

Abschlussbericht /

Final Report

Reaktorsicherheitsforschung – Vorhaben-Nr.: 1501370

Reactor Safety Research-Project No.: 1501370

Vorhabens Titel:

Entwicklung einer innovativen Ultraschall-Prüftechnik für den Fehlernachweis und die Größenbestimmung an austenitischen Schweißnähten und Mischschweißnähten im Primärkreis von KKW (vorwiegend Längsfehlerprüfung)

Project Title:

Development of innovative ultrasonic technique for defect detection and sizing on austenitic and dissimilar welds for nuclear power plant components (mainly longitudinal defects)

Autoren / Authors:

Dipl. Ing. Sergey Pudovikov, Dipl. Ing. Friedhelm Walte, Dr. Andrey Bulavinov

Dienststellen der Autoren / Performing Organisation:

Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZfP) Saarbrücken

Berichtsdatum / Publication Date: Mai 2013

Berichts - Nr. / Report – No: 130103-E

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 1501370 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kurzfassung

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens „Entwicklung einer innovativen Ultraschall-Prüftechnik für den Fehlernachweis und die Größenbestimmung an austenitischen Schweißnähten und Mischschweißnähten im Primärkreis von KKW (vorwiegend Längsfehlerprüfung)“ war eine verbesserte Absicherung der Komponentenintegrität durch die zerstörungsfreien Prüfverfahren insbesondere für KKW-Altanlagen im Zusammenhang mit Maßnahmen zur Zustandsbewertung. Im Rahmen des Projektes sollte ein Ultraschall-Prüfverfahren entwickelt werden, das den Fehlernachweis und die Fehleranalyse bei der Ultraschall-Prüfung an austenitischen Schweißnähten im Primärkreis in einem Prüfvorgang mit quantitativen Aussagen zu Fehlergröße,- Art,- Lage ermöglicht.

Als Grundlage des Verfahrens dient die am Fraunhofer IZFP entwickelte Prüftechnik auf der Basis von Gruppenstrahlerprüfköpfen – Sampling Phased Array, oder SPA. Sie basiert auf dem erweiterten SAFT-Algorithmus und gestattet eine schnelle synthetische Fokussierung des Ultraschalls in jedem Punkt des Prüfobjektes innerhalb des Nahfeldes der aufgebauten synthetischen Apertur. Zusammen mit dem Algorithmus der inversen Phasen Anpassung ermöglicht die SPA-Technik die Prüfung und verbesserte Bewertung von Ultraschallanzeigen auch an akustisch anisotropen Werkstoffen. Im Rahmen des Projektes wurde die SPA-Technik für die Prüfung von austenitischen Schweißnähten und Mischverbindungen der KKW-Komponenten erweitert und angepasst. Die Fähigkeiten der neuen Prüftechnik bezüglich des Nachweises von vorhandenen Ungängen und quantitativen Bewertung der Befunde wurde an Testkörpern mit künstlichen und realen Fehlern aus der Testkörperbibliothek der Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart demonstriert und validiert.

Für die Durchführung des Projektes wurde ein Laborprüfsystem für mechanisierte Ultraschalluntersuchungen aufgebaut. Es gestattet die Datenaufnahme und Bearbeitung nach dem SPA-Prinzip an flachen und gekrümmten Objekten (z. B., an Rohren).

Für die ortstreue Rekonstruktion von Ultraschall-Ergebnisbildern wurde ein Ray-Tracing-Algorithmus entwickelt, der die Ausbreitung der elastischen Wellen durch eine austenitische Schweißnaht unter Berücksichtigung der Anisotropie und Inhomogenität des Mediums implementiert. Darüber hinaus wurde im Rahmen des Vorhabens die „Gradient Elastic Constant Descent“-Methode für die Ermittlung der unbekanntenen elastischen Eigenschaften des inhomogenen anisotropen Werkstoffs entwickelt. Die „Sampling Phased Array“-Technik mit inverser Phasen Anpassung anhand der, mithilfe des GECDM-Algorithmus, ermittelten elastischen Konstanten gestattet einen quantitativen Fehlernachweis in austenitischen Schweißnähten mit unbekannter Anisotropie. Die Funktionalität des Ray-Tracing-Algorithmus und der GECDM-Methode wurde durch mehrere Prüfexperimente validiert.

Abstract

The main goal of the research project "Development of innovative ultrasonic technique for defect detection and sizing on austenitic and dissimilar welds for nuclear power plant components (mainly longitudinal defects)" is to enhance the flaw detection for ultrasonic non-destructive testing of nuclear reactor components, where the structural integrity of the components is evaluated for the reliable and safety operating conditions.

In this project an ultrasonic testing method had to be developed, which provides an efficient flaw detection and analysis of ultrasonic signals of austenitic and dissimilar welds, which are major part of the primary circuit of the nuclear reactor assembly. The objective is to assess the size of the defect (flaw), its position and its type through quantitative evaluation of the results without compromising the inspection speed.

The new ultrasonic technique is based on the Sampling Phased Array (SPA) method, developed in the Fraunhofer Institute of Non-destructive Testing (IZFP). The SPA by principle is an advancement of the well-known SAFT algorithm and provides 2D and 3D visualization of the testing results, which served as a strong foundation for this research project. The SPA technique together with Reverse Phase Matching (RePhaMat) makes possible the quantitative ultrasonic testing of anisotropic materials, such as austenitic and dissimilar welds. The developed US method has been validated on the specimens having artificial and natural defects as well.

For the accomplishment of the project, a mechanized ultrasonic testing system is developed based on the phased array technology. The system provides the US testing of plane and round objects (such as pipes) according the SPA principle.

In the research part of the project, the SPA-technique with SPA technique by principle allows implementing the RePhaMat module, which provides the testing and analysis of ultrasonic signals in acoustically anisotropic media (austenitic and dissimilar welds). This module allows us to reliably and efficiently inspect austenitic welds from the nuclear reactor assemblies (ultrasonically). By taking into the account the anisotropy and inhomogeneity of the austenitic weld structure, a ray tracing algorithm for modeling the acoustic wave propagation is developed and implemented through RePhaMat. Moreover, within the bounds of the project the "Gradient Elastic Constant Descent Method", an iterative algorithm, is implemented, which is essential for examination of inhomogeneous anisotropic mediums having unknown properties (elastic constants). The Sampling Phased Array technique with Reverse Phase Matching in addition to GECDM-algorithm determines unknown elastic constants and provides reliable and efficient quantitative flaw detection in the austenitic welds. The validation of ray-tracing algorithm and GECDM-method is achieved through many experiments on test specimens with artificial material flaws.

Abkürzungsliste

3D	– dreidimensional
ASME	– American Society of Mechanical Engineers
AVG	– „Amplitude-Verstärkung-Größe“-Methode
BAM	– Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BMWi	– Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BSH	– Bildschirmhöhe
CAN	– Controller Area Network
DVD	– Digital Versatile Disk
EFIT	– Elastodynamische Finite Integrationstechnik
F&E	– Forschung und Entwicklung
GECDM	– Gradient Elastic Constant Descent Method
GPSS	– Generalisierte Punktquellensynthese
GRS	– Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
KKW	– Kernkraftwerk
KTA	– Kerntechnischer Ausschuss
MPA	– Materialprüfungsanstalt
PA	– Phased Array
PC	– Personal Computer
RAM	– Random Access Memory
SAFT	– Synthetic Aperture Focusing Technique
SEL	– Sender-Empfänger-Longitudinal Winkelprüfkopf
SPA	– „Sampling Phased Array“
TI	– transversal-isotrop
TOFD	– „Time of Flight Diffraction“
US	– Ultraschall
zfP	– zerstörungsfreie Prüfung

Inhalt

1. EINLEITUNG.....	10
2. DEFINITION DER ZIELE UND AUFGABEN.....	13
2.1 MOTIVATION	13
2.2 VORAUSSETZUNGEN ZUR DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS.....	14
2.3 ZIELE UND AUFGABEN DES VORHABENS	15
2.4 BEZUG DES VORHABENS ZU DEN FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN.....	16
2.5 ZUSAMMENHANG MIT VORANGEHENDEN PROJEKTEN	16
2.6 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN FORSCHUNGSSTELLEN.....	17
3. STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK	18
4. PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS.....	21
4.1 ARBEITSPROGRAMM	21
4.2 PROJEKTPARTNER	22
4.3 ZEITPLAN.....	22
5. THEORETISCHE GRUNDLAGEN: AUSBREITUNG DER ELASTISCHEN WELLEN IN EINER INHOMOGENEN AKUSTISCH ANISOTROPEN SCHWEIßNAHT.....	23
5.1 EINFÜHRUNG IN DIE AKUSTISCHE ANISOTROPIE.....	23
5.2 PHASENGESCHWINDIGKEIT, GRUPPENGESCHWINDIGKEIT UND ABLENKWINKEL	26
5.3 AKUSTISCHE EIGENSCHAFTEN EINES TRANSVERSAL-ISOTROPEN MEDIUMS.....	29
5.4 BERECHNUNG DER PHASEN- UND GRUPPENGESCHWINDIGKEITEN IN EINEM TRANSVERSAL-ISOTROPEN MEDIUM MIT VERTIKALER SYMMETRIEACHSE	31
5.5 SCHALLBRECHUNG IN EINER AKUSTISCH ANISOTROPEN SCHWEIßNAHT.....	32
5.5.1 GRAFISCHE DASTELLUNG DES BRECHUNGSGESETZES	33
5.5.2 SCHALLBRECHUNG AN DER GRENZE „GRUNDMATERIAL-SCHWEIßGUT“	37
5.5.3 SCHALLBRECHUNG AN DEN KORNGRENZEN	39
5.5.4 EINIGE BEMERKUNGEN ZUR SCHALLAUSBREITUNG IM ANISOTROPEN SCHWEIßGUT.....	41

6. DAS PRINZIP DER SAMPLING-PHASED-ARRAY-PRÜFTECHNIK MIT INVERSER PHASENANPASSUNG	45
6.1 EINFÜHRUNG IN DIE KONVENTIONELLE PHASED-ARRAY-PRÜFTECHNIK.....	45
6.2 MESSPRINZIP DER „SAMPLING-PHASED-ARRAY“-TECHNIK	46
6.3 DAS PRINZIP DER SYNTHETISCHEN FOKUSSIERUNG DES SPA-VERFAHRENS	47
6.3.1 DAS PRINZIP DES SAFT-ALGORITHMUS.....	48
6.3.2 SAMPLING-PHASED-ARRAY-REKONSTRUKTION EINES SEKTOR-BILDES.....	50
6.3.3 ERSTELLUNG EINES COMPOUND-B-BILDES	53
6.3.4 ERSTELLUNG EINES VOLUMENBILDES.....	54
6.4 DAS PRINZIP DER INVERSEN PHASENANPASSUNG BEI ULTRASCHALLPRÜFUNG VON AKUSTISCH ANISOTROPEN WERKSTOFFEN	56
6.4.1 INVERSE PHASENANPASSUNG IN EINEM HOMOGENEN AKUSTISCH ANISOTROPEN MEDIUM	57
6.4.2 INVERSE PHASENANPASSUNG IN EINEM INHOMOGENEN AKUSTISCH ANISOTROPEN MEDIUM.....	59
6.5 „SAMPLING PHASED ARRAY“ MIT VERTEILTEN APERTUREN	60
7. MODELLIERUNG DER SCHALLAUSBREITUNG IN AUSTENITISCHER SCHWEIßVERBINDUNG	63
7.1 ERSTELLUNG DES SCHWEIßNAHTMODELLS.....	64
7.2 BERECHNUNG DES BRECHUNGSGESETZES AN DEN GRENZEN DER TRANSVERSAL- ISOTROPEN ZONEN DES MODELLS.....	65
7.3 SOFTWARE FÜR SIMULATION DER SCHALLAUSBREITUNG IN EINEM INHOMOGENEN, AKUSTISCH ANISOTROPEN MEDIUM	69
7.3.1 EINGANGSPARAMETER FÜR DIE SIMULATION DER SCHALLAUSBREITUNG DURCH ANISOTROPES MEHR-SCHICHT-MODELL.....	70
7.3.2 PRINZIPIELLE FUNKTIONSWEISE.....	71
7.3.3 PRINZIPIELLER AUFBAU DER SIMULATIONSSOFTWARE	78
7.3.4 SIMULATIONSERGEBNISSE	811
8. ITERATIVE SUCHE VON UNBEKANNTEN AKUSTISCHEN EIGENSCHAFTEN: „GRADIENT ELASTIC CONSTANT DESCENT“-METHODE	83
8.1 GRUNDVORAUSETZUNGEN ZUR ANWENDUNG DER ITERATIVEN SUCHE VON UNBEKANNTEN GRÖßEN AUF BASIS DER SPA-PRÜFTECHNIK	83

8.2	DAS PRINZIP DER ITERATIVEN SUCHE VON AKUSTISCHEN EIGENSCHAFTEN: „GRADIENT ELASTIC CONSTANT DESCENT“-METHODE ANHAND EINES BEKANNTEN REFERENZREFLEKTORS	83
8.2.1	PRAKTISCHER BEDARF DER AUTOMATISCHEN ERMITTLUNG VON UNBEKANNTEN AKUSTISCHEN EIGENSCHAFTEN.....	83
8.2.2	ALLGEMEINES PRINZIP DER ITERATIVEN SUCHE VON UNBEKANNTEN AKUSTISCHEN EIGENSCHAFTEN	84
8.2.3	„DESCENT SEARCH“-FUNKTION	85
8.2.4	MINIMIERUNG DER „DESCENT“-FUNKTION	88
9.	ULTRASCHALLMESSUNGEN AN DEN AUSTENITISCHEN SCHWEIß- UND MISCH-SCHWEIßVERBINDUNGEN MITTELS DER SPA-TECHNIK MIT INVERSER PHASEN-ANPASSUNG UND ITERATIVER SUCHE DER ELASTISCHEN EIGENSCHAFTEN	92
9.1	VERWENDETEN TESTKÖRPER	92
9.2	AUSWAHL DER PRÜFKÖPFE.....	96
9.3	AUFBAU DES SYSTEMPROTOTYPS.....	97
9.3.1	PRÜF- UND AUSWERTESTATION	98
9.3.2	„SAMPLING PHASED ARRAY“-ULTRASCHALLELEKTRONIK OPTUS	99
9.3.3	DREIACHSEN-PRÜFMANIPULATOR.....	100
9.3.4	ROHRMANIPULATOR	100
9.4	SOFTWARE FÜR DIE DATENAUFNAHME, SCHALLAUSBREITUNGSSIMULATION, SPA-REKONSTRUKTION UND AUSWERTUNG DER PRÜFERGEBNISSE	101
9.5	DURCHFÜHRUNG VON ULTRASCHALLMESSUNGEN	103
9.5.1	ERMITTLUNG DER SCHALLGESCHWINDIGKEIT IM GRUNDWERKSTOFF.....	103
9.5.1	DATENAUFNAHME.....	105
9.5.2	REKONSTRUKTION VON ERGEBNISBILDERN	107
10.	PRÜFERGEBNISSE.....	108
10.1	ERGEBNISSE DER VORUNTERSUCHUNGEN DER MPA- STUTTGART.....	108
10.1.1	METALLOGRAPHIE	108
10.1.2	ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG	109
10.2	ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN DES IZFP- SAARBRÜCKEN.....	110
10.2.1	VALIDIERUNG VON ENTWICKELTEN ALGORITHMEN	110
10.2.2	PRÜFERGEBNISSE AN AUSTENITISCHEN TESTKÖRPERN MIT KÜNSTLICHEN FEHLERN.....	120
10.2.3	PRÜFERGEBNISSE AN AUSTENITISCHEN TESTKÖRPERN MIT REALEN FEHLERN.....	124
10.2.4	PRÜFERGEBNISSE AM MISCHNAHT-TESTKÖRPER	128

10.3	ERGEBNISSE IM DETAIL	129
10.3.1	TESTKÖRPER MIT KÜNSTLICHEN REFERENZFEHLERN.....	129
10.3.2	TESTKÖRPER MIT REALITÄTSNAHEN RISSEN	130
10.4	VERGLEICH: SAMPLING PHASED ARRAY TECHNIK UND STANDARDVERFAHREN.	134
10.5	ZUSAMMENFASSUNG DER EINZELERGEBNISSE:.....	134
11.	ERGEBNISSE DES FORSCHUNGSVORHABENS: ZUSAMMENFASSUNG UND	
	AUSBLICK	136
	LITERATURVERZEICHNIS	139
	ANLAGEN	148
ANLAGE 1	TECHNISCHE DATEN DER OPTUS-ELEKTRONIK	148
ANLAGE 2	PRÜFERERGEBNISSE AN AUSTENITISCHEN TESTKÖRPERN MIT KÜNSTLICHEN FEHLERN.....	151
ANLAGE 3	PRÜFERERGEBNISSE AN AUSTENITISCHEN TESTKÖRPER MIT REALEN FEHLERN.....	159
ANLAGE 4	ERGEBNISSE DER VORUNTERSUCHUNGEN DER MPA- STUTT GART	177

1. Einleitung

Zum Nachweis der Gebrauchseignung der Schweißverbindungen gehören unter anderem auch zerstörungsfreie Prüfungen. Diese Prüfungen sind Teil der Herstellungsvorschriften zum Nachweis der Fertigungsqualität und sind als wiederkehrende Prüfungen im Rahmen von Wartungsarbeiten durchzuführen, um betriebsbedingte Minderungen der Gebrauchseignung auszuschließen. Insbesondere für Primärkreis-Komponenten sind in den Regelwerken detaillierte Prüfvorschriften entwickelt worden, die mit hoher Empfindlichkeit jeden denkbaren Fehler nachweisen. Beispielhaft seien das KTA-Regelwerk und der ASME-Code zitiert [1, 2]. Die hohe Empfindlichkeit und der Umfang der Prüfungen sollen gewährleisten, dass die nachweisbaren Materialungängen wesentlich kleiner sind, als die unter den Lastbedingungen kritischen, d.h. zum Versagen der Komponenten führenden Fehler.

