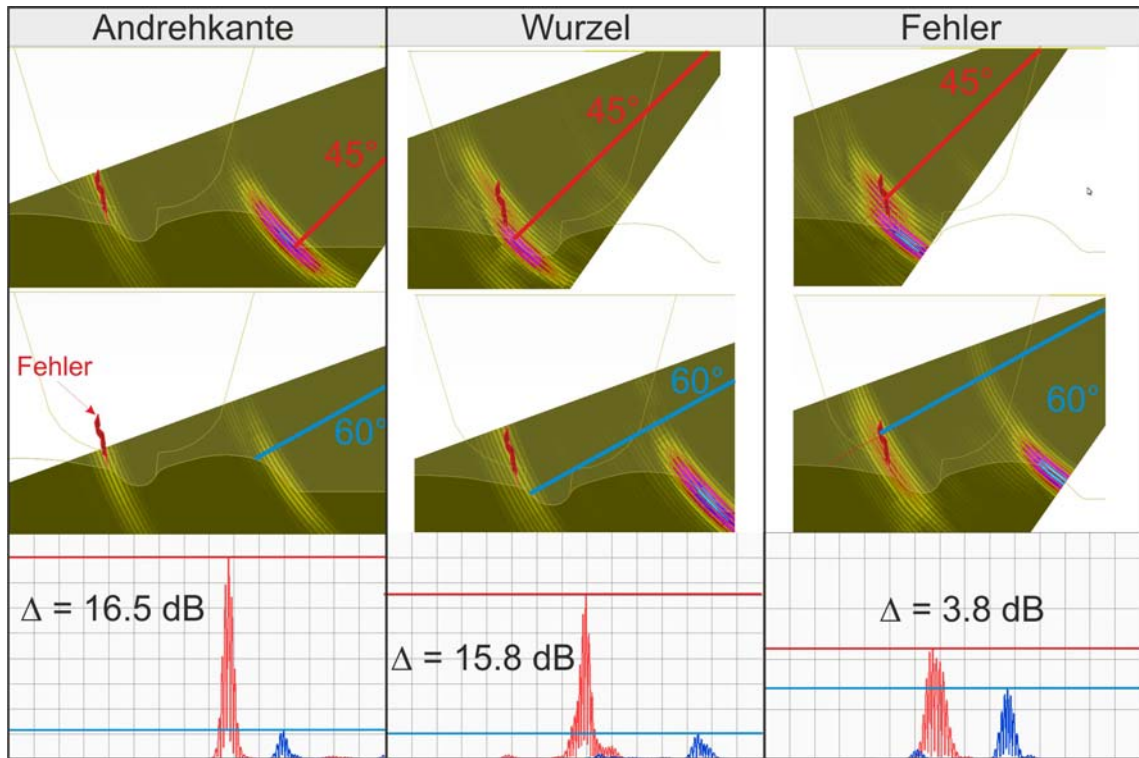


Abbildung 3: Typische Anzeigenmuster von Fehler und Geometrie

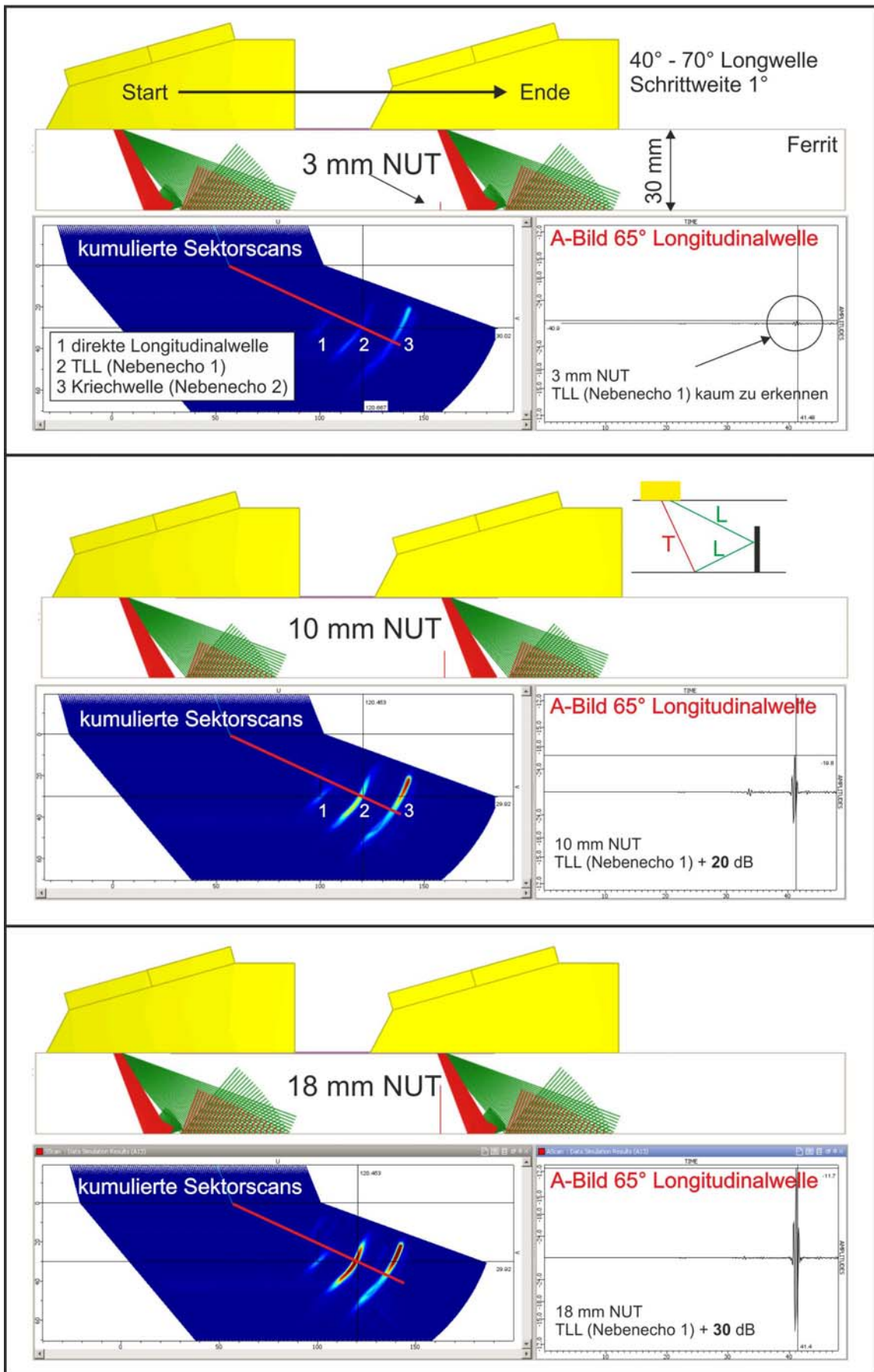
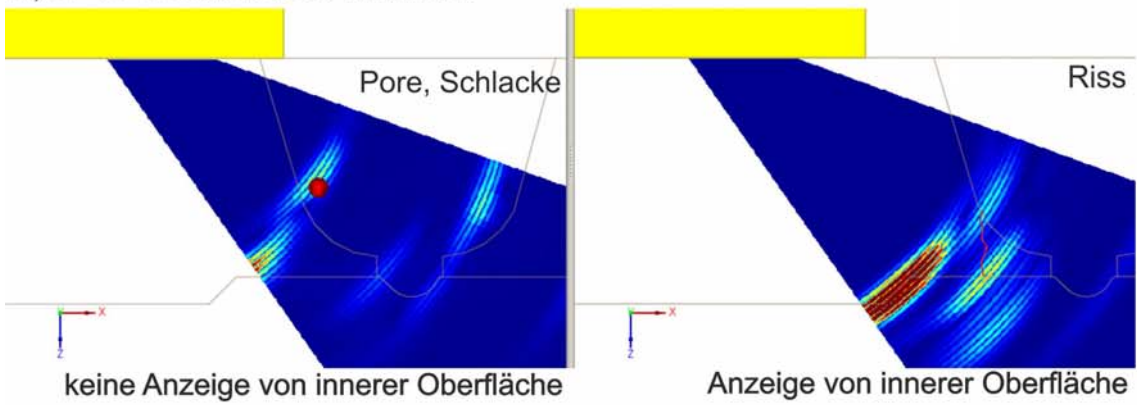
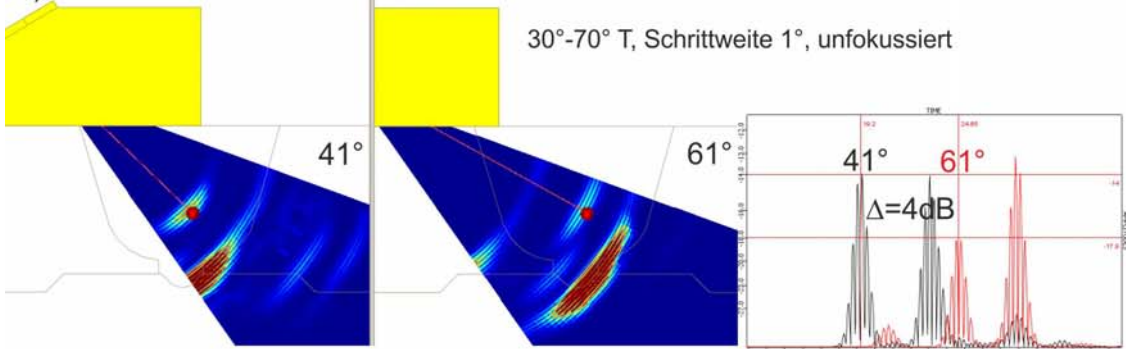