Diese hohen prüftechnischen Anforderungen sind derzeit für austenitische und Mischnähte nur bedingt erreichbar. Gründe liegen zum einen in der Neigung zur Grobkörnigkeit des Grundwerkstoffes (verstärkte Schallschwächung), zum anderen im Erstarrungsgefüge des Schweißgutes, das sich durch eine akustische Anisotropie bemerkbar macht und den Schallstrahl verformt.

Während seit längerem, durch optimierte Herstellungsprozesse, eine für die Prüfbarkeit hinreichende Feinkörnigkeit des Grundwerkstoffes gegeben ist [3], bleibt trotz allem schweißtechnischen Fortschritte [4] die Prüfbarkeit des Schweißgutes eingeschränkt.

Im Zuge des Anlagenbetriebes mussten immer wieder Fertigungsfehler und betriebsbedingte Fehler festgestellt werden. Beispielhaft sei die interkristalline Spannungsrisskorrosion genannt, die vor allem im sensibilisierten Grundwerkstoff im Nebennahtbereich auftrat sowie Fertigungsfehler, die bei der Fertigungsprüfung, aber auch bei wiederkehrenden Prüfungen nicht gefunden oder nicht korrekt bewertet wurden. Der Auszug aus einer umfangreichen Literatur zu dieser Thematik vermittelt einen Eindruck über die Aktivitäten, die durch Fehler in austenitischen Nähten und Mischverbindungen ausgelöst wurden [5, 6, 7, 8].

In Deutschland werden seit 1975 sicherheitsrelevante Ereignisse in Kernkraftanlagen nach bundeseinheitlichen Kriterien gemeldet [9]. Meldepflichtige Ereignisse werden im

Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durch die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) sicherheitstechnisch bewertet. Im Zitat [10] wird zu Rissbefunden in einer Mischnaht festgestellt, dass „die Bedeutung des Ereignisses darin lag, dass ein aus der Fertigung bestehender Qualitätsmangel im Rahmen einer Sonderprüfung nicht erkannt wurde. Die im Jahre 1992 an dieser Stelle durchgeführte Ultraschallprüfung wurde im Ergebnis sowohl vom Prüfer als auch vom Sachverständigen falsch interpretiert. Insgesamt ist somit dieses Ereignis als ein Mangel in der Qualitätssicherung zu bewerten“.

Schweißverbindungen in austenitischen Stählen, bzw. Mischschweißverbindungen, gehören in Bezug auf die Ultraschallprüfung zu den „schwerprüfbar“ Werkstoffen. Bei dem Schweißprozess entsteht eine ausgeprägte Materialtextur, die die Richtungsabhängigkeit der akustischen Eigenschaften hinsichtlich Schallgeschwindigkeit, Polarisation und Modenkongressionseffekten verursacht [11]. Dieses Phänomen, bekannt als akustische Anisotropie, bedingt eine Abweichung der Ausbreitungsrichtung von Ultraschallwellen von dem gewünschten Einschallwinkeln. Dies kann in der Folge zu einer falschen Bewertung von Ultraschallanzeigen führen.

Für ferritische Schweißnähte existieren vergleichsweise überschaubare Regeln für die Ultraschallprüfung, die seit vielen Jahren in der Prüfpraxis angewendet werden. Für austenitische Schweißnähte lassen sich solche Regeln nicht aufstellen. Der Grund liegt darin, dass es keine „typische austenitische Schweißnaht“ gibt. Während des Schweißprozesses bilden sich im Schweißgut Stengelkristalle, deren Wachstumsrichtung in der Regel durch die Richtung der Wärmeableitung oder auch der Erdanziehungskraft bestimmt ist. Die Schallausbreitung durch das Schweißgut hängt von der Textur und physikalischen Eigenschaften des Gefüges ab, die von Naht zu Naht sehr unterschiedlich sein können. Aus diesem Grund, es ist nicht möglich, die optimalen Prüfparameter (Prüffrequenz, Anzahl und Art der Prüfköpfe, deren Einschallwinkel und Wellenart usw.) fest vorzugeben.

Schweißnähte in kerntechnischen Komponenten, insbesondere im Primärkreis werden mit Ultraschall- Mehrkopfsystemen mechanisiert geprüft. Dabei werden i. d. R. eine Einkopftechnik für die Volumenprüfung, eine SEL- Technik für die nahe Oberfläche und eine 45° T- Wellentechnik für die ferne Oberfläche, bei einer Wanddicke > 80 mm

ergänzt durch eine Tandemtechnik bzw. eine Wellenumwandlungstechnik (LLT [12]), eingesetzt. Die Ergebnisse werden nach der AVG-Methode [13] bewertet.

Die **A**bstand- **V**erstärkung- **G**rößen- Methode benutzt nur die Information der, von einem Fehler reflektierten, Ultraschallamplitude bezogen auf einen Referenzreflektor (z. B. die Bauteilrückwand, einer Nut oder einer Flachbodenbohrung) und vergleicht diese mit im Regelwerk zugelassen Referenzreflektoren.

Bei der hier relevanten wiederkehrenden Prüfung werden Rohrleitungs-, Druckhalter und Dampferzeuger- Schweißnähte im oberflächennahen Bereich, die RDB-Schweißnähte zusätzlich im Volumen geprüft. Treten Anzeigen über der Bewertungsgrenze auf, sind in diesen Bereichen nachträglich Analyse- Prüfungen mit den Techniken:

- Fokus- Prüfung (durch Linsen fokussierte Schallfelder)
- Gruppenstrahlern (elektronisch steuerbare Ultraschallprüfköpfe)
- SAFT- Rekonstruktion (Synthetische-Apertur-Fokussierungstechnik, rechnet aus Messdaten über eine Rückprojektion auf die Quelle zurück)
- TOFD (Time-Of-Flight-Diffraction) [14, 15] (Rekonstruktion der Risspitze durch Laufzeitdaten in einer Durchschallungstechnik mit zwei Prüfköpfen)

durchzuführen.

Eine quantitative Aussage über die Fehlergröße bzw. über die Fehlerform als Basis für eine quantitative zFP in Kombination mit einer deterministischen oder auch probabilistischen Bruchmechanik ist dabei nur eingeschränkt möglich.

2. Definition der Ziele und Aufgaben

2.1 Motivation

Die in den achtziger Jahren und auch jüngst in austenitischen- und Mischnähten des Primärkreises von KKW aufgetretenen Fehler (Biblis A / D, Ringhals / S, SUMMER / USA und in Frankreich [16 – 21]) mit teilweise großen Fehlertiefen und Umfangslängen und deren Analyse, Details siehe weiter unten:

- Fertigungsfehler, die durch nicht genügend aussagefähige Ultraschallprüfungen bei der Fertigungs- und Basisprüfung nicht entdeckt wurden
- Das Auftreten von Rissorientierungen, auf die nicht geprüft wurde (keine Querfehlerprüfung nach Regelwerk vorgeschrieben)

zeigen, dass noch ein Bedarf an verbesserten Ultraschall- Prüftechniken für die Prüfung von austenitischen- und Mischnähten besteht.

In der DWR- Anlage *Summer* (USA) wurde im August 2000 eine Primärkreis- Leckage festgestellt, und zwar am Anschluss einer austenitischen Hauptkühlmittel-Leitung (HKL) an den ferritischen RDB- Stutzen. Zunächst wurde ein Umfangsriss (d.h. Längsriss in Bezug auf die Mischnaht) vermutet, bei einer Nachprüfung mittels Ultraschall von außen wurde nichts festgestellt. Erst bei einer Wirbelstromprüfung von der Rohr-Innenseite aus wurde ein Querriss (in Bezug auf die Naht, d.h. ein Axialriss in Bezug auf die Rohrleitung) gefunden, der dann auch mit einer bis dahin nicht vorgesehenen Ultraschall-Querfehlerprüfung bestätigt werden konnte. Die im Zuge der Reparaturarbeiten durchgeführte Schadensuntersuchung ergab, dass es sich um einen von innen nach außen in der, aus Nickelbasis-Material, bestehenden Pufferung und Schweißnaht gewachsenen, interkristallinen Spannungs-Korrosions-Riss (IGSCC) handelte.

Unmittelbar danach wurden in den zu Summer ähnlichen Anlagen *Ringhals 3* und *Ringhals 4* (Schweden) mehrere Querrisse derselben Korrosionsart gefunden. Jedoch hatte noch keiner dieser Risse zu einer Leckage geführt.

Im Herbst 2000 wurden bei einer wiederkehrenden Prüfung (WKP) in der deutschen DWR- Anlage *Biblis A* mittels Farbeindring-Prüfung umlaufende, kleinere (d.h. nicht zusammenhängende) Heißriss- Anzeigen an der Außenseite einer Mischnaht (Anschluss

einer austenitischen Notkühl-Leitung mittels- Vorschuh-Ende an die ferritische HKL) im Übergang von der austenitischen Pufferung zum ferritischen Stutzen entdeckt. Nach Beschleifen der Decklage und Überprüfung mit Ultraschall ergab sich, dass unterhalb der Heißrisse im Übergangsgebiet (Interface) zwischen Pufferung und Ferrit noch drei größere flächige Anzeigen in Umfangsrichtung (d.h. Längsanzeigen in Bezug auf die Mischnaht) vorhanden waren. Diese Fehler waren bereits im Jahr 1990 bei einer WKP mittels Ultraschall aufgefunden worden, jedoch als Scheinanzeigen infolge von Manipulator- Abhebeeffekten gedeutet worden. Die an einem entnommenen Schiffchen durchgeführte Untersuchung ergab, dass es sich um echte Trennungen (Disbonding) handelte. Diese müssen durch Schrumpfspannungen entstanden sein, die beim Schweißen der eigentlichen Verbindungsnaht auf das beim vorhergehenden Puffern bereits vorgeschädigte Interface eingewirkt haben. Im Zuge des Fertigschweißens (des Füllens) der Mischnaht wurden diese Trennungen überdeckt.

Die vorstehend geschilderten Fälle führten auch in Deutschland zu verschiedenen Aktivitäten. Die GRS erstellte eine "Weiterleitungs-Nachricht" und die RSK (Reaktorsicherheits-Kommission) veranlasste die deutschen Reaktor-Betreiber, zunächst Unterlagen über alle vorhandenen Mischnähte zu erstellen und sich anschließend zum Stand der Längs- und Querfehlerprüfung dieser Nähte zu äußern bzw. deren Durchführbarkeit zu untersuchen (VGB- Programm).

2.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Die am Fraunhofer Institut durchgeführte Entwicklung einer neuartigen Prüftechnik auf Basis von Gruppenstrahlerprüfköpfen hatte zum Ziel, eine aussagekräftige zwei- und dreidimensionale Fehlerbildvisualisierung auch bei hohen Prüfgeschwindigkeiten zu erreichen. Diese neue Prüftechnik – Sampling Phased Array, oder Getaktete Gruppenstrahler – gestattet auch die Ultraschallprüfung von akustisch anisotropen Werkstoffen in einem Vorgang und kann als Grundlage des Gebrauchseignungsnachweises für austenitische Schweiß- und Mischverbindungen verwendet werden.

Das Prüfkonzept „Sampling Phased Array“ gestattet den verbesserte Fehlernachweis und die Analyse von Ultraschallanzeigen [22-24]. Die technologischen Fähigkeiten der SPA-Technologie sind dabei die wichtigsten Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens.

Das Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren hat in den letzten Jahren in mehreren Machbarkeitsstudien und Forschungsprojekten zum Thema „Ultraschallprüfungen an austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen“ teilgenommen und verfügt durch seine F&E- Arbeiten zur Prüfung von Primärkreis Komponenten aus dem hoch sicherheitsrelevanten Kernkraftwerksbereich über entsprechende Erfahrungen.

Damit ergaben sich hohe Erfolgsaussichten sowohl in wissenschaftlicher als auch in technischer Hinsicht, die im Rahmen dieses Projekts zu erarbeitenden werkstoffspezifischen Erkenntnisse zu gewinnen und umzusetzen.

2.3 Ziele und Aufgaben des Vorhabens

Gesamtziel des Vorhabens war eine verbesserte Absicherung der Komponentenintegrität durch die zerstörungsfreien Prüfverfahren, insbesondere für KKW-Altanlagen im Zusammenhang mit Maßnahmen zur Zustandsbewertung zu erreichen. Als Einzelziele wurden folgende Punkte definiert:

- Fehlernachweis und Fehleranalyse bei der Ultraschall-Prüfung für austenitische Schweißnähte im Primärkreis in einem Prüfvorgang

Wie oben beschrieben, beinhaltet die Ultraschallprüfung nach heutigen Standards unter anderem den Einsatz von mehreren Ultraschallprüftechniken, um eine möglichst ausreichende Fehlernachweissicherheit zu erreichen. Die neue Prüftechnik sollte eine Ultraschallprüfung mit nur einem Prüfvorgang ermöglichen.

- Verringerung der Strahlenbelastung des Prüfpersonals

Durch die Vereinfachung der Prüfprozedur (Fehlernachweis und Fehleranalyse ohne zusätzliche weitere Analyseprüffahrten) und Verkürzung der Prüfzeiten sollte eine Verringerung der Strahlenbelastung erzielt werden.

- Quantitative Aussagen zu Fehlergröße,- Art,- und Lage

Durch den Einsatz der Sampling Phased Technik mit inverser Phasen Anpassung zur Berücksichtigung der Materialanisotropie sollte eine verbesserte quantitative Bewertung von Befunden in kerntechnischen Komponenten ermöglicht werden.

2.4 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Der Einsatz und die Verwendung von zähen austenitischen Werkstoffen im Primärkreis von KKW erfolgt - neben gesetzlichen Regelungen - vorwiegend auf der Grundlage des Standes von Wissenschaft und Technik. Hiermit soll sichergestellt werden, dass Gefährdungen von Mensch und Umwelt durch plötzliches Versagen, d.h. durch einen vollständigen Abriss z. B. einer druckführenden Rohrleitung nicht auftreten. Insbesondere gehört hierzu auch die Gewährleistung der bei der Auslegung berücksichtigten Eigenschaften von Bauteilen (Leck vor Bruch). Die Auslegung und Berechnung der Restlebensdauer von Kraftwerkskomponenten erfolgt unter der Annahme, dass „fehlerfreie“ Werkstoffe bzw. tolerierbare Fehlergrößen vorliegen. Daher ist neben dem Langzeitverhalten der Werkstoffe bezüglich Festigkeit, Duktilität, Ermüdung und Kriechen auch die zerstörungsfreie Prüfung auf sicherheitsrelevante Fehler, Fehlstellen bzw. Werkstoffungängen im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen nach erfolgter Betriebsbelastung ein wichtiger Faktor für die Anlagensicherheit und für Instandsetzungsmaßnahmen im Rahmen des Alterungsmanagement (vorbeugende oder zustandsorientierte Instandsetzung).

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen schaffen die Grundlage zur Entwicklung eines verbesserten Verfahrens zur Qualitätssicherung bei dickwandigen Komponenten aus austenitischen Werkstoffen. Die Ergebnisse des Vorhabens ermöglichen es, die Aussagen über Fehlertolerierbarkeit durch bruchmechanische Berechnungen und in Abhängigkeit von der betrieblichen Beanspruchung eine optimierte werkstoffangepasste wiederkehrende Prüfung zu planen, um die Sicherheit der Anlagen im Betrieb zu verbessern.