Abbildung 4: Typische Anzeigenmuster von Fehler und Geometrie

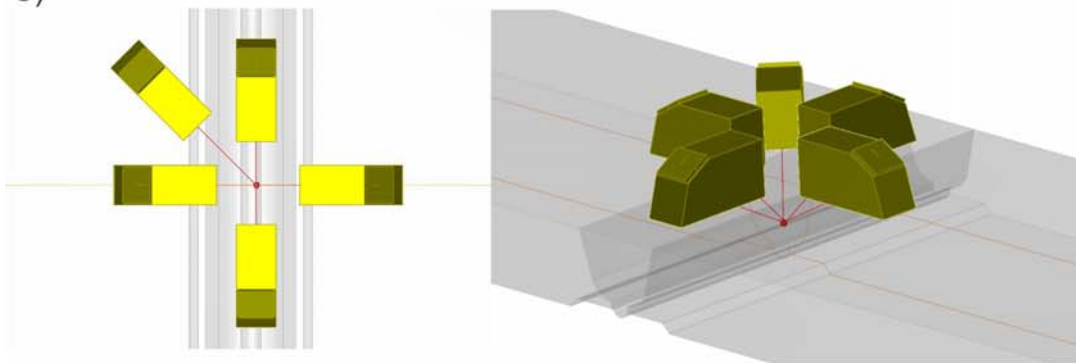
A) 30°-70° T, Schrittweite 1°, unfokussiert



B)



C)



D)

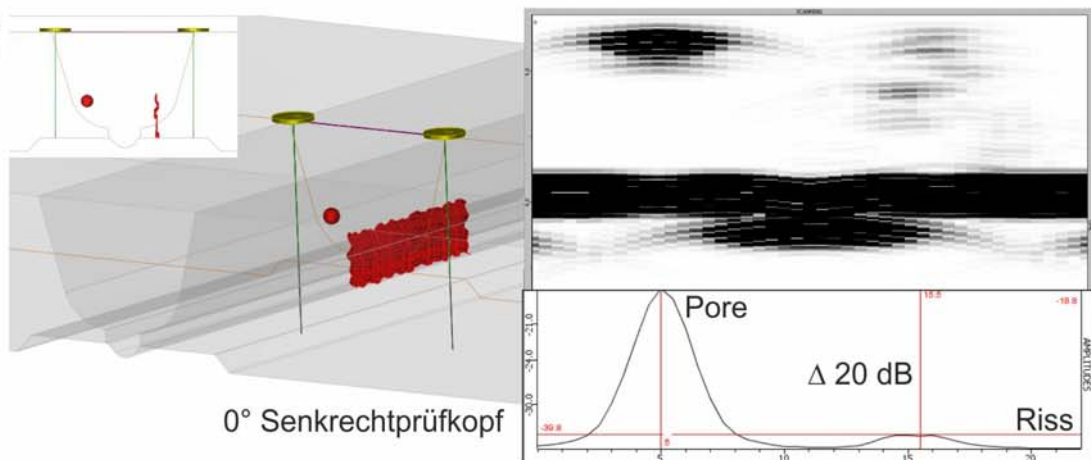


Abbildung 5: Typische Anzeigenmuster von volumenhaften, eingebetteten Fehlern

3 Bestimmung der Fehlertiefenausdehnung – Rissspitzenstechnik

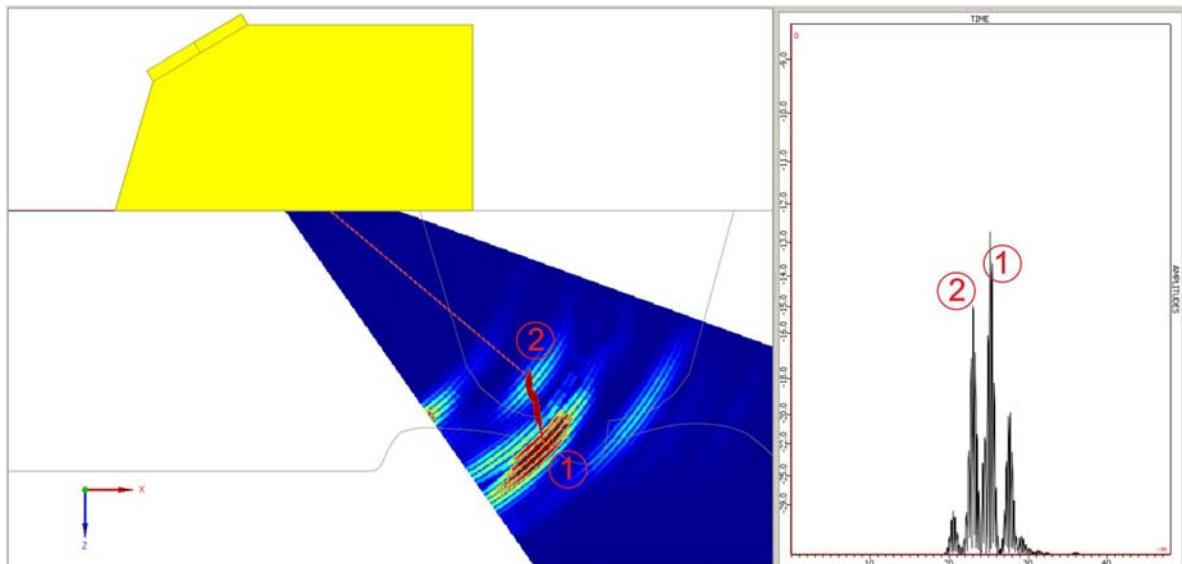
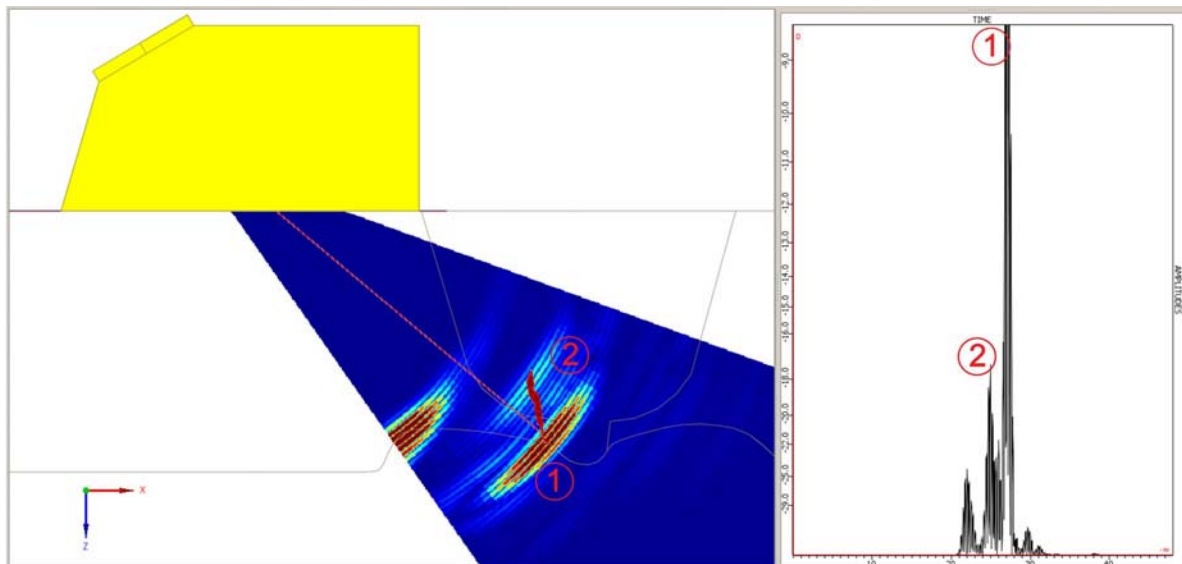
Wurde vom Prüfer eine Anzeige mit Hilfe der im Abschnitt 2 aufgezählten typischen Anzeigenmuster als relevant bewertet, also in diesem Fall als betriebsinduzierter Riss an der inneren Oberfläche, erfolgt im nächsten Schritt die Bestimmung der Längen- und Tiefenausdehnung des Fehlers.

Auf die Längenbestimmung des Fehlers wird nur kurz eingegangen. Die Bestimmung der Fehlerlänge ist immer von der Seite der Schweissnaht durchzuführen, auf welcher sich die Anzeige befindet. Zur Längenbestimmung des Fehlers wird zunächst die Amplitude des Fusspunktes (Winkelspiegel) des Risses optimiert und die maximale Amplitude auf 80% der Bildschirmhöhe eingestellt. Dazu ist das A-Bild mit dem kleinsten Winkel aus dem Sektorbild auszuwählen, in welchem der Fehler noch eindeutig nachgewiesen werden kann. Der Start- bzw. Endpunkt wird nun an die Position gelegt, an welcher die Amplitude auf 20% Bildschirmhöhe abgefallen ist (bei interkristalliner Spannungsrissskorrosion bis das Anzeigenmuster im Rauschen untergeht).

Im Fall der Ultraschallprüfung von Rohrleitungsschweissnähten konnte das Vorgehen zur Risstiefenbestimmung in Form von qualifizierten Prüfvorschriften standardisiert werden (PDI Programm, EPRI NDE Center, 130 Harris Boulevard, Charlotte, North Carolina 28213). Die Standardisierung der Vorgehensweise ist nur möglich gewesen, da die nachzuweisenden Fehlertypen sowie Geometrie und Werkstoff der zu prüfenden Komponenten genau bekannt waren. Die Prüfvorschriften gelten nur für Fehlertiefenbestimmung von betriebsinduzierten Ermüdungsrisen und Rissen infolge interkristalliner Spannungsrissskorrosion in der Wärmeeinflusszone austenitischer Schweissnähte beginnend an der inneren Oberfläche. Im Fall austenitischer Materialien wird zudem vorausgesetzt, dass sich die Risse auf der prüfkopfnahen Seite in der Wärmeeinflusszone der Schweissnaht befinden.