2.5 Zusammenhang mit vorangehenden Projekten

Das Forschungsvorhaben knüpft an das im Rahmen der GRS-Reaktorsicherheitsforschung durchgeführte BMBF-Projekt 1501344 „Verbesserter Fehlernachweis und Analyse von Anzeigen bei der Ultraschallprüfung von kerntechnischen Komponenten“ an.

Es wurden die Erfahrungswerte aus den abgeschlossenen BMBF-/ BMFT- / BMWA-Projekte (Austenit I, II und III- Projekt, [25-27]) benutzt.

2.6 Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen

Neben der Zusammenarbeit mit der MPA- Stuttgart für die Herstellung der notwendigen Testkörper wurde auch mit der BAM- Berlin zusammengearbeitet. Die BAM bearbeitete zeitgleich das Projekt“ Entwicklung einer innovativen Ultraschall-Prüftechnik für den Fehlernachweis und die Größenbestimmung an austenitischen Schweißnähten und Mischschweißnähten im Primärkreis von KKW (vorwiegend Querfehlerprüfung)“ Die Ergebnisse beider Projekte wurden ausgetauscht. Dazu wurde ein Mal pro Jahr eine gemeinsame Lenkungskreissitzung, an der neben der GRS auch Fachleute aus der Praxis teilnahmen, veranstaltet.

3. Stand der Wissenschaft und Technik

Besonderheiten im Hinblick auf zerstörungsfreie Prüfbarkeit bei der Ultraschallprüfung an Schweißverbindungen aus austenitischen Werkstoffen resultieren insbesondere aus einer grobkörnigen und dendritischen Gefügeausbildung. Intensive Untersuchungen und Entwicklungen in den vergangenen Jahren lieferten ein grundsätzliches Verständnis der Ursachen für die Schwierigkeiten bei der Prüfung. Optimierte Ultraschalltechniken, insbesondere neuartige Ultraschallsensoren, erlaubten in Einzelfällen eine aussagefähige Prüfung, jedoch konnten die für ferritische Schweißnähte in der KTA Regel 3201.3 bzw. 3201.4 [1] festgelegten Registriergrenzen nicht erfüllt werden, so dass umfangreiche Ersatzmaßnahmen notwendig wurden (z. B. Durchstrahlen der SN-Wurzel, Ultraschallprüfung der SN-Flanken und lagenweise Eindringprüfung bei der Fertigungsprüfung). Für die in den Druckwasser-Reaktor-Kernkraftwerken eingesetzten austenitischen und Mischschweißverbindungen bis 50 mm Wanddicke wurde von Mitte der 1980er bis Ende der 1990er Jahre jedoch weiterhin Forschung für die Verbesserung der Prüfung (Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit) und der Aussagefähigkeit der Ultraschallprüfung durchgeführt [28-47].

Das wesentliche Problem liegt in der akustischen Anisotropie der Körner/Kristallite, d. h. die Schallgeschwindigkeiten für verschieden mögliche Wellenmoden sind richtungsabhängig. Solange die Körner ohne Vorzugsrichtung orientiert und im Vergleich zur Ultraschall-Wellenlänge hinreichend klein sind also ein quasiisotropes Verhalten vorliegt, wirkt sich die mikroskopische Anisotropie makroskopisch nicht aus. Bei austenitischen oder Nickelbasis-Schweißungen aus diesen Werkstoffen bilden sich jedoch im Allgemeinen große Körner, die in Abhängigkeit von den Abkühlbedingungen in Vorzugsrichtung orientiert sind. Durch die Bildung dieser Stängelkristallite oder Dendriten kommt es zu einer makroskopischen akustischen Anisotropie d. h. Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von elastischen Konstanten und von der Gefügestruktur.

Durch diese akustische Anisotropie erfolgt die Ausbreitung von Ultraschallwellen nicht mehr parallel oder senkrecht zur Schwingungsrichtung wie bei akustisch isotropem Material. Die tatsächliche Schallausbreitung wird unübersichtlich und oft nicht vorhersagbar. An den Korngrenzen und auch im Bereich der Schmelzlinie bei

Schweißungen kommt es zu Schall-Rückstreuungen sowie Reflexionen, Brechungen und Wellenabspaltungen und auch zur Wellenumwandlung.

Im Einzelnen treten folgende Effekte auf [48-56]:

- a) Änderung der Schallgeschwindigkeit,
- b) Änderung der Schallausbreitungsrichtung,
- c) starke Streuung an den Korngrenzen,
- d) Wellenumwandlungen,
- e) Schallfelddeformationen,
- f) Reflexionen an der Schmelzlinie.

Die hieraus entstehenden Schwierigkeiten bei der Ultraschallprüfung sind:

- Vermindertes Fehlernachweisvermögen durch ein ungünstigeres Signal-Rauschverhältnis,
- Auftreten von "Scheinfehleranzeigen",
- Abweichungen bei der Lagebestimmung von Fehlern und
- Mehrdeutigkeiten bei der Fehlergrößenbestimmung.

In der Prüfpraxis wurden ausgehend vom erreichten physikalischen Kenntnisstand Prüfstrategien entwickelt, die in Einzelfällen zu Verbesserungen führten jedoch ein hohes Expertenwissen und eine hohe Qualifikation der Prüfer erforderte.

In den letzten Jahren wurden Ultraschalltechniken und Algorithmen entwickelt, die:

- zum Zeitpunkt der RS- Projekte Austenit I-III noch nicht vorhanden waren
- neue Messtechniken zur Ultraschall- Prüfung von austenitischen Schweißnähten ermöglichen

Insbesondere sind das:

- (1) Gruppenstrahlerprüfköpfe nebst der dazugehörigen Ansteuerelektronik (englischsprachig: Phased Array). Literatur [57-62].

- (2) Die Technik für die Anwendung von getakteten Gruppenstrahlern (Sampling Phased Array). Literatur [22-24], siehe auch den Abschnitt 6.
- (3) Rekonstruktionsalgorithmen:
 - a) An die elastischen Konstanten C_{ij} angepasstes SAFT (A-Saft) [63, 64]
 - b) An die elastischen Konstanten C_{ij} und an die Inhomogenität angepasstes SAFT (in-A-Saft) [65-67]
 - c) Synthetische Fokustechnik mit inverser Phasen Anpassung (Sampling Phased Array). Siehe den Abschnitt 6.

Mit dem vorgelegten Forschungsvorhaben soll versucht werden, mit den innovativen Techniken (1), (2) und (3c) eine praktikable Prüftechnik für die Prüfung von austenitischen und Mischschweißnähten zu entwickeln, wobei im Bereich der Prüfung von Faserverbundwerkstoffen schon gute Ergebnisse erzielt werden konnten.

4. Planung und Ablauf des Vorhabens

4.1 Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm des Vorhabens bestand aus den vier Projektteilen:

Projektteil A: Testkörperpreparation (MPA- Stuttgart)

- *Auswahl und Vorbereitung der notwendigen Testkörper.*

Es wurden die notwendigen Testkörper spezifiziert und hergestellt bzw. aus der Testkörperbibliothek des Fraunhofer IZFP und der MPA Stuttgart ausgewählt. Die Testkörper beinhalten sowohl reale als auch künstlich eingebrachte Materialungängen in Form von Nuten, Schwingrissen und Spannungskorrosionsrissen. Bei den Testkörpern werden die Bezeichnungen und die Koordinatensysteme festgelegt.

Projektteil B: Aufklärung der Schweißnahtstruktur

- *Bereitstellung der Sensorik und Manipulator- Technik*
- *Bestimmung der Gefügestruktur der Schweißnähte in den ausgewählten Testkörpern*

Projektteil C: Entwicklung einer neuen Messtechnik

- *Entwicklung der Software für inverse Phasen Anpassung zum Ausgleich der Phasenstörungen bei der Schallausbreitung in dem inhomogenen, anisotropen austenitischen Material*
- *Aufnahme der Ultraschalldaten nach dem Sampling Phased Array-Prinzip*

Projektteil D: Auswertung der Prüfergebnisse

- *Rekonstruktion der Ergebnisbilder nach dem SPA-Prinzip mit der inversen Phasen Anpassung*
- *Vergleich der Ergebnisse mit Untersuchungen durch Standarttechniken (Impulsecho mit 45° T- Wellen, TOFD- Technik, durchgeführt bei der MPA- Stuttgart, siehe Abschlussbericht [92] der MPA- Stuttgart)*
- *Erstellung des Abschlussberichtes*

4.2 Projektpartner

Die Forschung wurde in Zusammenarbeit des Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) und der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA) durchgeführt.

4.3 Zeitplan

Das Vorhaben war auf eine Laufzeit von 3 Jahren geplant (beginn April 2009- März 2012), wurde aber kostenneutral mit Änderungsbescheid vom 03.02.2012 bis zum 31.12.2012 verlängert. Der neue Zeitplan ist in Tabelle 1 gezeugt.

Tabelle 1: Zeitplan

	2009		2010		2011		2012	
Projektteil A / Probenbeschaffung								
Beschaffung	X	X	X	X	X	X	X	
Stempel und Koordinatensysteme		X	X	X	X	X	X	
Dokumentation der Fehlereinbringung		X	X	X	X	X	X	
Projektteil B / Stukturaufklärung								
TOFDT, durch MPA: Vorbereitung	X					X		
Messungen und Auswertung		x		X		X	X	
V- Durchschallung: Vorbereitung	X	X	X					
Messung und Auswertung		x	X	x				
Projektteil C / Neue Messtechnik								
GT- Gruppenstrahler: Beschaffung GT- Prüfköpfe und Test	X	x						
Vorbereitung Messungen + Rundnähte		X	X					
Messungen Breitspalt- Schweißnähte				X	X			X
Messungen Engspalt- Schweißnähte					X	X		
Messungen X- Schweißnähte							X	X
Messungen an Querfehler- Testkörpern (von BAM) + Rundnähte							X	X
Projektteil D / Auswertung								
GT- Gruppenstrahler: Entwicklung Auswerte- Software	X	X	X	X	X	X	X	
Auswertung- Längsfehler- Prüfung (IZFP + MPA) + Rundnähte					X	X	X	X
Abschlussbericht (IZFP + MPA)								X

5. Theoretische Grundlagen: Ausbreitung der elastischen Wellen in einer inhomogenen akustisch anisotropen Schweißnaht

5.1 Einführung in die akustische Anisotropie

Austenitische Schweißverbindungen gehören zu akustisch anisotropen Werkstoffen. In diesem Fall versteht man unter dem Begriff „Anisotropie“ in erster Linie die Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit, die ihrerseits durch sogenannte *elastische Konstanten* bestimmt wird.

Um die physikalische Bedeutung der o.g. Konstanten zu erklären, stellen wir uns ein Volumenelement des Werkstoffes vor, auf den eine äußere Kraft \mathbf{F} wirkt (Abb. 1). Dadurch entstehen die mechanischen Spannungen, die in dem kartesischen Koordinatensystem auf drei Basisachsen x , y und z projiziert werden können. Die Spannungen sind im Tensor 2. Ordnung eingeordnet.

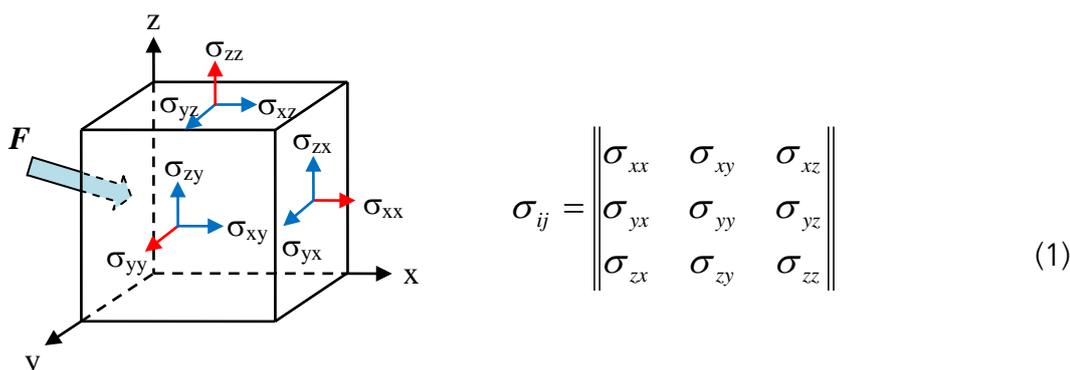


Abb. 1. Mechanischen Spannungen und Spannungstensor

Mechanische Spannung σ_{ij} kann physikalisch als i -Komponente der Kraft interpretiert werden, die auf die zu der j -Achse normale Einheitsfläche wirkt. Sowohl der i - als auch der j -Index repräsentieren eine der Hauptrichtungen – x , y oder z . Die diagonalen Komponenten des Spannungstensors ($i = j$) stellen die Normalspannungen σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} dar. Die anderen sechs Komponenten ($i \neq j$) beschreiben die Schubspannungen.

Nach dem Hooke'schen Gesetz führen die entstehenden mechanischen Spannungen zu Deformationen des Volumens. Normalspannungen verursachen die Längenänderung des Volumens entlang der entsprechenden Achse (x , y oder z). Schubspannungen wirken

tangential zur entsprechenden Fläche und stellen eine Belastung auf Scherung dar. Für die Charakterisierung des deformierten Zustands wird ein Tensor 2. Ordnung – (Deformationstensor) verwendet.

In dem Deformationstensor repräsentiert der erste Index k die Bewegungsrichtung, der zweite Index l – das Normal zur deformierten Fläche. Die diagonalen Komponenten des Tensors bedeuten zahlenmäßig die *relative* Längenänderung entlang der x -, y - und z -Achsen. Die nichtdiagonalen Komponenten entsprechen den Tangenten von Scherungswinkeln (Abb.2).

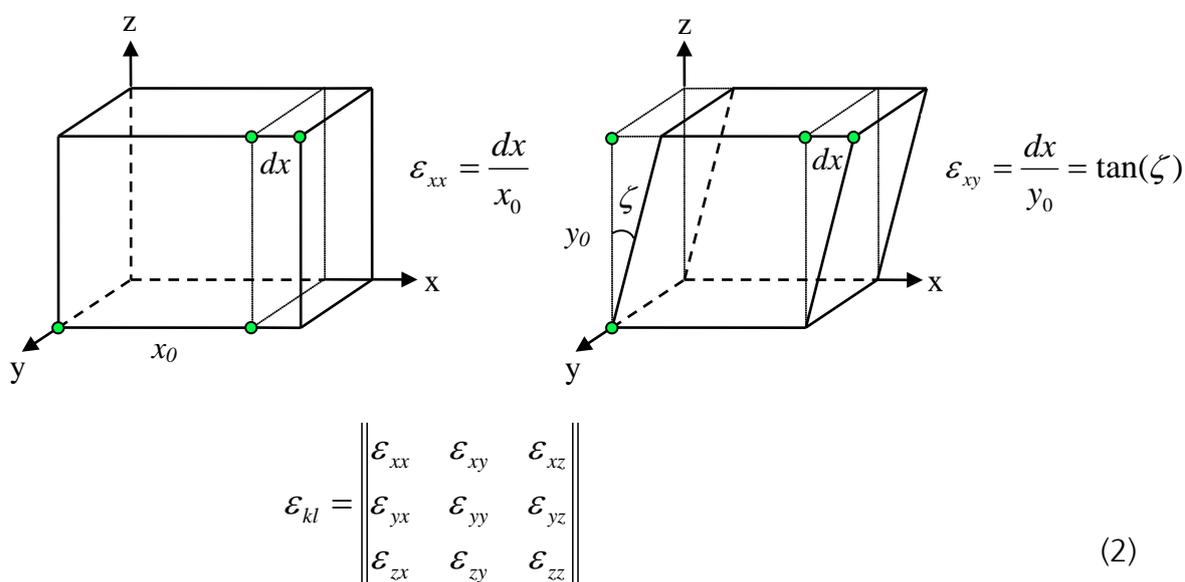


Abb. 2: Elastische Deformation und Deformationstensor

Zwischen dem Spannungstensor und dem Deformationstensor besteht ein Zusammenhang nach dem Hooke'schen Gesetz, der in allgemeiner Form wie folgt beschrieben werden kann:

$$\sigma_{ij} = \sum_{l,k} C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad \epsilon_{ij} = \sum_{k,l} S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (3)$$

wobei C_{ijkl} und S_{ijkl} die entsprechenden Komponenten des Elastizitätstensors C beziehungsweise des Nachgiebigkeitstensor S (in engl. Literatur *Compliance*) repräsentieren.

Da der Spannungstensor und der Deformationstensor Tensoren 2. Ordnung sind, und je 9 Komponenten besitzen, ist der die beiden Matrizen verbindende Elastizitätstensor C ein Tensor 4. Ordnung. Dieser enthält $9 \times 9 = 81$ Komponenten (elastischen Konstanten), die die akustischen Eigenschaften des Werkstoffs zahlenmäßig beschreiben. Da die Spannungs- und Deformations-Tensoren eine Symmetrie besitzen:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= \sigma_{ji} \\ \varepsilon_{kl} &= \varepsilon_{lk}\end{aligned}\quad (4)$$

gilt für den Elastizitätstensor und für den Nachgiebigkeitstensor auch

$$\begin{aligned}C_{ijkl} &= C_{jikl}, & C_{ijkl} &= C_{ijlk} \\ S_{ijkl} &= S_{jikl}, & S_{ijkl} &= S_{ijlk}\end{aligned}\quad (5)$$

Dies führt dazu, dass in C und S nur 6 voneinander unabhängige ij - bzw. kl -Kombinationen auftreten. Werden die Indexpaare ij - und kl - durch *Voigt-Indexe* ersetzt [8],

$$\begin{pmatrix} C_{xxxx} & C_{xxyy} & C_{xxzz} & C_{xxyz} & C_{xxxz} & C_{xxxy} \\ C_{yyxx} & C_{yyyy} & C_{yyzz} & C_{yyyz} & C_{yyxz} & C_{yyxy} \\ C_{zzxx} & C_{zzyy} & C_{zzzz} & C_{zzyz} & C_{zzxz} & C_{zzxy} \\ C_{yzxx} & C_{yzyy} & C_{yzzz} & C_{yzyz} & C_{yzxz} & C_{yzxy} \\ C_{xzxx} & C_{xzyy} & C_{xzzz} & C_{xzyz} & C_{xzxz} & C_{xzxy} \\ C_{xyxx} & C_{xyyy} & C_{xyzz} & C_{xyyz} & C_{xyxz} & C_{xyxy} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \quad (6)$$

können die Spannungen σ und Deformationen ε als 6-komponentige Vektoren (Tensor 1. Ordnung) und die elastischen Konstanten C als Steifigkeitsmatrix (Tensor 2. Ordnung) mit 36 Komponenten dargestellt werden. So kann das Hooke'sche Gesetz (3) in Matrixform (7) umgeschrieben werden. Für die Komponenten der Steifigkeitsmatrix gilt $C_{ij} = C_{ji}$, so dass die Anzahl von voneinander unabhängigen elastischen Konstanten auf 21 reduziert (eingerahmt durch Strichlinie) werden.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Ein Werkstoff, dessen elastische Eigenschaften durch 21 unabhängige Konstanten beschrieben werden, hat die trikline *Struktur* und repräsentiert den Fall einer vollständigen Anisotropie. Solche Eigenschaften besitzen z. B. manche Faser-Verbundwerkstoffe.

Die Aufbaustruktur der meisten anisotropen Materialien hat jedoch eine oder mehrere Symmetrieebenen bzw. Symmetrieachsen. Die elastischen Eigenschaften des Werkstoffs sind bezüglich Symmetrieebene oder –Achse je nach Symmetriearart gespiegelt und/oder rotiert. Dies führt dazu, dass sich die Anzahl von unabhängigen Komponenten des Elastizitätstensors reduziert. Je symmetrischer die Struktur ist, desto weniger unabhängige elastische Konstanten besitzt die Steifigkeitsmatrix: 13 Konstanten bei *monokliner* Anisotropie, 9 – bei *orthorombischer*, 6 – *tetragonaler*, 5 – *hexagonaler* und 3 – *kubischer* Symmetrie [68].

Der Elastizitätstensor eines isotropen Werkstoffes enthält 12 Nichtnull-Konstanten, wobei nur 2 davon voneinander unabhängig sind. Diese wurden historisch als *Lamé-Konstanten* genannt: $\lambda = C_{12}$ und $\mu = C_{44}$. Darüber hinaus werden oft *Elastizitätsmodul* E , *Schubmodul* G oder *Poissonzahl* ν verwendet, die in Zusammenhang mit Lamé-Konstanten stehen.

5.2 Phasengeschwindigkeit, Gruppengeschwindigkeit und Ablenkwinkel

Während die Wellenfront einer Punktquelle in einem isotropen homogenen Medium eine reguläre Sphäre darstellt, ist das in einem anisotropen Medium auf Grund der Richtungsabhängigkeit von mechanischen Eigenschaften nicht mehr der Fall. Damit unterscheiden sich in solchen Materialien die Geschwindigkeiten der Phasenausbreitung und der Schallenergieausbreitung sowohl durch die Richtung als auch durch den Betrag.

Die Wellenfront kann man als Superposition von ebenen Wellen betrachten, die sich tangential zu jedem Punkt der Front ausbreiten. Abb. 3 zeigt eine ellipsenförmige

Wellenfront in zwei Momenten der Zeit. Nach dem Zeitabstand dt wird die Energie der ebenen Welle vom Punkt **1** nach Punkt **2** über die Entfernung Vdt übertragen. Die Phase der Welle breitet sich tangential zur Wellenfront für die Entfernung vdt .

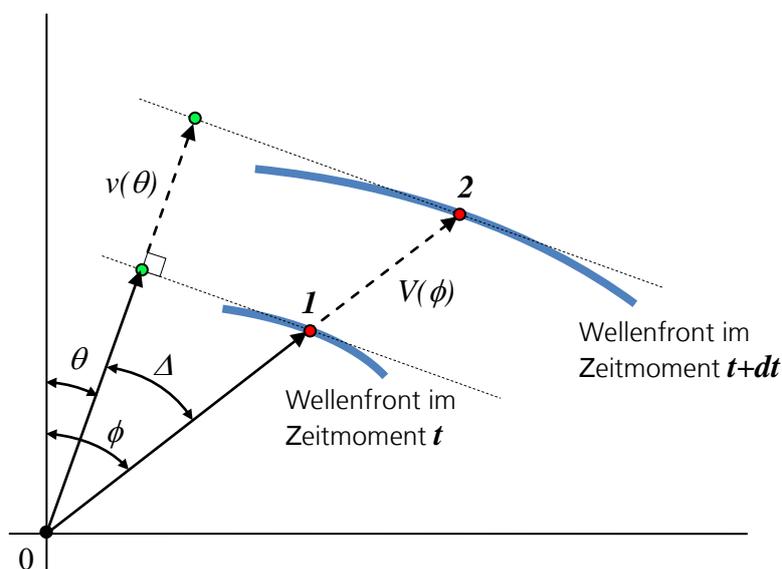


Abb. 3: Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten in einem homogenen anisotropen Medium

Abb. 3 illustriert auch den Unterschied zwischen den Vektoren \bar{v} und \bar{V} sowohl in der Richtung als auch in der Länge. Die Geschwindigkeit \bar{v} der Phasenausbreitung ist sogenannte *Phasengeschwindigkeit*; der Winkel θ - *Phasenwinkel*. Die Geschwindigkeit \bar{V} der Energieausbreitung ist die *Gruppengeschwindigkeit*. In einigen Quellen wird die Gruppengeschwindigkeit auch die *Energiegeschwindigkeit* benannt [69]. Der Winkel ϕ ist der *Gruppenwinkel*. Den Winkel Δ zwischen der Energieausbreitungsrichtung und der Richtung der Phasenfront nennt man *Ablenkwinkel*.

Eine ebene elastische Welle mit der Amplitude U , die sich in Richtung \bar{n} mit der Phasengeschwindigkeit v ausbreitet, ist eine Funktion der Koordinate x und der Zeit t und kann in der Form (8) eingegeben werden:

$$u(x,t) = \bar{g}UF\left(t - \frac{x\bar{n}}{v}\right) \quad (8)$$

Der Einheitsvektor \bar{g} beschreibt die Polarisation der Welle, F ist ein analytisches Signal.

Die Phasengeschwindigkeit v der Welle kann durch Lösung der Christoffel-Gleichung (9) bestimmt werden

$$(\Gamma_{il} - v^2 \rho \delta_{il}) g_l = 0 \quad (i, l = 1, 2, 3) \quad (9)$$

die ihrerseits aus der Wellengleichung (10) folgt [68]:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x_l} \left(C_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (10)$$

Hierbei sind: ρ - Dichte des Mediums, C_{ijkl} - Komponenten des Elastizitätstensors, δ - Kronecker-Delta, Γ - der Christoffel-Tensor, Indizes i, j, k, l präsentieren je drei Raumrichtungen. Die Komponenten des Christoffel-Tensors sind:

$$\Gamma_{il} = C_{ijkl} n_j n_k \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (11)$$

Wegen der Symmetrie (5) des Elastizitätstensors ist der Christoffel-Tensor auch symmetrisch ($\Gamma_{il} = \Gamma_{li}$). Wird die Steifigkeitsmatrix in Form (6) dargestellt, dann werden die Komponenten des Christoffel-Tensors folgenderweise [70] determiniert:

$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &= C_{11} n_1^2 + C_{66} n_2^2 + C_{55} n_3^2 + 2C_{16} n_1 n_2 + 2C_{56} n_2 n_3 + 2C_{15} n_1 n_3 \\ \Gamma_{22} &= C_{66} n_1^2 + C_{22} n_2^2 + C_{44} n_3^2 + 2C_{26} n_1 n_2 + 2C_{24} n_2 n_3 + 2C_{46} n_1 n_3 \\ \Gamma_{33} &= C_{55} n_1^2 + C_{44} n_2^2 + C_{33} n_3^2 + 2C_{45} n_1 n_2 + 2C_{34} n_2 n_3 + 2C_{35} n_1 n_3 \\ \Gamma_{12} &= C_{16} n_1^2 + C_{26} n_2^2 + C_{45} n_3^2 + (C_{12} + C_{66}) n_1 n_2 + (C_{25} + C_{46}) n_2 n_3 + (C_{14} + C_{56}) n_1 n_3 \\ \Gamma_{13} &= C_{15} n_1^2 + C_{46} n_2^2 + C_{35} n_3^2 + (C_{14} + C_{56}) n_1 n_2 + (C_{36} + C_{45}) n_2 n_3 + (C_{13} + C_{55}) n_1 n_3 \\ \Gamma_{23} &= C_{56} n_1^2 + C_{24} n_2^2 + C_{34} n_3^2 + (C_{25} + C_{46}) n_1 n_2 + (C_{23} + C_{44}) n_2 n_3 + (C_{36} + C_{45}) n_1 n_3 \end{aligned} \quad (12)$$

Aus den Formeln (9) und (12) folgt, dass die Kompliziertheit der Geschwindigkeitsberechnung von den Eigenschaften der Steifigkeitsmatrix abhängt: je weniger Null- und voneinander unabhängigen Komponenten die Matrix besitzt, desto komplexer ist die Beziehung zwischen der Phasengeschwindigkeit und dem Elastizitätstensor.

Die Gruppengeschwindigkeit \mathbf{V} wird nach Formel (13) berechnet [71]:

$$\bar{\mathbf{V}} = \frac{\partial \bar{k} v}{\partial k_x} \bar{x} + \frac{\partial \bar{k} v}{\partial k_y} \bar{y} + \frac{\partial \bar{k} v}{\partial k_z} \bar{z} \quad (13)$$

wobei $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ die Koordinateneinheitsvektoren sind und \bar{k} der Wellenvektor parallel zu Phasengeschwindigkeit und mit Länge $k = \omega/v$ (ω - Kreisfrequenz) ist. In allgemeinem Fall kann die Ablenkung des Gruppengeschwindigkeitsvektors vom

Phasengeschwindigkeitsvektor in allen drei Raumrichtungen x , y und z gestatten. Der Ablenkwinkel Δ ist damit ein Raumwinkel.

In einem elastischen Medium, unabhängig vom Grad der Anisotropie, können sich in jeder vorgegebenen Richtung \bar{n} drei Wellenmoden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten. Die Polarisationsvektoren \bar{g} der Wellen sind orthogonal zueinander, aber nicht unbedingt parallel oder normal zu \bar{n} . Die Welle, dessen Polarisationsvektor am nächsten zur Ausbreitungsrichtung ist, ist die *quasi-longitudinale* Welle qL . Das Präfix „quasi“ unterstreicht, dass die Vektoren \bar{g} und \bar{n} nicht kollinear sind. In englischsprachigen Quellen wird diese Welle als qP gekennzeichnet. Der Buchstabe „P“ in der Bezeichnung stammt ursprünglich aus der Seismologie [72]. Da die quasi-longitudinale Welle eine größere Geschwindigkeit gegen die anderen zwei Wellenmoden hat, wird die qP-Welle (von der Schallquelle (z. B. Erdbeben) zum Empfänger) immer zuerst registriert. Deswegen wurde die quasi-longitudinale Welle „*primary wave*“ genannt. Es gibt auch andere Interpretation der Bezeichnung [73] z. B. die qP-Welle ist eine Kompressionswelle, also „*pressure wave*“.

Die anderen zwei Wellen besitzen den Polarisationsvektor in der Ebene, die orthogonal dem Polarisationsvektor der qL-Welle ist. Diese sind *quasi-transversale* Wellen qT . In englischsprachigen Quellen sind die Wellen als qS_1 und qS_2 gekennzeichnet („S“ - von „*secondary wave*“ oder auch „*shear wave*“). Bezüglich der austenitischen Stängelkristalle unterscheidet man eine vertikal-polarisierte Transversalwelle qT_V oder qSV , dessen Polarisationsvektor parallel zu dem Kristall ist, und eine horizontal-polarisierte Transversalwelle T_H oder SH , dessen Polarisationsvektor senkrecht zum Kristall entsteht (das Präfix „quasi“ fehlt, weil die Polarisation der SH-Welle immer senkrecht der Ausbreitungsrichtung ist).

5.3 Akustische Eigenschaften eines transversal-isotropen Mediums

Akustisch anisotrope Stängelkristalle einer austenitischen Schweißnaht können als ein transversal-isotropes Medium betrachtet werden [25, 26]. Die Symmetrieachse entspricht der Wachstumsrichtung der Kristalle während des Erstarrungsprozesses. Obwohl jeder einzelne Stängelkristallit mikroskopisch eine kubisch-symmetrische Struktur besitzt und entsprechende anisotrope Eigenschaften aufweist, kann das außer Acht gelassen werden. Senkrecht zur Wachstumsrichtung können diese infolge der

regellosen Anordnung der Kristalle und eines in Verhältnis zur Wellenlänge kleinen Durchschnitts als isotrop betrachtet werden [74], also bilden eine Isotropie-Ebene (Abb. 4).

In allen Ebenen außerhalb der isotropen Ebene unterscheiden sich die Vektoren der Phasengeschwindigkeit und der Gruppengeschwindigkeit sowohl durch die Richtung als auch durch die Länge.

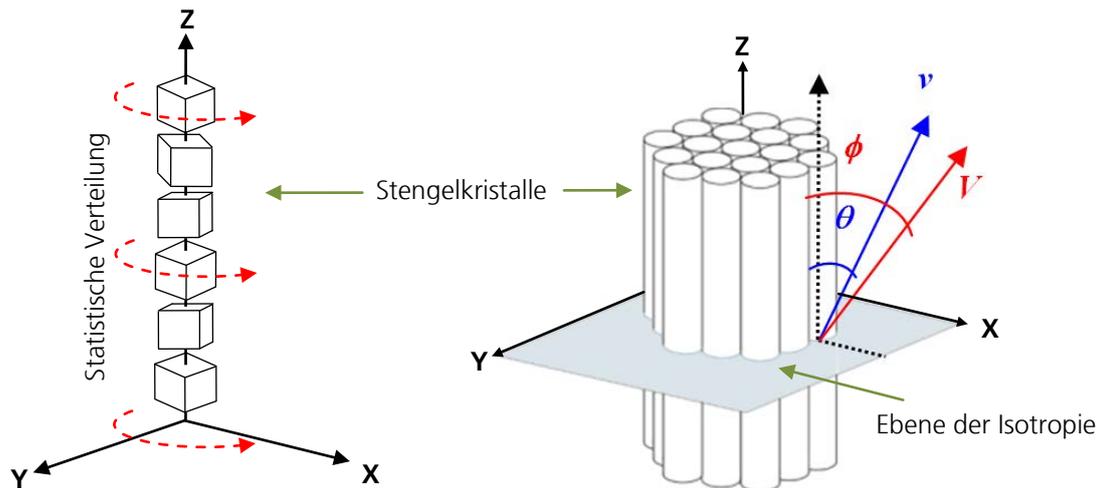


Abb. 4: Transversal-isotrope Stengelkristalle einer austenitischen Schweißnaht

Die Existenz der Symmetrieachse reduziert die Anzahl der Komponenten der Steifigkeitsmatrix eines transversal- isotropen Mediums von 36 (allgemeiner Fall) auf 12, wobei nur 5 elastische Konstanten unabhängig voneinander sind.