Die Vermessung der Fehlertiefenausdehnung bei der Ultraschallprüfung auf betriebsinduzierte Risse erfolgt im Feld im Allgemeinen mit der Rissspitzenstechnik. In Abbildung 6 ist das Prinzip der Fehlertiefenbestimmung mit der Rissspitzenstechnik am Beispiel eines Ermüdungsrisse in einer 20 mm dicken ferritischen Schweissnaht mit Andrehkante und Wurzel dargestellt. Der in der Simulation verwendete Phased Array Prüfkopf hat 8 Elemente, einen Elementabstand von 1 mm, eine Elementbreite von 9 mm und eine Mittelfrequenz von 2 MHz. Der Vorlaufkeil hat einen Winkel von 38°. Die Parameter entsprechen der im Feld verwendeten Prüfkopf/Vorlaufkeil Kombination: Prüfkopf 115-500-012, Vorlaufkeil 360-141-159 (Hersteller GE-IT). Eingeschallt wird im Winkelbereich von 35° bis 70° mit Transversalwellen (Schrittweite 1°) ohne Fokussierung.

Im ersten Schritt ist die Anzeige der Fehlerbasis, also des durch den Winkelspiegel hervorgerufenen Signals an der inneren Oberfläche, im Sektorbild zu suchen. Dies ist insbesondere bei in der Nähe liegenden geometrischen Reflektoren nicht trivial. Zur Klassifizierung zwischen Fehler und Geometriesignal sind die in Abschnitt 2 diskutierten typischen Anzeigenmuster anzuwenden. Um die Vorteile der Phased Array Technik zu unterstreichen wurde zum Vergleich in Abbildung 6 das 50° A-Bild abgebildet. Das Sektorbild vermittelt dem Prüfer einen räumlichen Eindruck des untersuchten Prüfvolumens, die Muster lassen sich den Reflektoren intuitiv zuordnen während bei der Auswertung mit konventioneller Technik nur ein A-Bild zur Verfügung steht und der Prüfer sehr erfahren sein muss um die Anzeigen zu unterscheiden. Ist die Fehlerbasis gefunden wird das dazugehörige Rissspitzensteckensignal im Sektorbild gesucht. Dies befindet sich im Allgemeinen bei der gleichen horizontalen Bildschirmposition oberhalb der Fehlerbasis. Aus der entsprechenden Laufzeit und dem Einschallwinkel kann nun direkt die Risstiefe berechnet werden.



- ① Fehlerbasis an der inneren Oberfläche - Winkelspiegel
- ② Beugungsecho der Risspitze

Abbildung 6: Prinzip der Fehlertiefenbestimmung mit der Rissspitzentechnik; Prüfkopf: 115-500-012, Vorlaufkeil 360-141-159 (Hersteller GE-IT), 8 Elemente, 1 mm Abstand, Elementbreite 9 mm, 2 MHz, Keilwinkel 38°; 35° - 70° Trans (Schrittweite 1°) keine Fokussierung

3.1 Ermüdungsriss in einer ferritischen Schweissnaht

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse einer Messung an einem ferritischen Schweissnahttestkörper mit Andrehkante und Wurzel im Bereich eines 9 mm tiefen Ermüdungsrisses. Dargestellt sind die fusionierten Sektorbilder (Schrittweite 1 mm). Das Fusspunktecho des Fehlers an der inneren Oberfläche, das Beugungsecho der Rissspitze, Anzeigen von der Fehlerflanke sowie die Anzeigen von Wurzel und Andrehkante sind gut zu erkennen. Unter der Voraussetzung einer guten Ankopplung kann festgestellt werden, dass der Ermüdungsriss in der ferritischen Schweissnaht sehr gut hinsichtlich seiner Tiefenausdehnung quantifiziert werden kann.

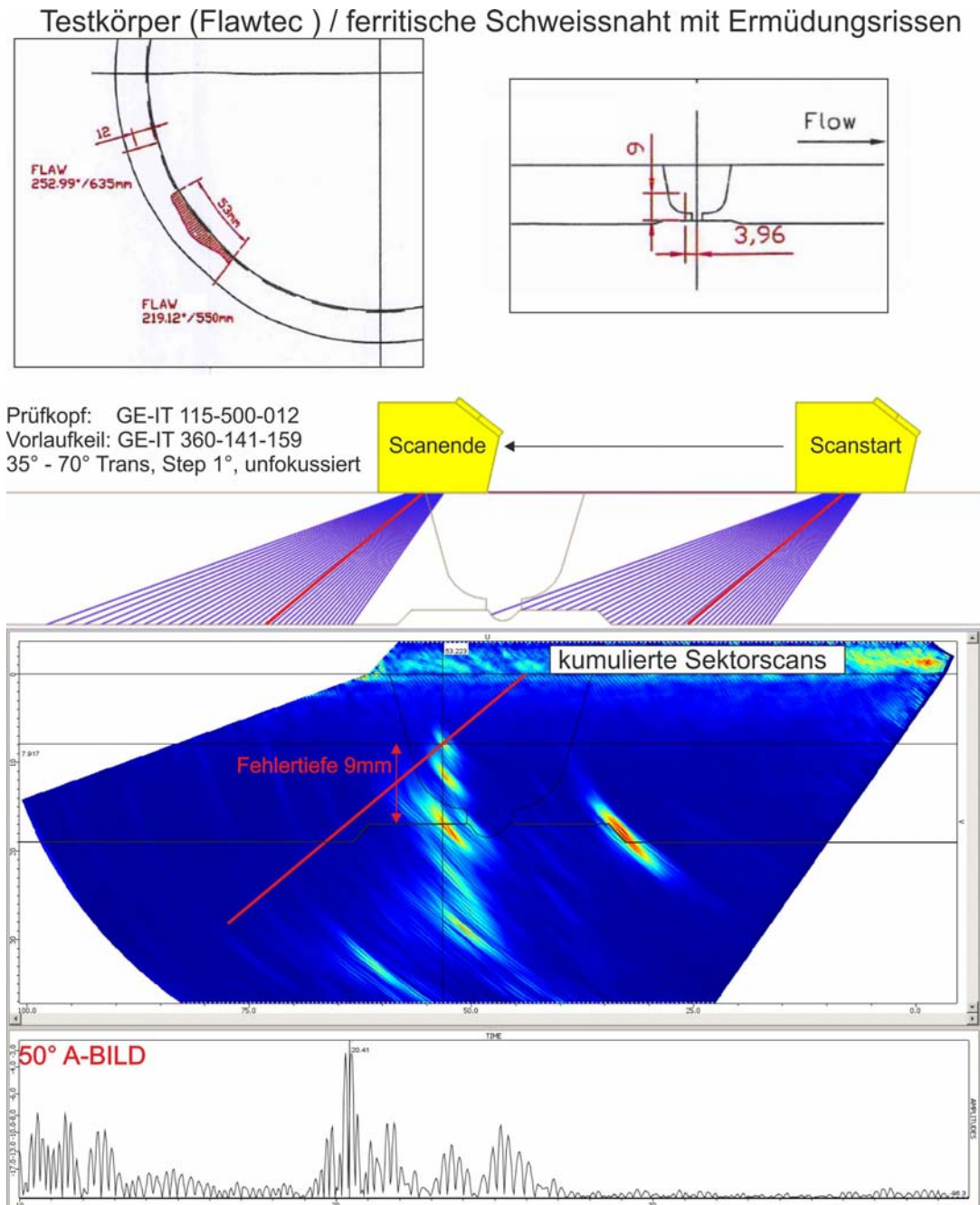


Abbildung 7: Bestimmung der Tiefenausdehnung eines Ermüdungsrisses in einer ferritischen Schweissnaht (Messung), Prüfkopf: 115-500-012, Vorlaufkeil 360-141-159 (Hersteller GE-IT), 8 Elemente, 1 mm Abstand, Elementbreite 9 mm, 2 MHz, Keilwinkel 38°; 35° - 70° Trans (Schrittweite 1°) keine Fokussierung

3.2 Ermüdungsriss in einer Mischnaht

Um festzustellen ob mit der Rissspitzentechnik die Fehlertiefe auch dann sicher bestimmt werden kann, wenn sich der Ermüdungsriss innerhalb anisotropen und heterogenen Gefüges befindet, wurden Messungen an einem in Abbildung 8 dargestellten Mischnaht-testkörper mit einem 18 mm tiefen Ermüdungsriss durchgeführt.

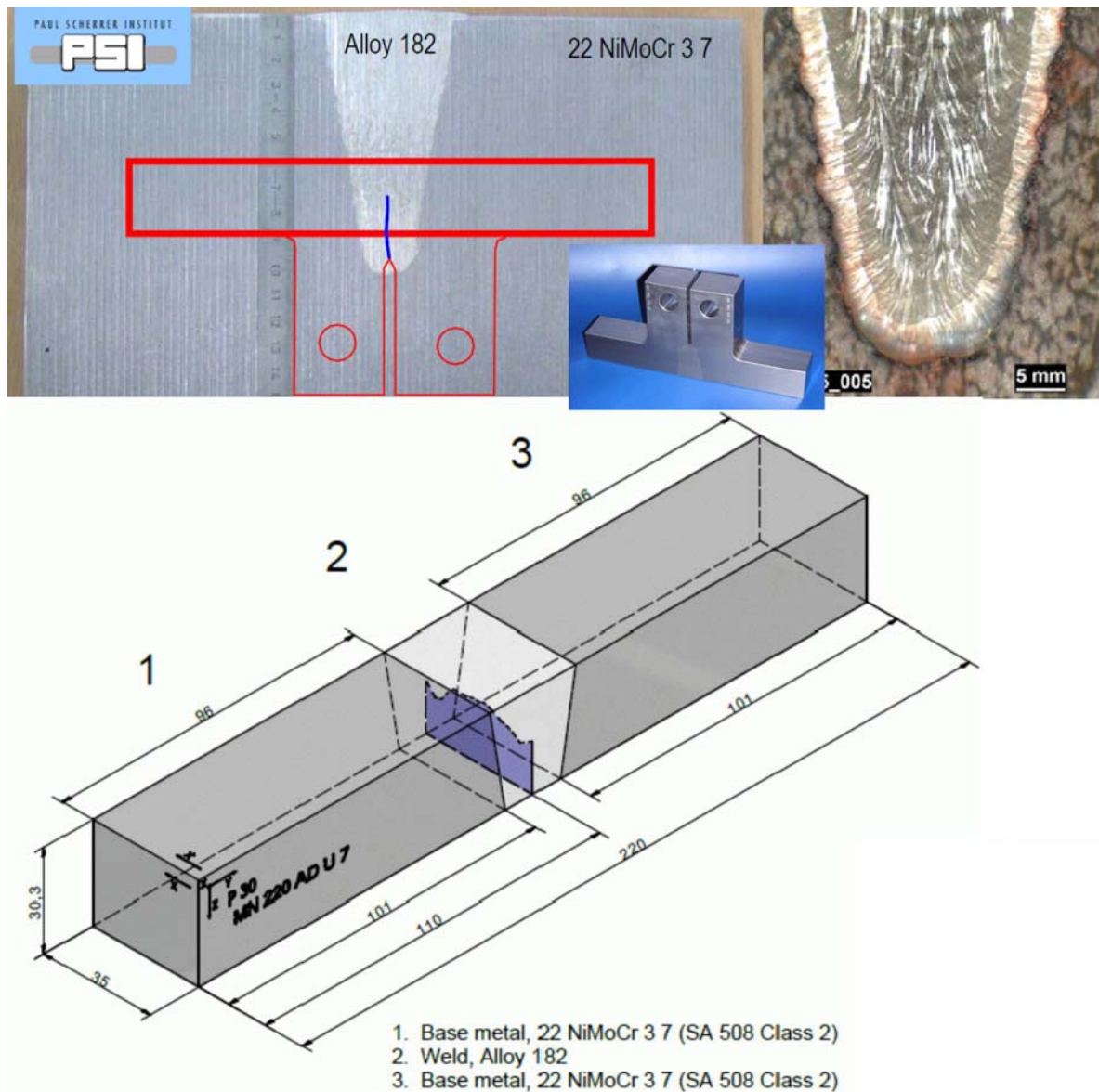
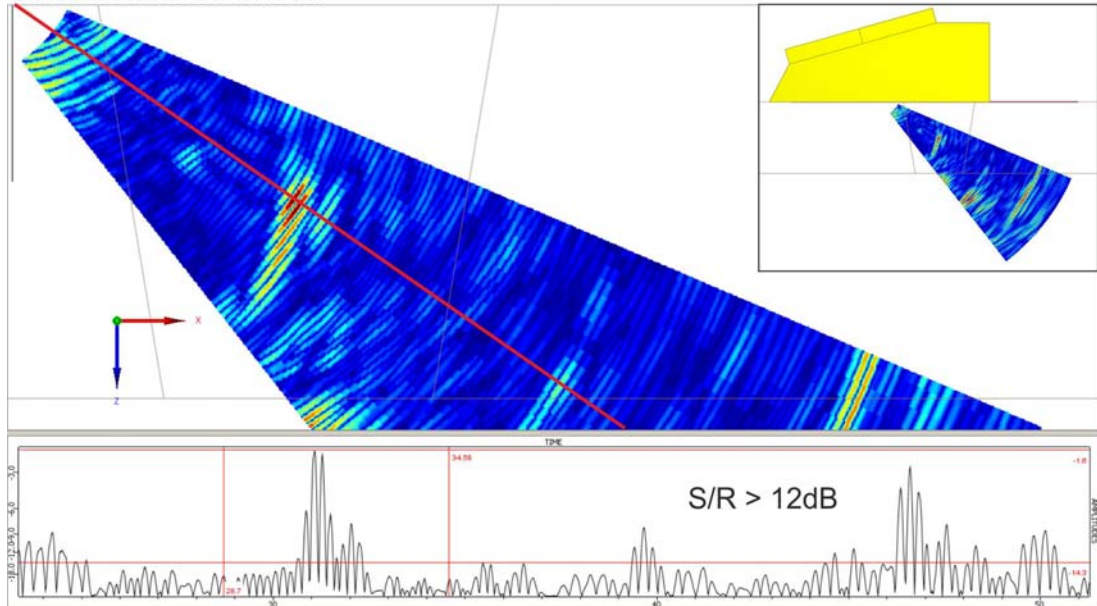


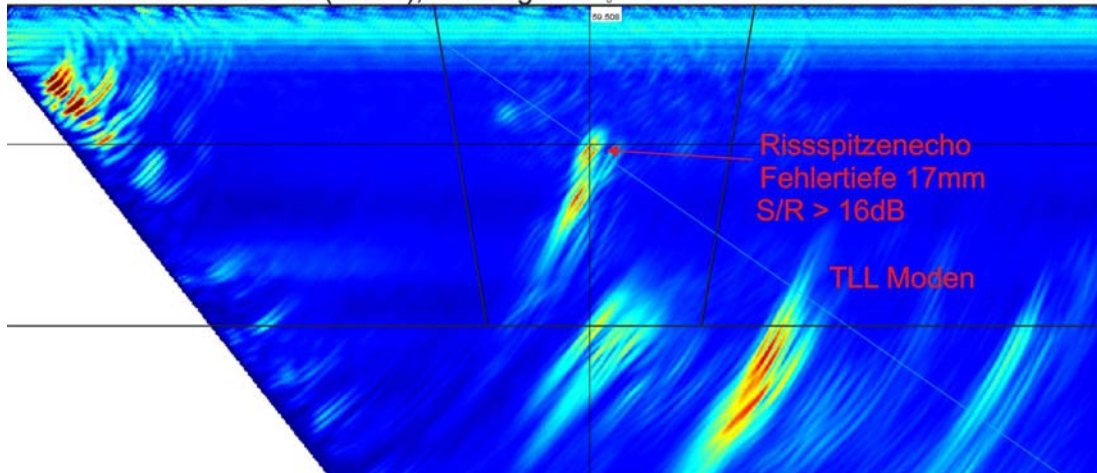
Abbildung 8: Mischnaht Testkörper mit 18 mm tiefem Ermüdungsriss im heterogenen, anisotropen Gefüge

Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Fehlertiefenbestimmung mit der Rissspitzentechnik. Der für die Messungen verwendete Sonaxis Phased Array Prüfkopf hatte 32 aktive Elemente, einen Elementabstand von 1 mm, eine Elementbreite von 10 mm und eine Mittelfrequenz von 2.33 MHz. Der Vorlaufkeil hat einen Winkel von 15.7° (natürlicher Einschallwinkel 41.16° Longitudinalwellen). Eingeschallt wurde im Sektorbereich von 40° bis 70° mit Longitudinalwellen (Schrittweite 1°) von der äusseren Oberfläche mit einer Tiefenfokussierung bei 13 mm.

Sektorscan & 60° A-Bild



kumulierte Sektorscans (mean), Prüfung von links



kumulierte Sektorscans (mean), Prüfung von rechts

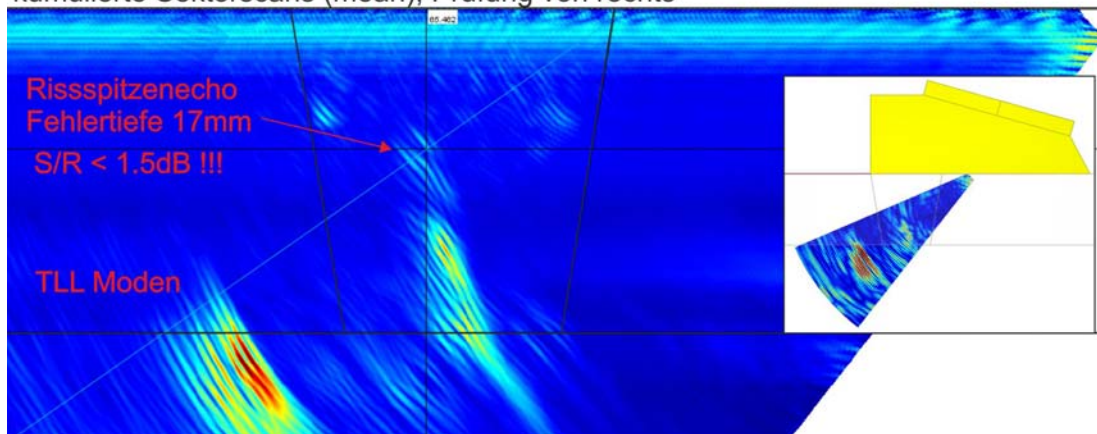


Abbildung 9: Fehlertiefenbestimmung mit Rissspitzenmethode in einer Mischnaht mit 18mm tiefem Ermüdungsriss

Es kann festgestellt werden, dass bei der Prüfung von links das Beugungssignal der Rissspitze des Ermüdungsrisses mit sehr gutem Signal-Rauschabstand nachgewiesen werden kann und somit eine Tiefenbestimmung des Risses möglich ist. Bei Einschaltung von

rechts ist das Rissspitzenignal nur noch mit einem Signal-Rauschabstand von kleiner 1.5 dB nachzuweisen (siehe kumulierte Sektorscans, Prüfung von rechts). Eine korrekte Bestimmung der Fehlertiefe ist nicht mehr gegeben.

Es gilt zu bemerken, dass die Heterogenität und Anisotropie der Schweissnaht nicht berücksichtigt wurde, da im Feld im Allgemeinen Informationen über den Schweissnahtgefügeaufbau auch nicht zu Verfügung stehen. Abbildung 10 zeigt anhand von Schallfeldsimulationen des verwendeten Prüfkopfes, dass der Einfluss von Heterogenität und Anisotropie auf die Ausbreitung von Longitudinalwellen relativ gering ist.