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{11} - 2C_{66} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ \text{Symmetrie} & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Sind die Komponenten des Elastizitätstensors bekannt, besteht die Möglichkeit, die Phasengeschwindigkeit ν und die Gruppengeschwindigkeit \mathbf{V} für einen vorgegebenen Phasenwinkel θ und entsprechenden Gruppenwinkel ϕ zu berechnen.

5.4 Berechnung der Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten in einem transversal-isotropen Medium mit vertikaler Symmetrieachse

Die Christoffel-Gleichung (9) für den Fall eines transversal-isotropen Mediums mit vertikaler Symmetrieachse wurde von *Daley and Hron* [75] gelöst, die 1977 die sogenannte exakte Formel aufgestellt haben. Die Phasengeschwindigkeit unter einem Phasenwinkel θ berechnet man dementsprechend als:

$$\rho v_P^2 = \frac{1}{2} [C_{33} + C_{44} + (C_{11} - C_{33}) \sin^2 \theta + D(\theta)] \quad (15)$$

$$\rho v_{SV}^2 = \frac{1}{2} [C_{33} + C_{44} + (C_{11} - C_{33}) \sin^2 \theta - D(\theta)] \quad (16)$$

$$\rho v_{SH}^2 = C_{66} \sin^2 \theta + C_{44} \cos^2 \theta \quad (17)$$

wobei ρ die Dichte des Werkstoffes ist und

$$D(\theta) = \left\{ \begin{aligned} & (C_{33} - C_{44})^2 + \\ & 2[2(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})(C_{11} + C_{33} - 2C_{44})] \sin^2 \theta + \\ & [(C_{11} + C_{33} - 2C_{44})^2 - 4(C_{13} + C_{44})^2] \sin^4 \theta \end{aligned} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

ist.

Da die elastischen Eigenschaften eines transversal- isotropen Mediums nicht vom Azimut, sondern lediglich vom Winkel zur Symmetrieachse abhängen, liegen die Vektoren der Phasen- und Gruppengeschwindigkeit in derselben Ebene. Dadurch kann die Formel (13) vereinfacht werden. Also der Zusammenhang zwischen \bar{v} und \bar{V} in einem transversal- isotropen Medium ist:

$$V^2(\phi(\theta)) = v^2(\theta) + \left(\frac{dv}{d\theta} \right)^2 \quad (19)$$

$$\tan \phi = \frac{\tan \theta + \frac{1}{v} \frac{dv}{d\theta}}{1 - \frac{\tan \theta}{v} \frac{dv}{d\theta}} \quad (20)$$

In einem transversal-isotropen Medium sind die Winkel θ und ϕ bezogen auf die Symmetrieachse abzutragen. Bei $\theta = 0^\circ$ und 90° (entlang und senkrecht zur

Symmetrieachse) koinzidieren die Phasengeschwindigkeit und die Gruppengeschwindigkeit – der Ablenkwinkel Δ ist damit gleich null.

5.5 Schallbrechung in einer akustisch anisotropen Schweißnaht

Die Schallbrechung an einer Trennfläche zwischen zwei isotropen homogenen Medien, die die Schallgeschwindigkeit V_1 bzw. V_2 besitzen, wird durch das Snellius'sche Gesetz beschrieben:

$$\frac{\sin(\theta_1^I)}{V_1} = \frac{\sin(\theta_2^T)}{V_2} = \frac{\sin(\theta_1^R)}{V_1} = x_0 \quad (21)$$

wobei x_0 – der sogenannte „Ray-Parameter“ ist. Die Indices **1** und **2** gelten für Medium 1 bzw. Medium 2; die Bezeichnungen *I*, *T* und *R* bedeuten einfallende (*Incident*), durchgehende (*Transmitted*) bzw. reflektierte (*Reflected*) Wellen. Die Winkel sind bezogen auf das Normal zur Trennfläche der Medien abzutragen.

In einem anisotropen Medium ist die Schallgeschwindigkeit nicht konstant, sondern ist eine Funktion der Richtung. Fedorov [76] zeigte, dass das Snellius'sche Gesetz in seiner allgemeinen Form auch für ein anisotropes Medium gilt:

$$\frac{\sin(\theta_1^I)}{v_1(\theta_1^I)} = \frac{\sin(\theta_2^T)}{v_2(\theta_2^T)} = \frac{\sin(\theta_1^R)}{v_1(\theta_1^R)} = x_0 \quad (22)$$

Hierbei ist $v(\theta)$ die Phasengeschwindigkeit der einfallenden, durchgehenden bzw. reflektierten Welle entlang des entsprechenden Phasenwinkels θ .

Die Aufgabe der Richtungsbestimmung der gebrochenen/reflektierten Welle besteht in der Ermittlung des Phasenwinkels θ und der Phasengeschwindigkeit $v(\theta)$, die dem vorgegebenen Ray-Parameter x entsprechen. Die Ermittlung des Reflektions- bzw. Brechungswinkels präsentiert das so genannte inverse Problem.

Der Ray-Parameter und der Brechungs- bzw. Refraktionswinkel in einem isotropen Medium bestehen infolge der konstanten Schallgeschwindigkeit in einer einfachen Sinus-Beziehung. Damit ist die Aufgabe der analytischen Bestimmung von Brechungs- bzw. Refraktionswinkeln, die dem vorgegebenen Ray-Parameter entsprechen, trivial:

$$\theta_1^R = \arcsin(x_0 \cdot V_1) \quad \theta_2^T = \arcsin(x_0 \cdot V_2) \quad (23)$$

Im Gegensatz zu isotropen Werkstoffen, ist die Beziehung zwischen dem Phasenwinkel und dementsprechender Phasengeschwindigkeit in einem anisotropen Medium sehr komplex. Dies führt dazu, dass das Brechungsgesetz nicht immer analytisch beschrieben werden kann.

5.5.1 Grafische Darstellung des Brechungsgesetzes

5.5.1.1 Slowness-Fläche

Ein Vektor \bar{m} , der kollinear dem Phasengeschwindigkeitsvektor \bar{v} ist und die Länge $|\bar{m}| = 1/|\bar{v}|$ besitzt, stellt die sogenannte „Langsamkeit“ oder „Slowness“ (engl.) einer elastischen Welle dar. Der Slowness-Vektor \bar{m} beschreibt bei Variation des Phasenwinkels θ von 0° bis 360° eine geschlossene Kurve – die Slowness-Fläche. Die Slowness-Fläche eines isotropen Werkstoffes ist ein Kreis mit dem Radius V^{-1} (wobei V eine konstante Schallgeschwindigkeit ist) (Abb. 5 links). Die Slowness-Fläche eines anisotropen Werkstoffes hat eine komplexere Form, da die Länge $v^{-1}(\theta)$ des Radiusvektors winkelabhängig ist (Abb. 5 rechts).

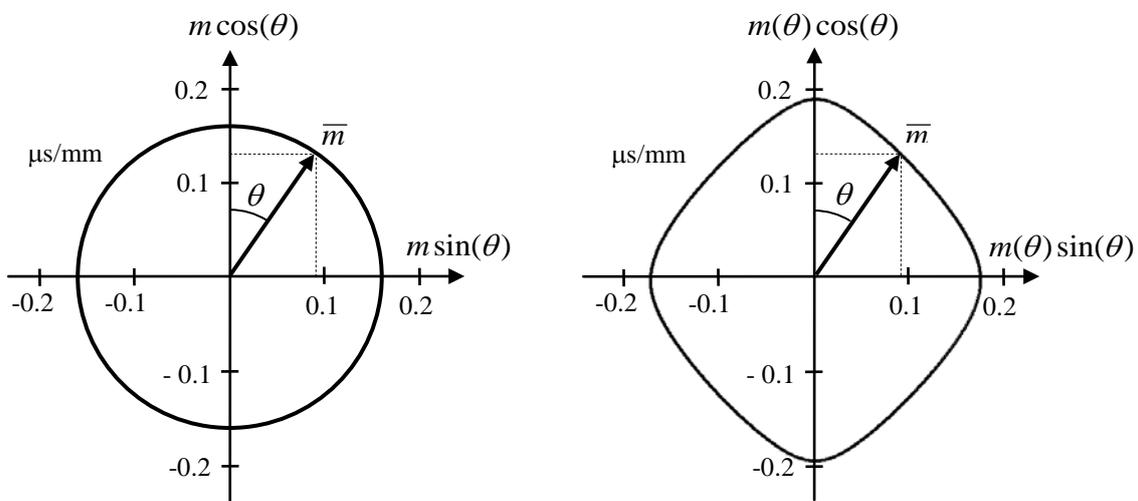


Abb. 5: Die Slowness-Flächen der (quasi-) longitudinalen Welle im isotropen ferritischen Stahl (links) und anisotropen austenitischen Werkstoff X8CrNi1910 (rechts)

Der Quotient $\frac{\sin \theta}{v(\theta)} = m(\theta) \sin \theta$ im Brechungsgesetz (22) hat die mathematische

Bedeutung der Projektion eines Slowness-Vektors auf die Trennfläche zwischen den Medien. Bezeichnen wir die Slowness-Projektionen der Slowness-Vektoren von Einfall-, Brechungs- bzw. Reflexionswellen durch x mit entsprechenden Indices I , T und R . kann

damit das Snellius'sche Brechungsgesetz (22) folgenderweise formuliert und geschrieben werden (24):

Die Projektionen der Slowness-Vektoren auf die Trennfläche zwischen zwei Medien sind für die einfallende, gebrochene und reflektierte Welle gleichwertig,

oder

$$x_I = x_T = x_R = x_0 \quad (24)$$

Eine solche Erläuterung ermöglicht eine anschauliche grafische Darstellung des Brechungsgesetzes. Als Beispiel dafür nehmen wir einen 45°-Winkelprüfkopf zur Anregung von Longitudinalwellen. Das Piezoelement des Prüfkopfes wird an einem Plexiglaskeil angebracht, der einen Neigungswinkel 16° hat. Die akustische Achse des vom Wandler erzeugten Schallbündels im Stahl (nach der Brechung an der Grenzfläche „Plexiglas-Stahl“) liegt unter dem Winkel 45° (Abb. 6 links). Infolge der Wellenumwandlung an der Trennfläche entsteht auch eine Transversalwelle, die sich unter dem Winkel ca. 23° ausbreitet. Ein Teil der akustischen Energie wird an der Grenzfläche in „Plexiglas/Stahl“ in den Vorlaufkeil zurückreflektiert (Refraktionswinkel 16°).

In Abb. 6, rechts werden drei Slowness-Kurven dargestellt, die konzentrisch sind und die Form eines Halbkreises besitzen:

- die Slowness-Kurve **A** der Longitudinal-Welle im Plexiglas hat den Radius 1/2330 ms/mm;
- die Slowness-Kurve **B** der Longitudinal-Welle im Stahl hat den Radius 1/5920 ms/mm;
- die Slowness-Kurve **C** der Transversal-Welle im Stahl hat den Radius 1/3260 ms/mm.

Die infolge der Wellenumwandlung entstehende Transversal-Welle im Plexiglas sowie ihre Slowness-Kurve werden in Abb. 6 nicht dargestellt.

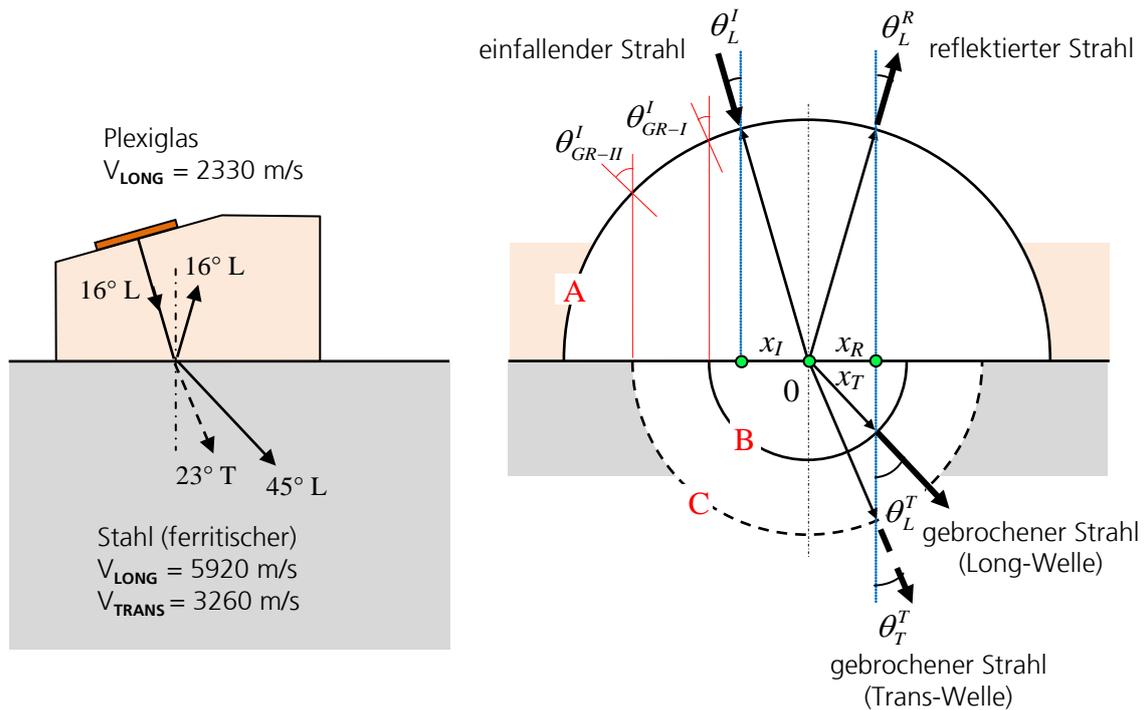


Abb. 6: Illustration des Brechungsgesetzes für die Grenzfläche „Plexiglas-Stahl“

Die Projektion des Slowness-Vektors der Kurve A unter dem Einfallswinkel θ_L^I auf die Trennfläche ist x_I . Nach der Formel (24) müssen die horizontalen Projektionen x_R und x_T der reflektierten bzw. gebrochenen Wellen der x_I -Projektion gleichwertig sein. Zeichnen wir ein Lot zur Grenzfläche im Punkt $x_R = x_T$ und bestimmen die Kreuzungspunkte des Lots mit den Slowness-Kurven A, B und C und werden zu diesen Kreuzungspunkten die Radius-Vektoren zugeführt, entsprechen die den Slowness-Vektoren der reflektierten L- Welle im Plexiglas und der gebrochenen L- und T-Wellen im Stahl. Die entsprechenden Winkel θ_L^R , θ_L^T und θ_T^T sind der Refraktions- bzw. die Brechungswinkeln.

Die grafische Darstellung des Brechungsgesetzes anhand einer Slowness-Fläche (bzw. Slowness-Kurve) gestattet eine anschauliche Erklärung des Brechungsprozesses an einer Grenzfläche auch zwischen isotropen und anisotropen Medien (z. B. Grundwerkstoff und austenitischer Schweißgut) sowie zwischen anisotropen Medien (mit unterschiedlich orientierten austenitischen Stängelkristallen).

5.5.1.2 Charakteristische Flächen eines anisotropen Mediums

Die Richtungsabhängigkeit der Schallausbreitung in einem anisotropen Medium kann man in Polarkoordinaten darstellen. In Anlehnung an die Slowness-Fläche, die die

Richtungsverteilung des Kehrwerts der Phasengeschwindigkeit darstellt, können folgende Flächen aufgebaut werden:

- *Normalfläche* – Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit vom Phasenwinkel
- *Strahlenfläche* – Abhängigkeit der Gruppengeschwindigkeit vom Gruppenwinkel
- „*Wave-Slowness*“-*Fläche* – Abhängigkeit des Kehrwerts der Gruppengeschwindigkeit vom Gruppenwinkel.

Zwischen den obengenannten Flächen existierten bestimmte geometrische Beziehungen (Abb. 7). Eine detaillierte Erklärung der Beziehungen ist in [68] zu finden. Die Konturen der Flächen in der Abbildung entsprechen den für den austenitischen Werkstoff X8CrNi1910 berechneten Richtungsabhängigkeiten der qP-Welle (blaue Linie) und der qSV-Welle (rote Linie).