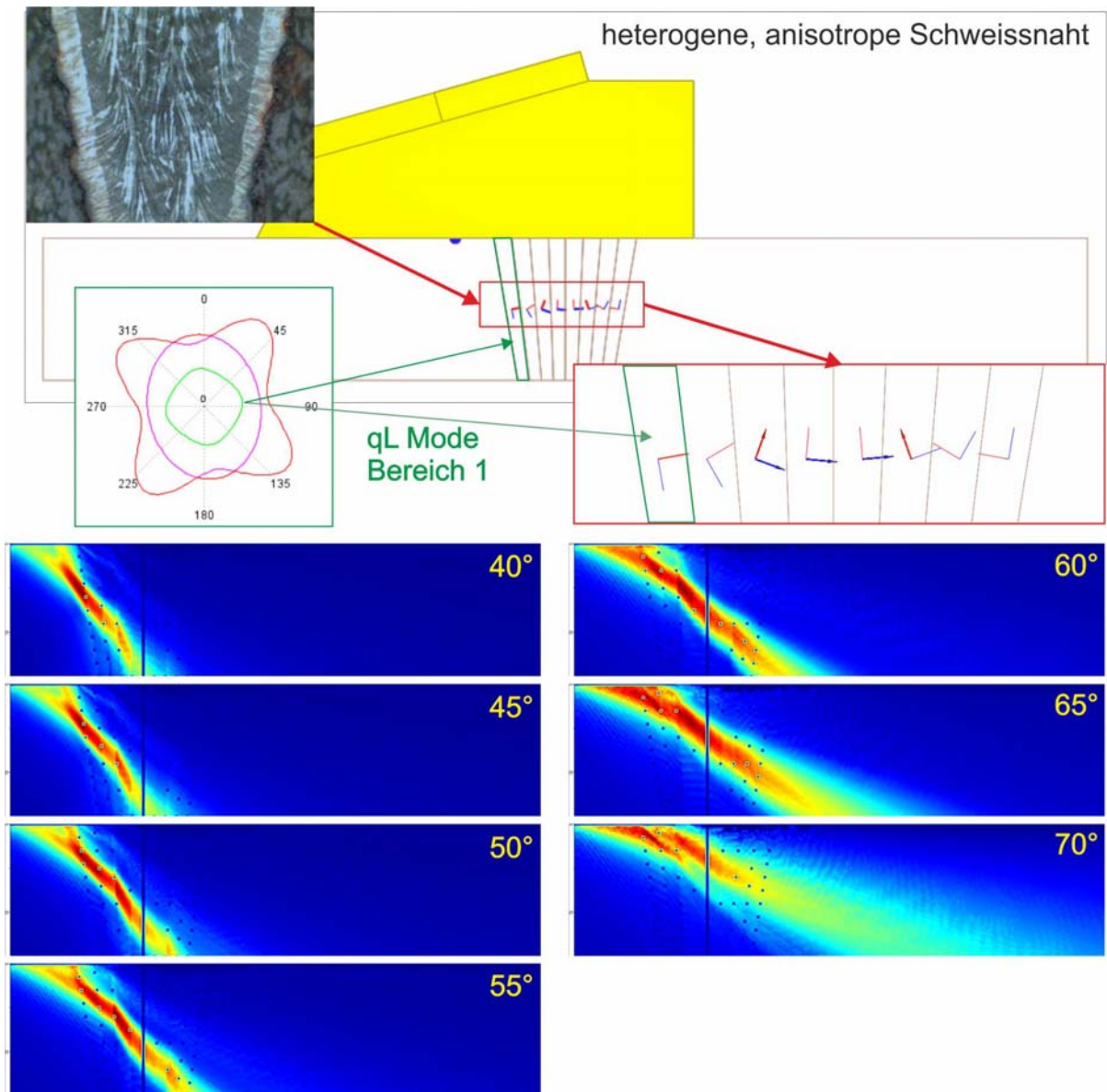


Abbildung 10: Einfluss von Heterogenität und Anisotropie auf die Schallfelder von Longitudinalwellen

3.3 Spannungskorrosionsriss in einer Mischnaht

Abbildung 11 zeigt einen Testkörper mit einem Spannungskorrosionsriss. Die typische Fehlermorphologie ist gekennzeichnet durch eine geringe Rissöffnung, eine vergleichsweise grosse Oberflächenrauigkeit, mannigfaltige Rissverästelungen sowie nichtgerissene Bereiche innerhalb der Rissfläche.

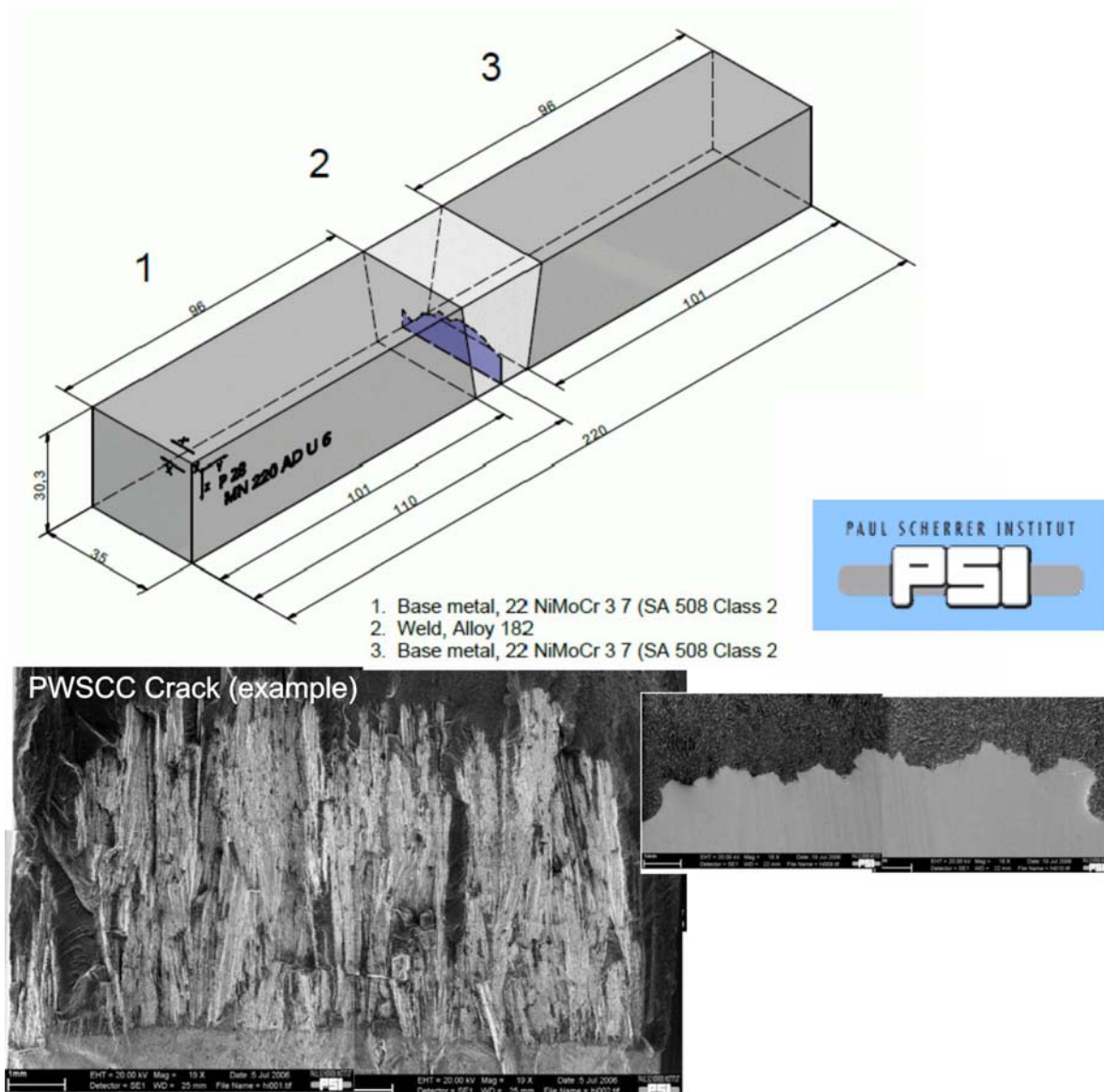


Abbildung 11: Mischnaht Testkörper mit 12 mm tiefem Spannungskorrosionsriss im heterogenen, anisotropen Gefüge

Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse der Fehlertiefenbestimmung des Spannungskorrosionsrisses mit der Rissspitzentechnik. Die angewendete Prüftechnik wurde bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben.

Es ist zu erkennen, dass bei Einschaltung von rechts das Beugungssignal der Risspitze nur noch mit einem sehr kleinen Signal-Rauschabstand nachgewiesen werden kann. Bei Einschaltung von links ist das Rissspitzensignal nicht mehr nachzuweisen. In diesem Zusammenhang gilt es ergänzend zu bemerken, dass die vorliegende Geometrie der Testkörper ideal ist, also eine optimale Ankopplung vorliegt und keine Geometrieanzeigen von der inneren Oberfläche zu erwarten sind. Da dies im Feld im Normalfall nicht gegeben ist, muss davon ausgegangen werden, dass die Beugungsechos der Risspitzen im Feld noch

deutlich schlechter nachgewiesen werden können. Es kann festgestellt werden, dass bei einer komplexen Fehlermorphologie, wie einem Spannungskorrosionsriss in einer Mischnaht, die Rissspitzenmethode an ihre Grenzen gelangt. Eine sichere Bestimmung der Fehlertiefe mit der Rissspitzentechnik ist in dem vorliegenden Fall nicht mehr möglich.

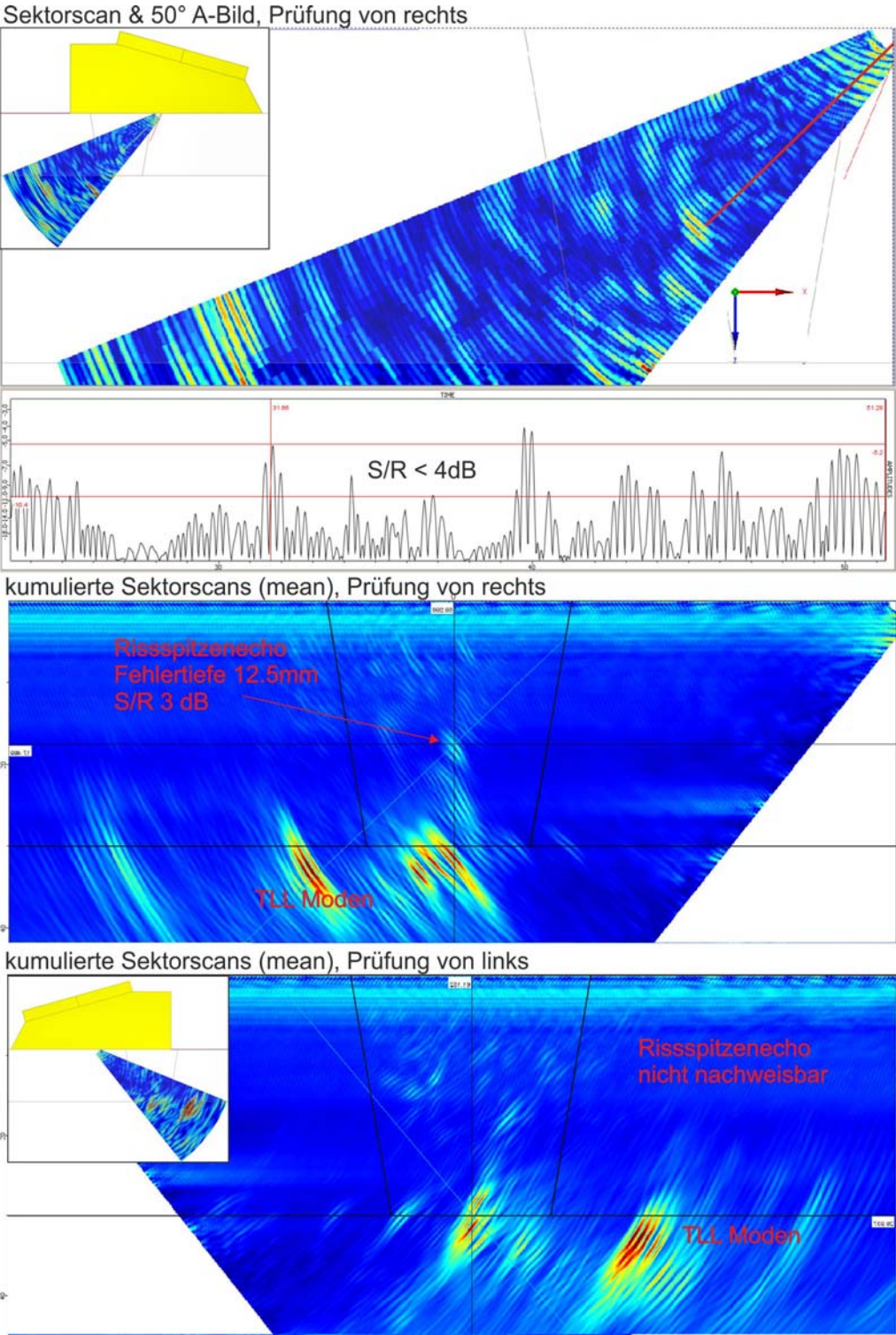


Abbildung 12: Fehlertiefenbestimmung mit Rissspitzenmethode in einer Mischnaht mit 12mm tiefem Spannungskorrosionsriss

4 Anzeigenanalyse durch bildgebende Rekonstruktionsalgorithmen

Ziel war es zu analysieren, inwieweit die Anwendung von bildgebenden Rekonstruktionsalgorithmen zu Verbesserungen bei der Bestimmung der Fehlertiefenausdehnung beitragen können. In den durchgeführten Untersuchungen erfolgte die Datenaufnahme mit der **Full Matrix Capture (FMC)** Methode [3, 4]. Die Rekonstruktion erfolgt mit der in die CIVA Plattform implementierten **Total Focussing Methode (TFM)**.

Das Prinzip des TFM Rekonstruktionsalgorithmus zur Bildgebung ist in der Literatur ausführlich beschrieben [3, 4]. Zusammenfassend kann man sagen, dass an jedem Punkt, eines zuvor definierten Rekonstruktionsbereiches innerhalb der geprüften Komponente, ein Wert berechnet wird, welcher ein Mass für die Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit eines Reflektors an dieser Stelle ist. Im Wesentlichen erfolgt bei der TFM eine kohärente Summation aller empfangenen Signale. Liegt ein Streuzentrum (Reflektor) vor, so entsteht an dieser Position ein Maximum.

Das Prinzip der synthetischen Fokussierung kam in der ZfP erstmals mit dem allseits bekannten SAFT Algorithmus zu Anwendung. Beim SAFT Algorithmus erfolgt die Datenaufnahme durch mechanisches Abscannen der Oberfläche. Die synthetische Fokussierung erfolgt indem zunächst ein Rekonstruktionsbereich innerhalb der geprüften Komponente definiert wird. Der Rekonstruktionsbereich wird in kleine Flächenelemente unterteilt (2D Fall). Ein Flächenelement nach dem anderen wird nun als Position eines potentiellen Streuers betrachtet, für welchen dann die Laufzeiten zu den verschiedenen Prüfkopfcannpositionen berechnet werden. Bei den berechneten Laufzeiten werden aus den A-Bildern (HF) die Amplitudenwerte extrahiert und addiert. Nur für wirkliche Reflektorpositionen erhält man so durch konstruktive Interferenz grosse Amplituden, für andere Positionen wegen destruktiver Interferenz hingegen nicht. Das heisst, jedem Flächenelement wird eine Amplitude zugeordnet, woraus dann das Bild rekonstruiert wird.

Der Unterschied zwischen TFM und SAFT liegt letztendlich nur im höheren Informationsgehalt gegeben durch die FMC Datenaufnahme. Die Zuverlässigkeit der Rekonstruktion hängt direkt von der Qualität der berechneten Laufzeiten ab. Bei Anwendung des in die CIVA Plattform implementierten TFM-Algorithmus werden die Laufzeiten mit den existierenden Schallausbreitungsmodellen berechnet, welche die Berücksichtigung von komplexen Geometrien, Modenumwandlungen als auch Heterogenität und Anisotropie ermöglichen.

4.1 Kalibrierung an ferritischen Testkörpern mit Nuten

Abbildung 13 zeigt für drei Nuten mit 3 mm, 10 mm und 18 mm Tiefe die Ergebnisse der Rekonstruktion für die folgenden Konfigurationen

- den direkten Schallweg der Longitudinalwelle vom Senderelement zum Fehler und zurück zum Empfangselement (LL)
- Schallweg unter Einbeziehung der Reflexion an der inneren Oberfläche: Senderelement zur inneren Oberfläche, Reflexion an der inneren Oberfläche zum Fehler, Reflexion am Fehler zurück zum Empfangselement (LLL).

Es kann festgestellt werden, dass in den rekonstruierten Bildern die Nuten korrekt dargestellt werden.

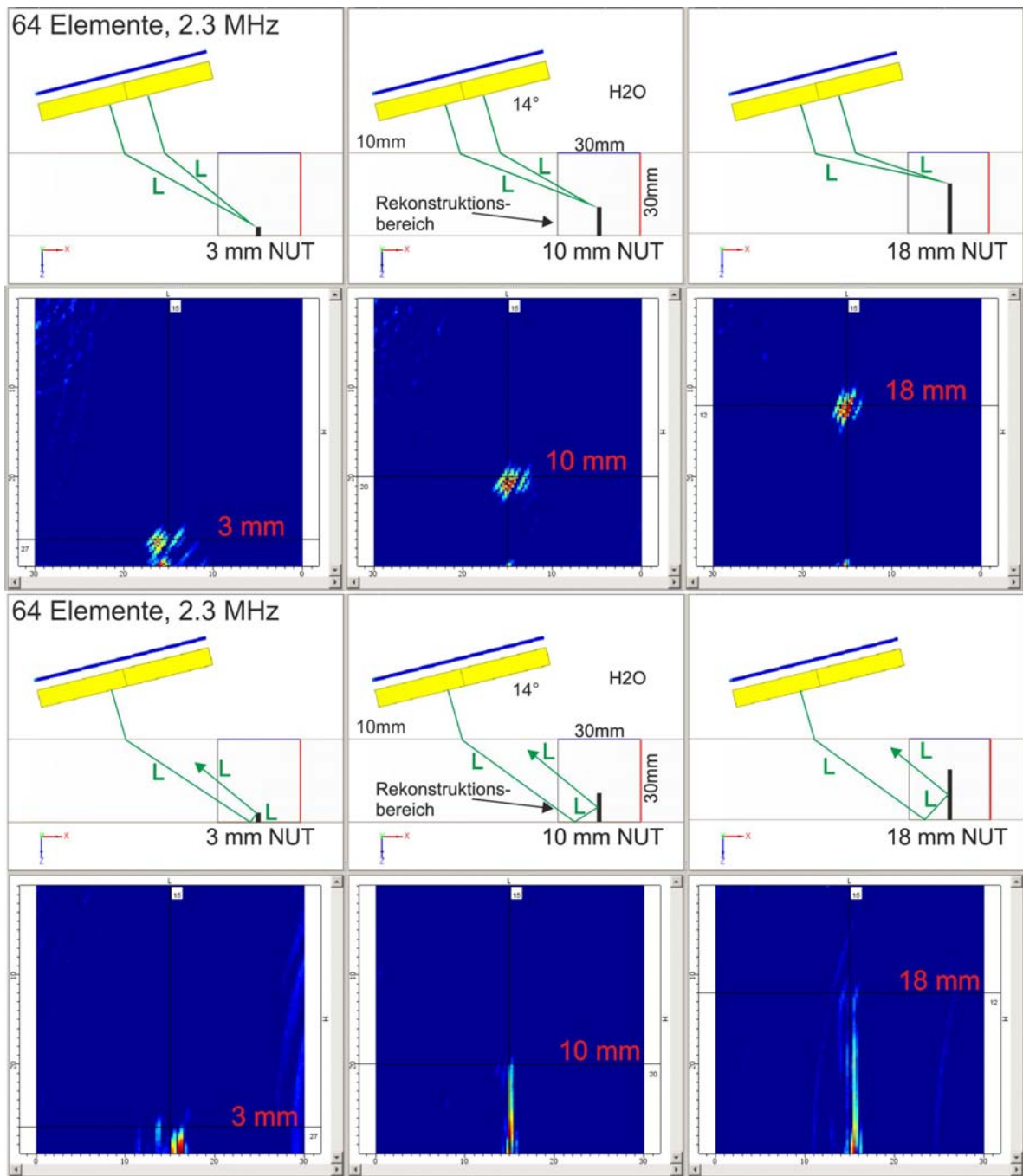


Abbildung 13: TFM Rekonstruktion für LL und LLL Moden, Kalibrierung an ferritischen Testkörpern mit 3, 10 und 18 mm Nuten