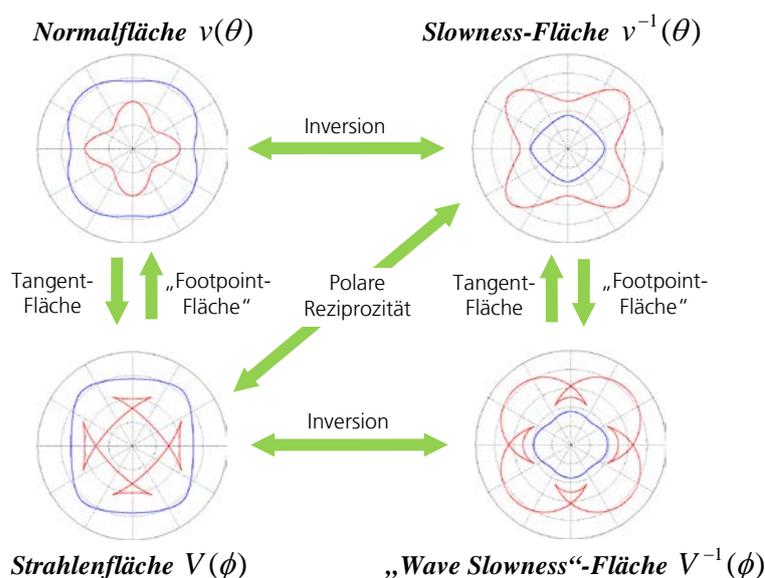


Abb. 7: Beziehungen zwischen den charakteristischen Flächen eines anisotropen Mediums

Besonders hilfreich für das Verständnis der Schallausbreitungs- und Brechungsprozesse in einem inhomogenen anisotropen Werkstoff (beispielsweise im austenitischen Schweißgut) sind die Strahlenfläche und die Slowness-Fläche.

Einen inhomogenen anisotropen Werkstoff kann man als eine Folge von anisotropen, aber homogenen Schichten betrachten. Die Richtung und die Geschwindigkeit der Energieausbreitung in jeder Schicht können durch entsprechende Strahlenflächen

beschrieben werden. Die Brechung an einer Grenze zwischen zwei Schichten kann anhand ihrer Slownes-Flächen gut illustriert werden.

Die Strahlenfläche und die Slowness-Fläche stehen in polarer Reziprozität zueinander [68]. Eine der Eigenschaften dieser geometrischen Beziehung besteht darin, dass der Gruppengeschwindigkeitsvektor \vec{V} in einem anisotropen Werkstoff normal zur Slowness-Fläche ist. Beziehungsweise ist der Slowness-Vektor \vec{m} normal zu der Strahlenfläche (Abb. 8). Der Winkel zwischen den Vektoren entspricht dem Ablenkwinkel Δ .

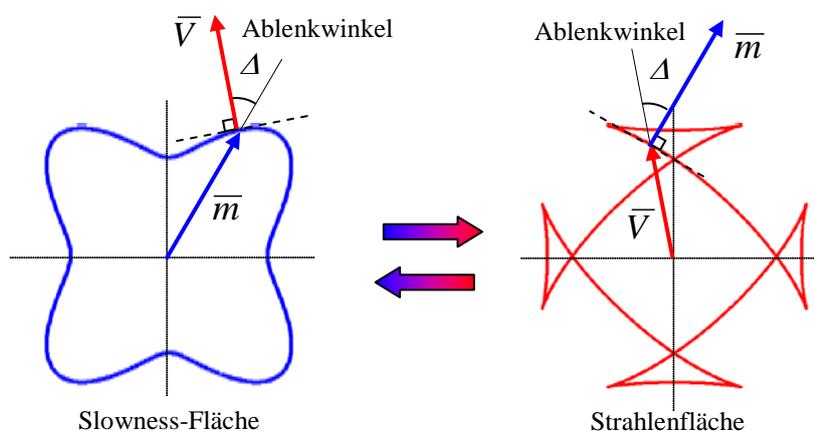


Abb. 8: Slowness-Fläche und Strahlenfläche stehen in der polaren Reziprozität zueinander

Die polare Reziprozität zwischen den Flächen ermöglicht die Bestimmung nicht nur des Phasenwinkels und der Phasengeschwindigkeit, sondern auch des Gruppenwinkels der gebrochenen/reflektierten Welle anhand einer Slowness-Fläche. Der Gruppengeschwindigkeitsvektor ist damit normal zur Berührungslinie, die die Slowness-Fläche im dem Phasenwinkel entsprechenden Punkt berührt. Die Richtung der Energieausbreitung ist also senkrecht auf der Tangente.

5.5.2 Schallbrechung an der Grenze „Grundmaterial-Schweißgut“

In Abb. 9 werden die Slowness-Flächen der longitudinalen Welle in einem isotropen Grundmaterial mit einer konstanten Schallgeschwindigkeit V_1 und der quasi-longitudinalen Welle in einem transversal-isotropen Schweißgut (Stahl X8CrNi1910) dargestellt. Die Slowness-Fläche des Grundmaterials hat die Form eines Kreises mit dem Radius $1/V_1$. Die Slowness-Fläche der qP-Welle im Schweißgut entspricht der Abb. 9.

Nehmen wir an, dass aus dem isotropen Grundmaterial eine Welle unter einem Winkel ϕ_1^I auf die Schweißnahtflanke fällt, in der die Stengelkristalle normal zu der Grenzfläche orientiert sind.

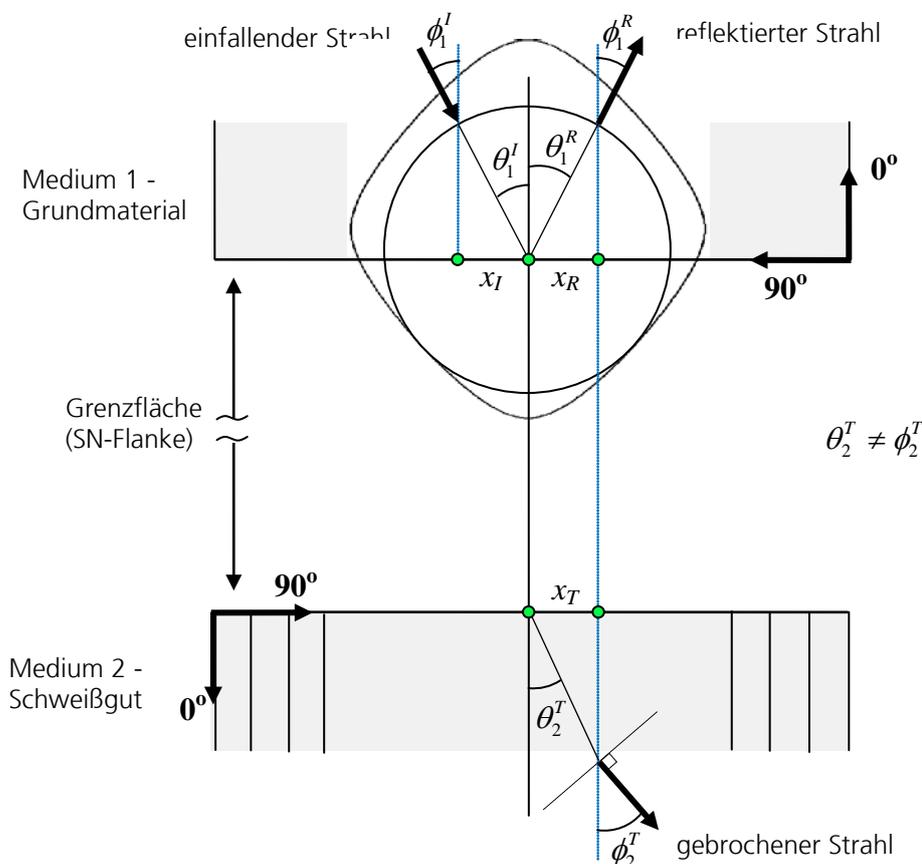


Abb. 9: Illustration des Brechungsgesetzes an der Grenze Grundmaterial/Schweißgut für die qP-Welle

Da im isotropem Grundwerkstoff der Phasengeschwindigkeits-Vektor und der Gruppengeschwindigkeits-Vektor deckungsgleich sind und die gleiche Länge haben, kann der „Ray-Parameter“ wie folgt abgeleitet werden:

$$x_0 = \frac{\sin(\theta_1^I)}{V_1} = \frac{\sin(\phi_1^I)}{V_1} \quad (25)$$

Entsprechend dem Snellius'schen Gesetz für ein anisotropes Medium (22), müssen die Projektionen der Radius-Vektoren auf die horizontale Achse für die einfallende, reflektierte und gebrochene Welle gleich sein.

Somit kann die Gleichung (25) wie folgt umgeschrieben werden:

$$\left| \frac{\sin(\theta_1^I)}{V_1} \right| = \left| \frac{\sin(\theta_2^T)}{V_2(\theta_2^T)} \right| = \left| \frac{\sin(\theta_1^R)}{V_1} \right| \quad (26)$$

Die reflektierte Welle breitet sich in isotropem Grundmaterial unter dem Winkel $\phi_1^R = \theta_1^R$ aus. Aus (26) folgt, dass der Reflexionswinkel gleich dem Einfallwinkel ist. Durch die Lösung der Gleichung (26) kann man den Refraktionsphasenwinkel θ_2^T ermitteln. Danach werden nach (19) und (20) die Gruppengeschwindigkeit und der Gruppenwinkel bestimmt, unter welchen sich die gebrochene Welle in anisotropem Schweißgut ausbreitet. Der Gruppenwinkel ϕ_2^T ist normal zur Berührungslinie mit der Slowness-Fläche im Medium 2 (siehe Abb. 9).

5.5.3 Schallbrechung an den Korngrenzen

Dasselbe Prinzip gilt für die Brechung der Ultraschallwelle an den Grenzen zwischen den Stängelkristallen. Dabei handelt es sich um den Übergang zwischen zwei transversal-isotropen Materialien. Die akustischen Eigenschaften (Steifigkeitsmatrix) der Materialien sind gleich. Die Symmetrieachsen können aber unterschiedlich orientiert sein, z. B. durch unterschiedliche Wachstumsrichtungen der Stängelkristalle.

In Abb. 10 bilden die Stängelkristalle des Mediums 1 einen Winkel $(90^\circ - \varphi_1)$ bzw. $(90^\circ + \varphi_1)$ mit der Grenzfläche, die Stängelkristalle des Mediums 2 - einen Winkel $(90^\circ - \varphi_2)$ bzw. $(90^\circ + \varphi_2)$.

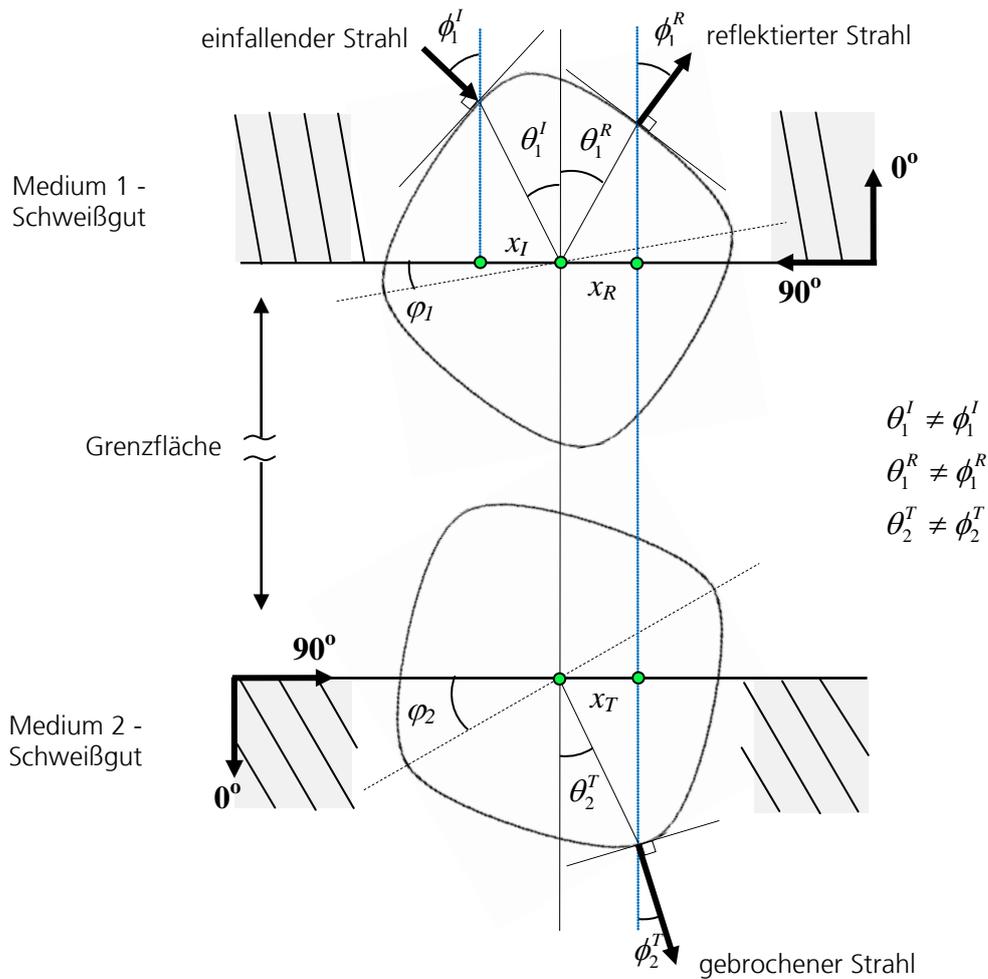


Abb. 10: Illustration des Brechungsgesetzes an der Grenzfläche zwischen zwei transversal-isotropen Medien für die qP-Welle

Obwohl die elastischen Konstanten der Medien als identisch angenommen werden, unterscheiden sich ihre Slowness-Flächen, da die Symmetrieachsen der Stängelkristalle in Bezug auf die Grenznormale gedreht sind:

$$|\vec{r}_1(\theta_1)| = \frac{1}{v(\theta_1 - \varphi_1)} \quad (26)$$

$$|\vec{r}_2(\theta_2)| = \frac{1}{v(\theta_2 - \varphi_2)} \quad (27)$$

wobei \vec{r}_1 und \vec{r}_2 die Radius-Vektoren der entsprechenden Slowness-Flächen sind. Die Winkeln θ_1 und θ_2 sind von der Grenznormale abzutragen.

Entsprechend dem Snellius'schen Gesetz für anisotropes Medium, müssen der reflektierte Strahl und der gebrochene Strahl die Bedingung (24) erfüllen. In Zusammenhang mit den Gleichungen (26) und (27) ergibt sich:

$$\left| \frac{\sin(\theta_1^I)}{V_1(\theta_1^I - \varphi_1)} \right| = \left| \frac{\sin(\theta_1^R)}{V_1(\theta_1^R - \varphi_1)} \right| = \left| \frac{\sin(\theta_2^T)}{V_2(\theta_2^T - \varphi_2)} \right| \quad (28)$$

Durch die Lösung der Gleichung (28) kann man den Refraktionsphasenwinkel θ_2^T bzw. den Reflexionswinkel θ_1^R bestimmen und die entsprechenden Gruppenwinkel berechnen. Die Gruppenwinkel sind normal zur Berührungslinie zu entsprechenden Slowness-Flächen (siehe Abb. 10), stehen also senkrecht auf der Tangente.

5.5.4 Einige Bemerkungen zur Schallausbreitung im anisotropen Schweißgut

Die graphische Darstellung des Brechungsgesetzes anhand einer Slowness-Fläche ermöglicht die Erläuterung der Phänomene, die in einem anisotropen inhomogenen Medium auftreten können. Solche Effekte erschweren in der Praxis die Ultraschallprüfung von anisotropen inhomogenen Werkstoffen (u. a., von austenitischen, nickelbasierten und Mischschweißnähten) und müssen bei der Auswertung der Prüfergebnisse berücksichtigt werden.

5.5.4.1 Wellenumwandlung an Korngrenzen

In Analogie zu den isotropen Werkstoffen (Abb. 6), findet an den Grenzflächen der isotropen/anisotropen bzw. anisotropen/anisotropen Medien eine Wellenumwandlung statt.

In Abb. 11 wird eine Grenzfläche zwischen zwei Medien dargestellt. Das untere Medium ist ein transversal-isotropes Medium, dessen Symmetrieachse bezüglich der Grenzfläche geneigt ist. Die Slowness-Flächen der qP- und qSV-Wellen sind entsprechend der Symmetrieachse gedreht.