4.2 Ermüdungsriss in einer Mischnaht

Abbildung 14 zeigt das Ergebnis der Rekonstruktion für LL- und LLL-Moden für Untersuchungen an dem in Abbildung 8 beschriebenen Testkörper mit einem 18 mm tiefen Ermüdungsriss im anisotropen, heterogenen Gefüge einer Mischnaht. Die Rekonstruktion erfolgt unter Berücksichtigung der Heterogenität und Anisotropie der Mischnaht, welche anhand von Schlißbildern abgeschätzt wurde. In Abbildung 15 sind zum Vergleich die Ergebnisse der Rekonstruktion ohne die Berücksichtigung der Anisotropie und Heterogenität dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass bei der Prüfung von der rechten Seite das Fehlerende, wie schon bei der Rissspitzenmethode, nicht abgebildet werden kann. Bei der Prüfung von der linken Seite konnte in beiden Fällen das Fehlerende visualisiert und die Fehlertie-

FMC & TFM (Annahme: isotrop, homogen)
Rekonstruierte Moden: LL, LLL
Testkörper: L x B x H = 220 x 35 x 30; Mischnaht: Alloy 182
Fehlermorphologie: Ermüdungsriss

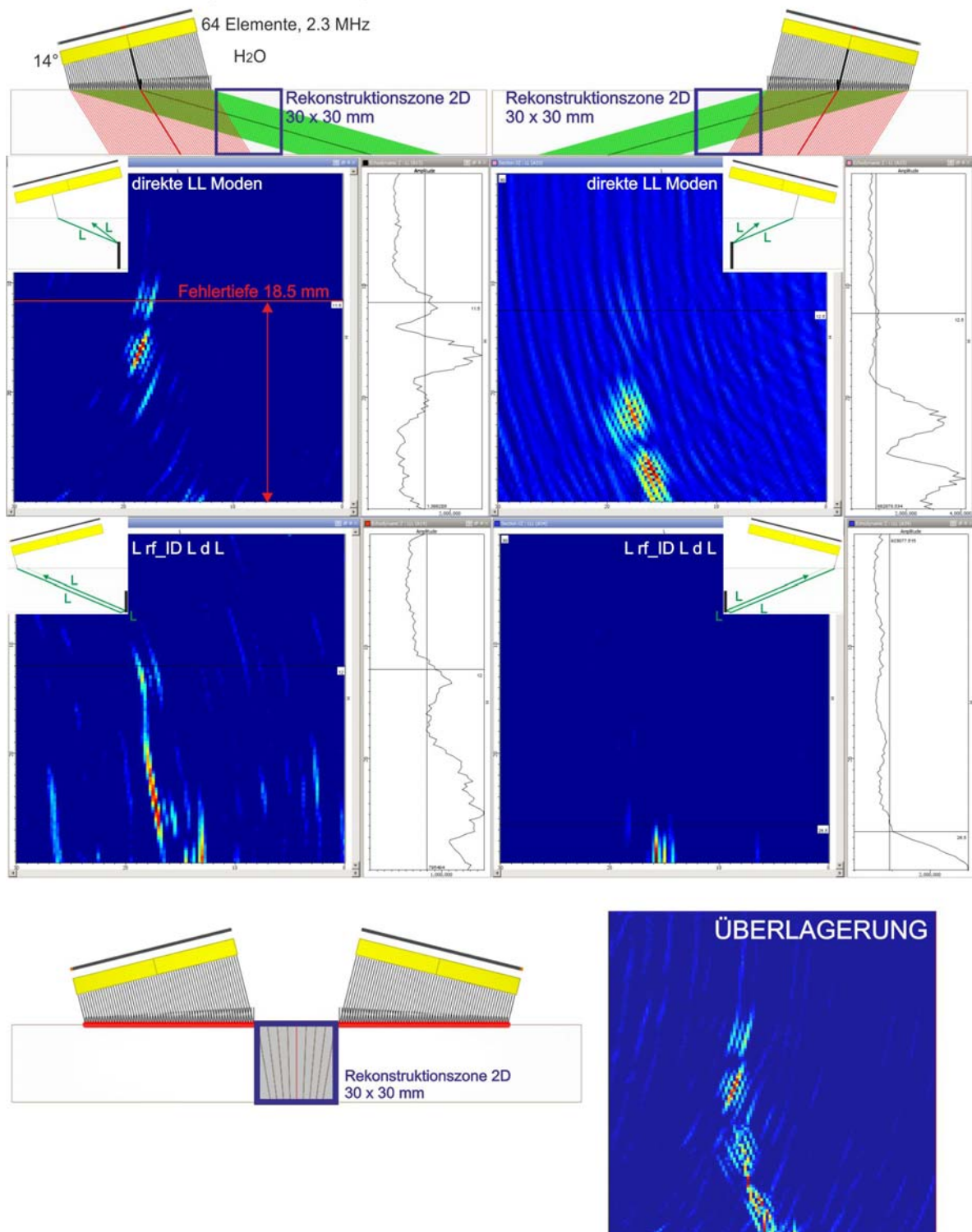


Abbildung 15: TFM Rekonstruktion für LL- und LLL-Moden in einer Mischnaht mit 18 mm tiefem Ermüdungsriss, ohne Berücksichtigung von Heterogenität und Anisotropie

4.3 Spannungskorrosionsriss in einer Mischnaht

Abbildung 16 zeigt das Ergebnis der Rekonstruktion für LL und LLL Moden für Untersuchungen an dem in Abbildung 11 beschriebenen Testkörper mit einem 12 mm tiefen Spannungskorrosionsriss im anisotropen, heterogenen Gefüge einer Mischnaht. Die Rekonstruktion erfolgte ohne Berücksichtigung der Heterogenität und Anisotropie der Mischnaht.

Es kann festgestellt werden, dass bei einer Prüfung von rechts das Ende des Spannungskorrosionsrisses nicht abgebildet werden kann. Bei einer Positionierung des Prüfkopfes links von der Schweissnaht kann das Ende des Spannungskorrosionsrisses visualisiert werden, jedoch mit schlechterem Signal-Rauschabstand im Vergleich zum Ermüdungsriß. Durch die Überlagerung der rekonstruierten Bilder ist der Verlauf des Spannungskorrosionsrisses zu erkennen. Auch hier gilt es zu bemerken, dass die vorliegende Geometrie der Testkörper ideal ist, also eine sehr gute Ankopplung vorliegt und die Reflexion an der inneren Oberfläche für die LLL Rekonstruktion optimal ist. Eine Verbesserung der Prüfaussage im Vergleich zur Rissspitzenmethode konnte durch die Rekonstruktion nicht erzielt werden. Eine sichere Bestimmung der Fehlertiefe ist in dem vorliegenden Fall nicht möglich.

In Abbildung 17 sind Ergebnisse für die Rekonstruktion basierend auf TLL-Moden dargestellt. Das heisst, genutzt werden in diesem Fall die an der inneren Oberfläche in Longitudinalwellen modengewandelten Transversalwellen, welche dann an der Rissfläche zum Prüfkopf zurück reflektiert werden.

Zum Vergleich wurden die Ergebnisse der Rekonstruktion des Spannungskorrosionsrisses denen des Ermüdungsrisse gegenübergestellt. Es kann festgestellt werden, dass die Tiefe der beiden Risse durch die TLL-Rekonstruktion besser abgeschätzt werden kann. Es gilt zu berücksichtigen, dass die Rekonstruktion basierend auf TLL Moden nur für Fehler ab einer Tiefenausdehnung von ungefähr halber Wandstärke anzuwenden ist, da sonst Artefakte auftreten, die zu möglichen Fehlinterpretationen führen.

FMC & TFM (Annahme: isotrop, homogen)

Rekonstruierte Moden: LL, LLL

Testkörper: L x B x H = 220 x 35 x 30; Mischnaht: Alloy 182

Fehlermorphologie: Spannungskorrosionsriss, Siedewasserreaktor

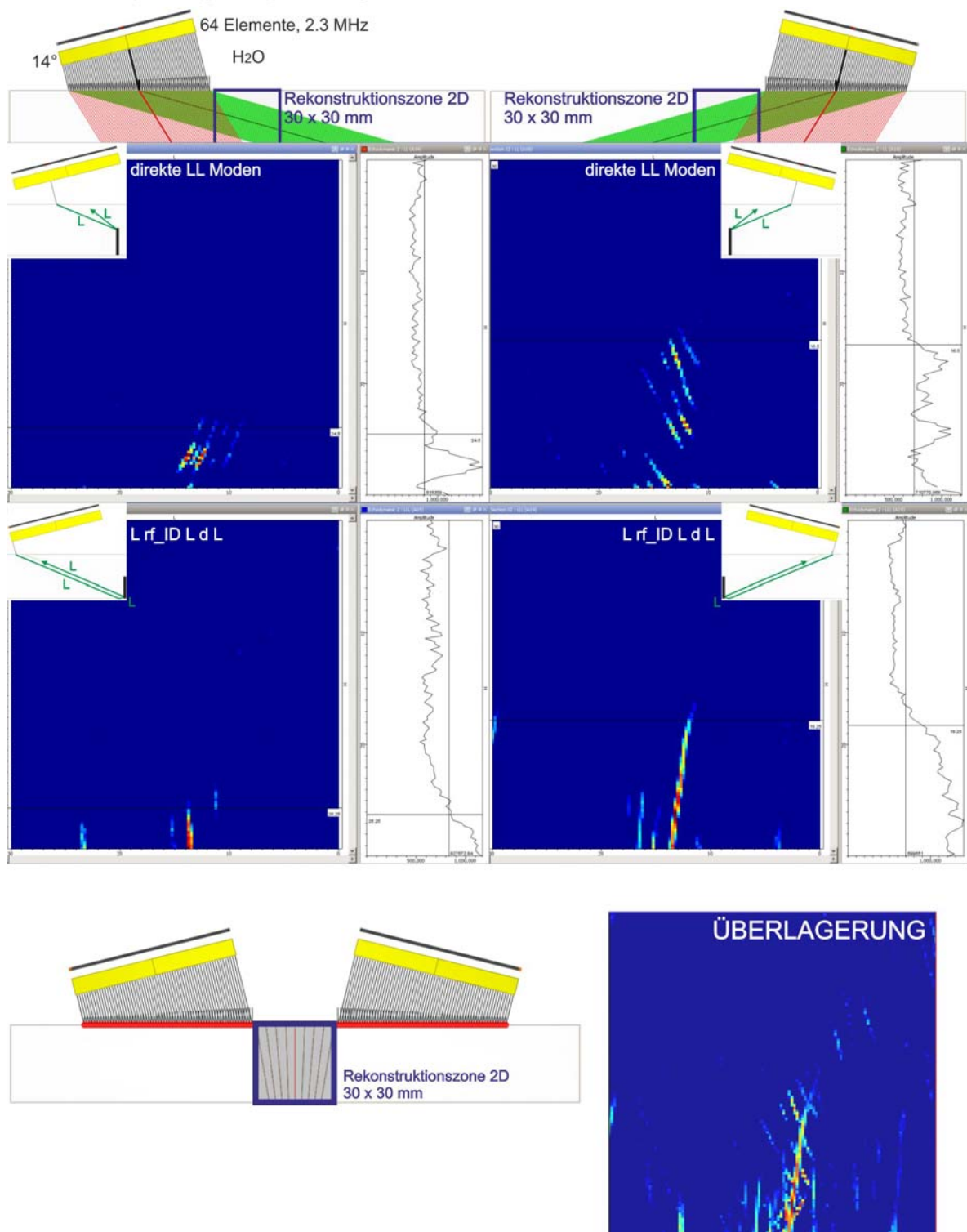
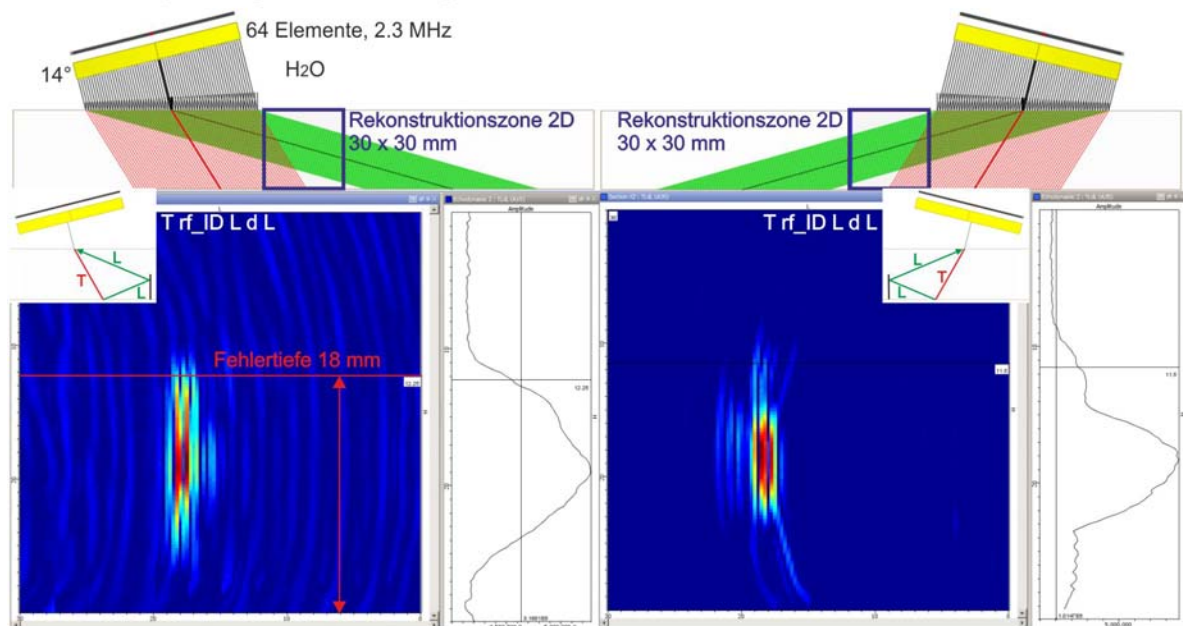


Abbildung 16: TFM Rekonstruktion für LL- und LLL-Moden in einer Mischnaht mit 12 mm tiefem Spannungskorrosionsriss, ohne Berücksichtigung von Heterogenität und Anisotropie

FMC & TFM (Annahme: isotrop, homogen)
Rekonstruierte Moden: T_{rf} ID_L d_L L
Testkörper: L x B x H = 220 x 35 x 30; Mischnaht: Alloy 182
Fehlermorphologie: Ermüdungsris



FMC & TFM (Annahme: isotrop, homogen)
Rekonstruierte Moden: T_{rf} ID_L d_L L
Testkörper: L x B x H = 220 x 35 x 30; Mischnaht: Alloy 182
Fehlermorphologie: Spannungskorrosionsriss, Siedewasserreaktor

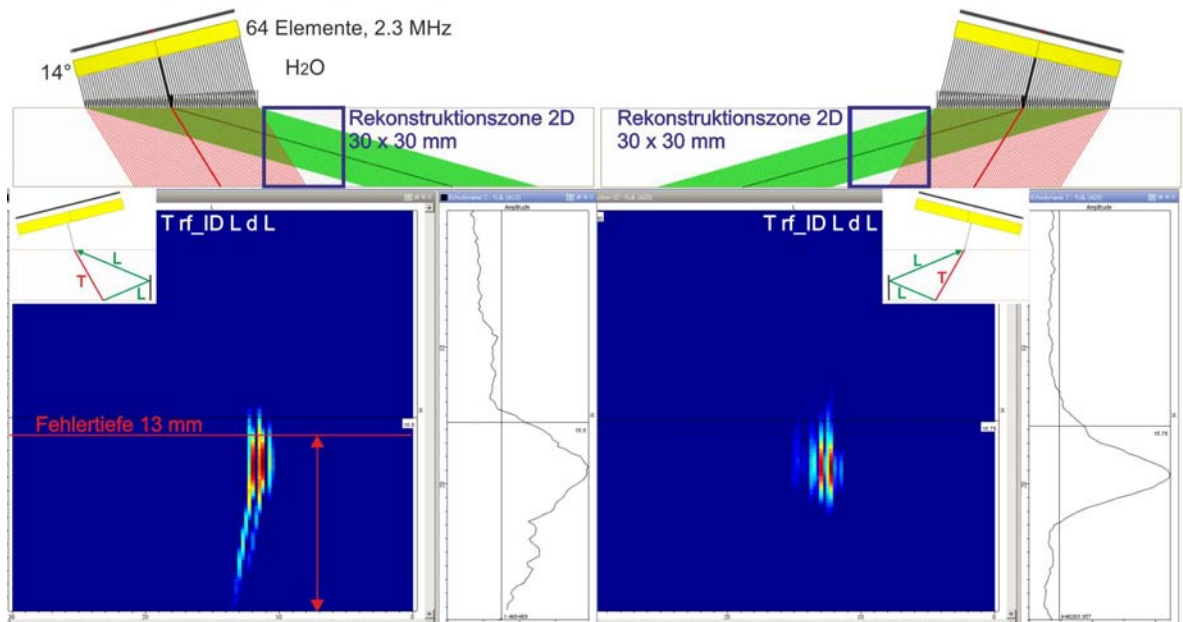


Abbildung 17: TFM Rekonstruktion für TLL-Moden in einer Mischnaht mit 18 mm tiefem Ermüdungsris (oben) und einem 12 mm tiefen Spannungskorrosionsriss (unten), ohne Berücksichtigung von Heterogenität und Anisotropie

5 Referenzen

- [1] Electric Power Research Institute, Nondestructive Evaluation Center, UT Operator Training for planar Flaw Sizing. (1985), EPRI NDE Center, 130 Harris Boulevard, Charlotte, North Carolina 28213.
- [2] L. Delannoy, J. Poirier, P. Hayes, “Manual Phased Array Ultrasonic Technique for Pipe Weld Inspection in Nuclear Power Plants”, 8th Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, 2010, Berlin, Germany.
- [3] P. Calmon, E. Iakovleva, A.Fidahoussen, G.Ribay, S. Chatillon, “ Model based reconstructon of UT array data”, in review in progress in QNDE, vol 28, 888, (2009).
- [4] A.Fidahoussen, P. Calmon, M. Lambert, . Pillard and S. Chatillon, “ Imaging of defects in several complex configurations by simulation-helped processing of ultrasonic array data”, in Review of Quantitative Nondestructive Evaluation Vol. 29.