Nehmen wir an, dass aus dem oberen (z. B., isotropen) Medium eine longitudinale Welle auf die Grenzfläche fällt. Der Ray-Parameter ist x_r . Der Ray-Parameter der gebrochenen qP- und qSV-Wellen ist $x_r = x_l$. Für beide Wellenmoden entsprechen dem Ray-Parameter je zwei Werte des Phasenwinkels und zwei Werte des Gruppenwinkels (Gruppengeschwindigkeitsvektoren **1**, **2**, **3** und **4** in Abbildung 11). Da die Vektoren **2** und **4** nach oben von der Grenzfläche ausgerichtet sind (Gruppenwinkel $>90^\circ$), stellen

sie die imaginären Wellen dar und haben keine physikalische Bedeutung. Also, breiten sich im unteren Medium die gebrochene qL-Welle **1** und die gebrochene qSV-Welle **3** aus.

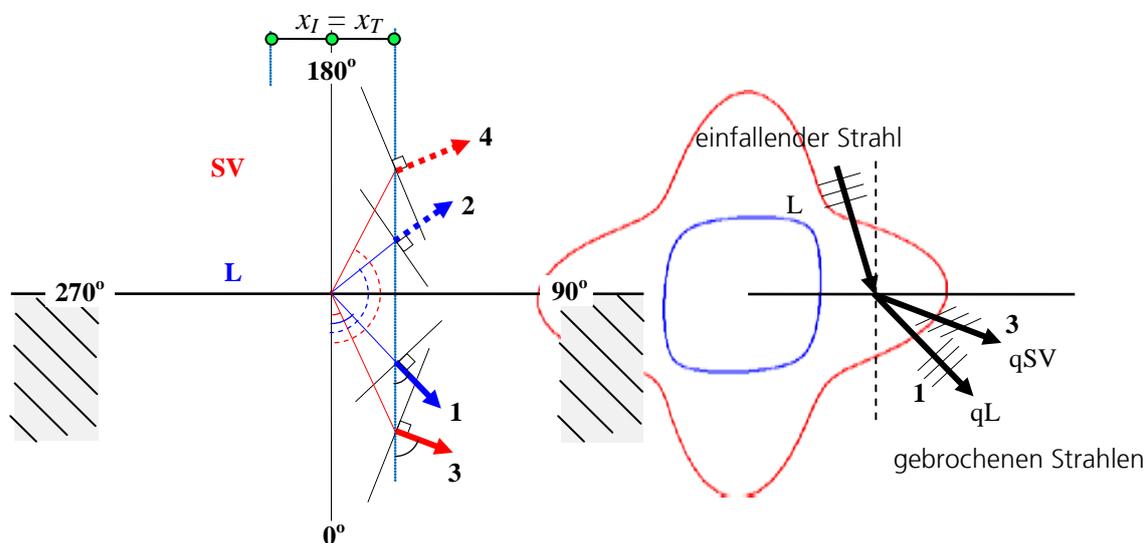


Abb. 11: Wellenumwandlung in einem anisotropen Medium

Die auf die Gruppengeschwindigkeitsvektoren **1** und **3** aufgetragenen Striche (Abb. 11, rechts) sind normal zur Phasengeschwindigkeit und repräsentieren den Polarisationsvektor der Wellen: normal zum Vektor für die qL-Welle und kollinear dem Vektor für die qSV-Welle. In Abbildung ist deutlich zu sehen, dass die Polarisation der Wellen nicht genau parallel oder normal zur Ausbreitungsrichtung ist. Also, sind die gebrochenen Wellen *quasi*-longitudinal und *quasi*-transversal.

5.5.4.2 Aufspaltung der Transversal-Welle mit vertikaler Polarisation

Infolge der komplizierten Form der Slowness-Fläche der qSV-Welle können mehr als ein Brechungswinkel existieren, die dem vorgegebenen Wert des Ray-Parameters entsprechen. Nehmen wir an, dass aus dem oberen (z. B., isotropen) Medium eine transversale Welle auf die Grenzfläche fällt (Abb. 12). Der Ray-Parameter ist x_I . Der Ray-Parameter der gebrochenen qP- und qSV-Wellen ist $x_T = x_I$. Dem Ray-Parameter entsprechen vier Werte des Phasenwinkels und vier Werte des Gruppenwinkels (Vektoren **1**, **2**, **3** und **4** in der Abbildung 12). Da die Vektoren **2** und **4** nach oben von der Grenzfläche ausgerichtet sind (Gruppenwinkel $>90^\circ$), stellen sie die imaginäre Wellen dar und haben keine physikalische Bedeutung. Die Vektoren **1** und **3** präsentieren die gebrochenen qSV-Wellen.

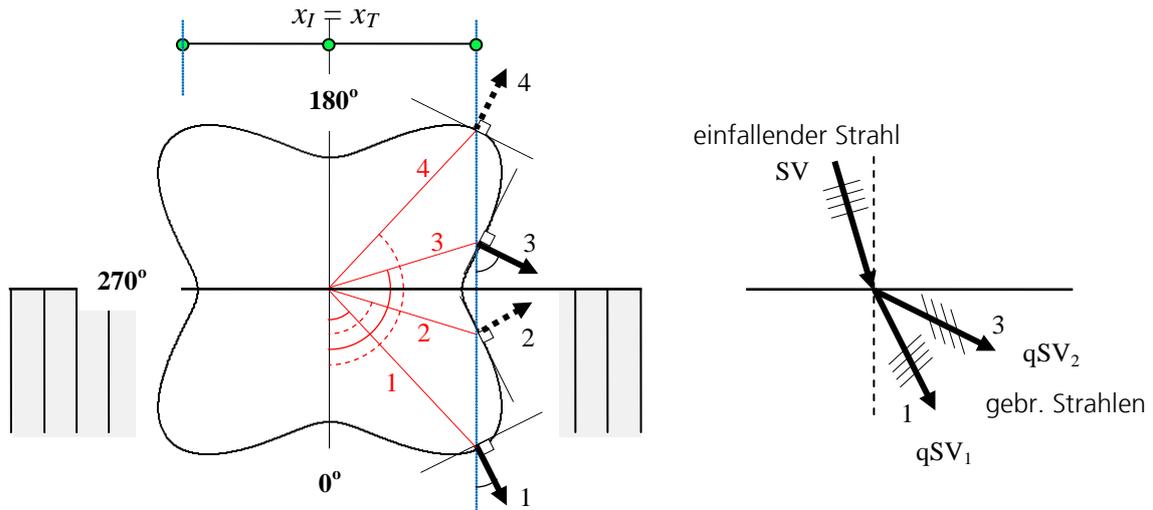


Abb. 12: Aufspaltung der quasi-transversalen Welle in einem anisotropen Medium

5.5.4.3 Mögliche Ausbreitung der gebrochenen quasi-transversalen Welle

Dem Ray-Parameter $x_T = x_I$ können zwei Phasenwinkel der gebrochenen qSV-Welle entsprechen (Abb. 13). Obwohl diese Phasenwinkel im Bereich $[0^\circ-180^\circ]$ sind, kann die Energieausbreitung der gebrochenen Welle infolge der Schallablenkung in negativer Richtung erfolgen ($\phi < 0$).

Der Gruppengeschwindigkeitsvektor **2** in Abb. 13 stellt eine imaginäre Welle dar. Der Vektor **1** präsentiert die reale Richtung der gebrochenen qSV-Welle.

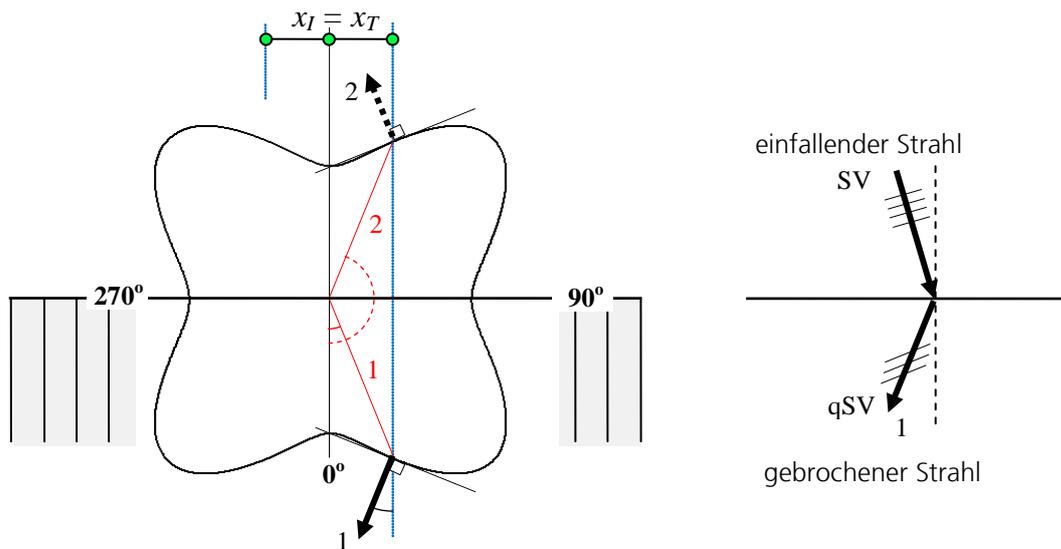


Abb. 13: Mögliche Ausbreitung der quasi-transversalen Welle in einem anisotropen Medium

Die gebrochenen Wellen in einem anisotropen homogenen Medium müssen folgende Bedingungen erfüllen:

$$0 \leq \theta^T \leq 180 \quad \text{und} \quad -90 \leq \phi^T \leq 90 \quad (29)$$

In einem isotropen Medium koinzidieren die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit, dadurch läuft die Beziehung (29) auf ihre übliche Form (30) hinaus:

$$0 \leq (\theta^T = \phi^T) \leq 90 \quad (30)$$

6. Das Prinzip der Sampling-Phased-Array-Prüftechnik mit inverser Phasen Anpassung

6.1 Einführung in die konventionelle Phased-Array-Prüftechnik

Ein Gruppenstrahler (oder „Phased Array“-Prüfkopf) ist ein Ultraschallprüfkopf, dessen aktive „strahlende“ Fläche in einzelne Elemente in einer Richtung (lineares Array) bzw. zweidimensional (Matrix-Array) unterteilt wird. Die Elemente werden unabhängig voneinander angeregt. Eine wichtige Eigenschaft des Gruppenstrahlers ist die Möglichkeit, sein Schallfeld zu steuern. Der Einsatz von programmierbaren Zeitverzögerungen in jedem Ultraschallkanal des Gruppenstrahlersystems ermöglicht eine Schwenkung der Schallrichtung, wobei das Schallfeld durch Superposition von elementaren ungerichteten Wellen entsteht (Abb. 14). Die jeweiligen Zeitverzögerungen müssen so ausgewählt werden [57-62], dass die Maxima der Feldkomponenten von allen Array-Elementen eine Wellenfront bilden, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht.

Andere Möglichkeit besteht in der Fokussierung der akustischen Energie in einem bestimmten Punkt des Volumens (innerhalb des Nahfeldes des Gruppenstrahlers). Dies wird üblicherweise für die Analyseprüfung verwendet.

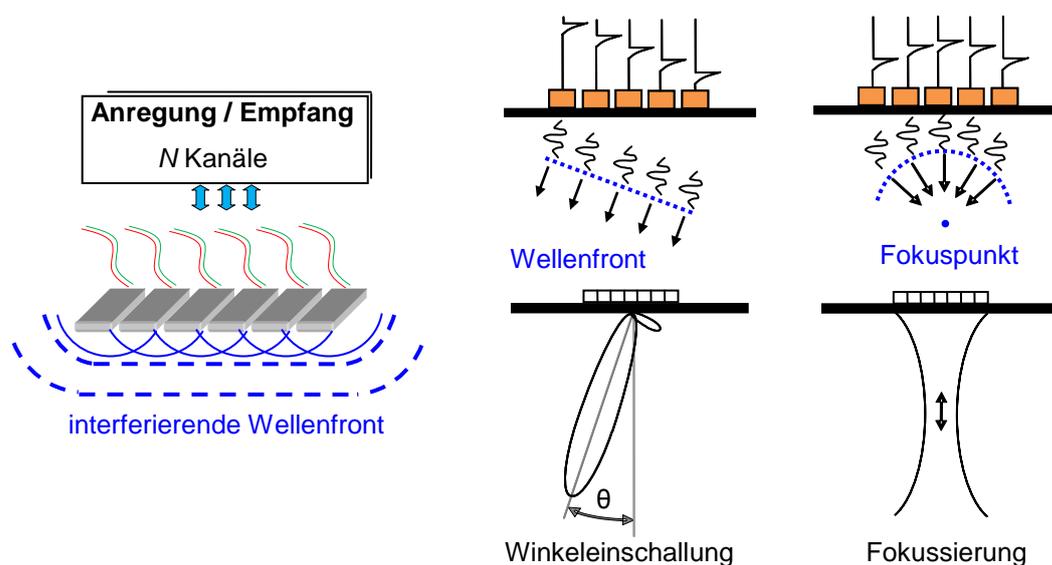


Abb. 14: Wirkungsweise von Phased Array Prüfköpfe

Besondere Vorteile bringt die Gruppenstrahlertechnik bei der Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen, wo mehrere Winkelprüfköpfe durch einen

Gruppenstrahlerwandler ersetzt werden können (Abb. 15 links). Typischerweise werden die Ergebnisse der Gruppenstrahlerprüfung in Form von einem Sektorbild abgebildet, das einen Schnitt über eine Ebene des Prüfobjektes darstellt (Abb. 15 rechts). Dabei werden die Amplituden von einzelnen A-Bildern beim Winkelschwenk farbkodiert, so dass die Informationen über mehrere Einschallwinkel in einem zweidimensionalen Bild entnommen werden können.

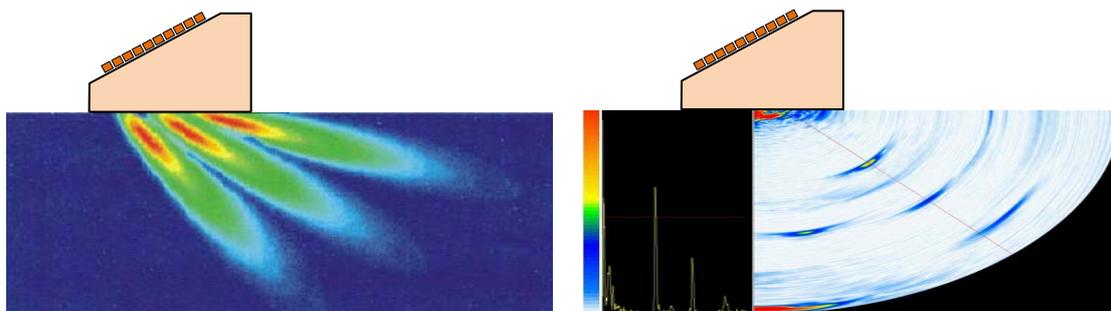


Abb. 15: Simulation des Ultraschallfeldes für verschiedene Einschallrichtungen bei einem Gruppenstrahlerwandler mit Vorsatzkeil und Darstellung der empfangenen Signale (Sektor-Bild und mit dem Cursor ausgewählte A-Bild)

6.2 Messprinzip der „Sampling-Phased-Array“-Technik

Die im Fraunhofer IZFP entwickelte neuartige Prüftechnik basiert auf handüblichen Gruppenstrahlerprüfköpfen. Messtechnisch wird die SPA-Technik dadurch realisiert, dass nur ein Element des Gruppenstrahlerprüfkopfes sendet, während alle anderen Elemente empfangen. Die aufgenommenen Zeitsignale werden abgespeichert. Z. B. sendet in einem Messtakt das i -te Element, entsprechen die von Elementen $1 \dots N$ empfangene Zeitsignale den Elementen A_{ij} der Informationsmatrix (Abb. 16, i : sendendes Element, j : empfangendes Element, N : Anzahl der Elemente eines linearen Gruppenstrahlers, S : Sender, E : Empfänger). Nach N Takten ist die Informationsmatrix voll – sie enthält die gemessenen Zeitsignale von allen Kombinationen von Sendern und Empfängern.

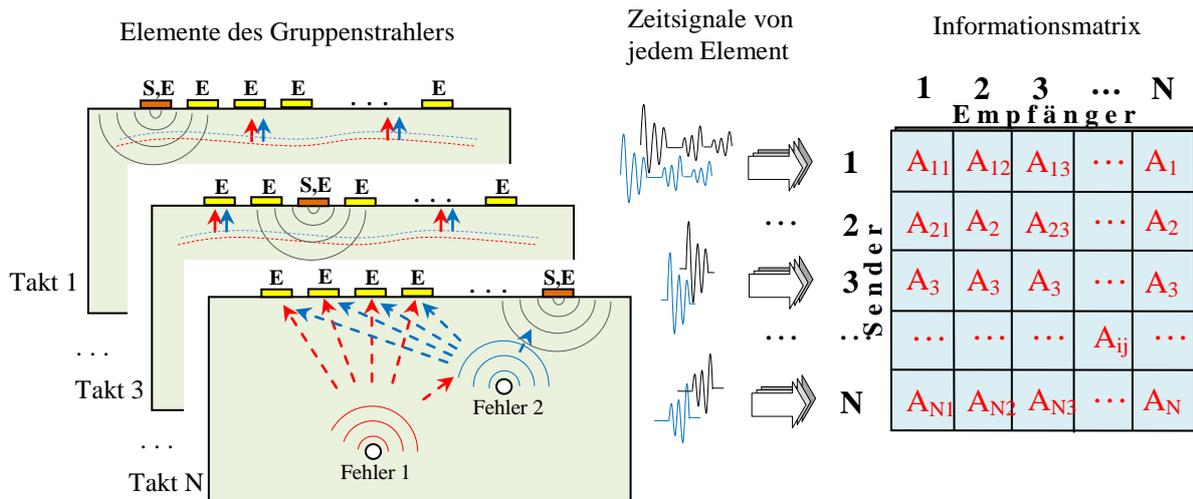


Abb. 16: Messprinzip und Informationsgehalt des Getakteten Gruppenstrahlers

Die dem SPA-Konzept zugrunde liegende Idee besteht darin, dass die physikalische Superposition der elementaren Ultraschallwellen, die bei konventioneller Phased Array Technik unmittelbar im Werkstoff stattfindet, auch synthetisch nachgebildet werden kann. Beim getakteten Gruppenstrahler werden die elementaren Wellen durch die Elemente A_{ij} der Informationsmatrix repräsentiert. Werden diese Signale entsprechend der gewünschten räumlichen Fokussierung aufaddiert, so weist das resultierende synthetische A-Bild eine absolute Äquivalenz mit Laufzeitsignal des konventionellen Gruppenstrahlers auf [22].

6.3 Das Prinzip der synthetischen Fokussierung des SPA-Verfahrens

In der Fachpresse der letzten Jahre lassen sich mehrere bildgebende Ultraschallprüftechniken verfolgen, die relativ ähnliche Ansätze in Verarbeitung der Ultraschallsignale und Rekonstruktion der Ultraschallbilder realisieren [22, 23, 77, 78]. Sie basieren auf der Anwendung ungerichteter Schallfelder zur Beschallung des Bauteilvolumens bzw. zur Erfassung und anschließender Rückprojektion der Ultraschall-Echosignale unter Berücksichtigung der Phaseninformation. Diesen Techniken zugrunde liegt das erweiterte Prinzip des SAFT-Algorithmus (für engl. **S**ynthetic **A**perture **F**ocusing **T**echnique), der zunächst heuristisch begründet und im Jahre 1986 von K.-J. Langenberg [79, 80] theoretisch untermauert wurde.

Die Prinzipien des Algorithmus und der auf der Migrationstechnik basierten SAFT-Bildrekonstruktion werden in [22] und [81] detailliert erläutert. In diesem Abschnitt

werden diese mit Hilfe der Bilder und Formeln aus erwähnten Quellen nochmal kurz zusammengefasst. Der SAFT-Algorithmus ist als verallgemeinerte Version einer beugungstomographischen Rückausbreitung der Daten im Zeitbereich identifiziert [81].

6.3.1 Das Prinzip des SAFT-Algorithmus

Das klassische SAFT-Verfahren wird anhand eines Prüfkopfs realisiert, der eine kleine Apertur besitzt und damit ein sehr divergentes Schallfeld erzeugt. Der Prüfkopf wird auf einem ein- oder zweidimensionalen Raster entsprechend einer flächigen oder linearen Apertur angeordnet. Abbildung 17 zeigt die Konsequenz der Datenbearbeitung bei Anwendung der SAFT-Prüftechnik.

Nehmen wir an, dass ein Prüfobjekt drei Punktreflectoren mit Koordinaten (x_1, z_1) , (x_2, z_2) und (x_3, z_3) besitzt (Abb. 17a). Der Werkstoff des Prüfobjektes wird als homogenisotrop angenommen. An dem Objekt wird ein Ultraschallwandler mit kleiner aktiver Apertur angeordnet. Der Wandler sendet zum Zeitpunkt $t_0=0$ eine ungerichtete akustische Welle aus, die sich der mit konstanter Geschwindigkeit V im Prüfobjekt ausbreitet.

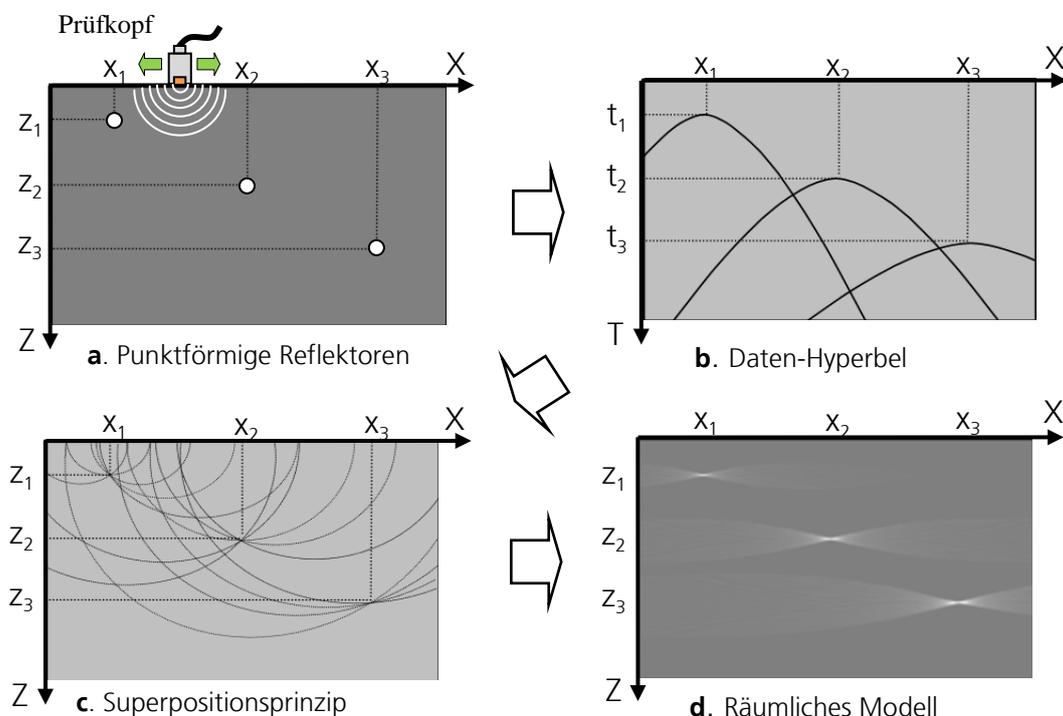


Abb. 17: Zur Erläuterung des SAFT-Algorithmus

Nachdem die Ungängen im Prüfstück von der ankommenden Welle getroffen werden, erzeugen diese als sekundäre Quellen die kugelförmigen Streufelder, die vom Ultraschallwandler empfangen werden. Der Prüfkopf wird an der Messfläche auf einem Raster dx (in der Regel mit dem Schritt von ~ 0.1 Wellenlänge) angeordnet. Die Sende/Empfangsprozedur wird in jeder Messposition wiederholt. Für die Variation des Empfangsortes entstehen im Datenbereich die hyperbelförmigen Laufzeitortskurven (Abb. 17b).

Der Rekonstruktionsvorgang besteht in der Erstellung eines in Pixeln diskretisierten räumlichen Modells des Prüfobjektes und in der Rückprojektion der empfangenen Datenhyperbel ins Modell unter Berücksichtigung der Messpositionen (Abb. 17c). Der Übergang vom Zeitbereich (empfangenen Laufzeitortskurven) zum räumlichen Modell erfolgt durch den Multiplikator V (nämlich die Schallgeschwindigkeit). Mathematisch formuliert, wird jedem Pixel (x', z') im Rekonstruktionsraum der Wert R zugeordnet, der einem Integral der skalaren Messdaten η entlang den Datenhyperbeln B gemäß

$$R(x', z') = \int_B \eta \left(x, t = 2 \frac{\sqrt{(x-x')^2 + (z-z')^2}}{V} \right) dx \quad (31)$$

entspricht, wobei x die Reihe der Messpositionen ist. Dieser Ansatz wird in [81] als pixelorientierte Formulierung der SAFT-Rekonstruktion genannt und wird in Abb. 18(a) illustriert. Liegt tatsächlich einer der Streuer im betrachteten Pixel (x', z') , so liefert die Integrationsprozedur durch eine konstruktive Interferenz der Messdaten einen hohen Wert als Ergebnis (Abb. 17 c, d). Anderenfalls wird dem Pixel infolge einer destruktiven Interferenz ein niedriger Wert zugeordnet. Nach Berechnung von allen Pixeln entstehen im räumlichen Modell die „Knoten“ (die Punkte, wobei die Messsignale konstruktiv miteinander interferieren), die den Reflektoren im Prüfobjekt entsprechen (Abb. 17d).

Eine alternative Formulierung der SAFT-Rekonstruktion (A-Scan-orientierte Formulierung) besteht in der Rückprojektion der empfangenen Laufzeitsignale ins räumliche Modell des Prüfobjektes. Solche Formulierung des Rekonstruktionsvorganges vereinfacht im Weiteren die Erläuterung des Prinzips der inversen Phasen Anpassung bei der SPA-Prüfung von anisotropen Werkstoffen.

Da der für SAFT verwendete Prüfkopf eine kleine aktive Apertur besitzt und dadurch eine sehr divergente Sende-Empfangs-Richtcharakteristik hat, beschallt er quasi den

gesamten Halbraum unter sich und empfängt die gebeugten/reflektierten akustischen Wellen von allen Richtungen gleichzeitig. Die Information über der Reflektorlage ist in einem einzeln betrachteten A-Scan nur in der Form der Laufzeit vorhanden. Gibt es in dem A-Scan $A(t)$ eine Anzeige bei der Laufzeit $t=t_1$ (Abb. 18b), so bedeutet es, dass der Reflektor in einem der Ortslinie $O = 1/2 \times \text{Isochrone } t_1 \times \text{Schallgeschwindigkeit}$ gehörigen Punkt liegt. Die Rückprojektion des A-Scans $A=A(t)$ ins räumliche Modell besteht in der Zuordnung des Wertes $A_I=A(t_I)$ zu jedem Pixel, durch welchen diese Ortslinie läuft. In der Abbildung wird die Schallgeschwindigkeit für die bessere Übersichtlichkeit als $V = 2$ (bel. Einh.) festgelegt. In dieser Weise werden die empfangenen A-Signale von verschiedenen Messpositionen in das räumliche Modell projiziert und dort zusammenaddiert. Durch konstruktive und destruktive Interferenz deuten sich im Modell die sekundären Schallquellen (Reflektoren) an. Je mehr Ultraschallinformation in das Modell eingeht, desto höher ist das Signal/Rausch-Verhältnis bei der SAFT-Rekonstruktion.

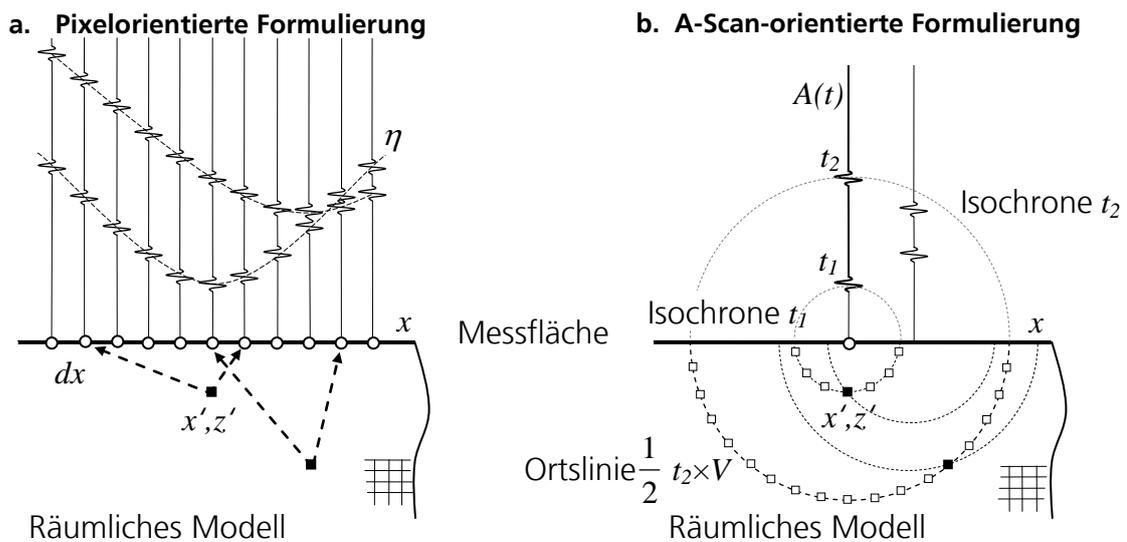


Abb. 18: Pixelorientierte und A-Scan-orientierte Formulierungen der SAFT-Rekonstruktion [81]

6.3.2 Sampling-Phased-Array-Rekonstruktion eines Sektor-Bildes

Ein Gruppenstrahler-Wandler besteht aus N Elementen, die in einem bestimmten Abstand voneinander angeordnet sind. Da die Elemente in der Regel die fast gleichen physikalischen Eigenschaften haben, können die in Analogie zum üblichen SAFT-Algorithmus als N Messpositionen eines Einzelschwinger-Prüfkopfes betrachtet werden. Die Gruppenstrahler-Elemente sind in einer (Linien-Array) bzw. in zwei (Matrix-Array)

Dimensionen klein im Vergleich zur Wellenlänge und erzeugen dadurch ein sehr divergentes Schallfeld. Diese Eigenschaft macht sie besonders geeignet für das SAFT-Verfahren. Als Erweiterung des üblichen SAFT-Algorithmus, das normalerweise die Ultraschallsignale eines Einzelschwinger-Prüfkopfes verarbeitet, können beim getakteten Gruppenstrahler verschiedene Kombinationen von Sendern und Empfängern in der Rekonstruktion berücksichtigt werden. Dieser Fakt erweitert den Informationsgehalt des Verfahrens und verbessert damit sein Fehlernachweisvermögen. Die Formel 31 erweitert sich in diesem Fall zu:

$$R(x', z') = \int_B \eta \left(x, t = \frac{\sqrt{(x_S - x')^2 + (z_S - z')^2}}{V} + \frac{\sqrt{(x_E - x')^2 + (z_E - z')^2}}{V} \right) dx \quad (32)$$

wobei (x_S, z_S) und (x_E, z_E) die Koordinaten des Senders bzw. des Empfängers sind.

Die für jedes Arrayelement nach dem SPA-Prinzip gemessenen und gespeicherten Ultraschall-Laufzeitsignale dienen als Eingangsdaten für die tomographische Bildrekonstruktion.

Das Prinzip der SPA-Rekonstruktion wird am Beispiel eines linearen Phased-Array-Wandlers erläutert. Im Falle eines Linien-Arrays stellt der rekonstruierte Bereich eine Ebene senkrecht zur Oberfläche des zu untersuchenden Objekts dar. Das entsprechende Bild wird in Analogie zu konventioneller Gruppenstrahler-Technik als Sektor-Bild bezeichnet.

Die Rückprojektion der gemessenen Laufzeitsignale wird auf folgende Weise realisiert. Das Sektorbild wird in kleine Segmente (Pixels) unterteilt. Für jeden Pixel innerhalb des rekonstruierten Bereiches wird die Schalllaufzeit T_{ij} von den aktuellen Positionen des Senders (X_i, Z_i) und des Empfängers (X_j, Z_j) zu diesem Bildpixel (X_m, Z_m) und zurück unter Berücksichtigung der bekannten Schallgeschwindigkeit V berechnet. Dann wird der zu diesem Pixel gehörige Amplitudenwert des entsprechenden Laufzeitsignals A_{ij} auf die bereits für diese Pixelkoordinate gespeicherten Amplituden aufaddiert (Abb. 19). Diese Prozedur wird für jede „Sender-Empfänger“-Kombination wiederholt.

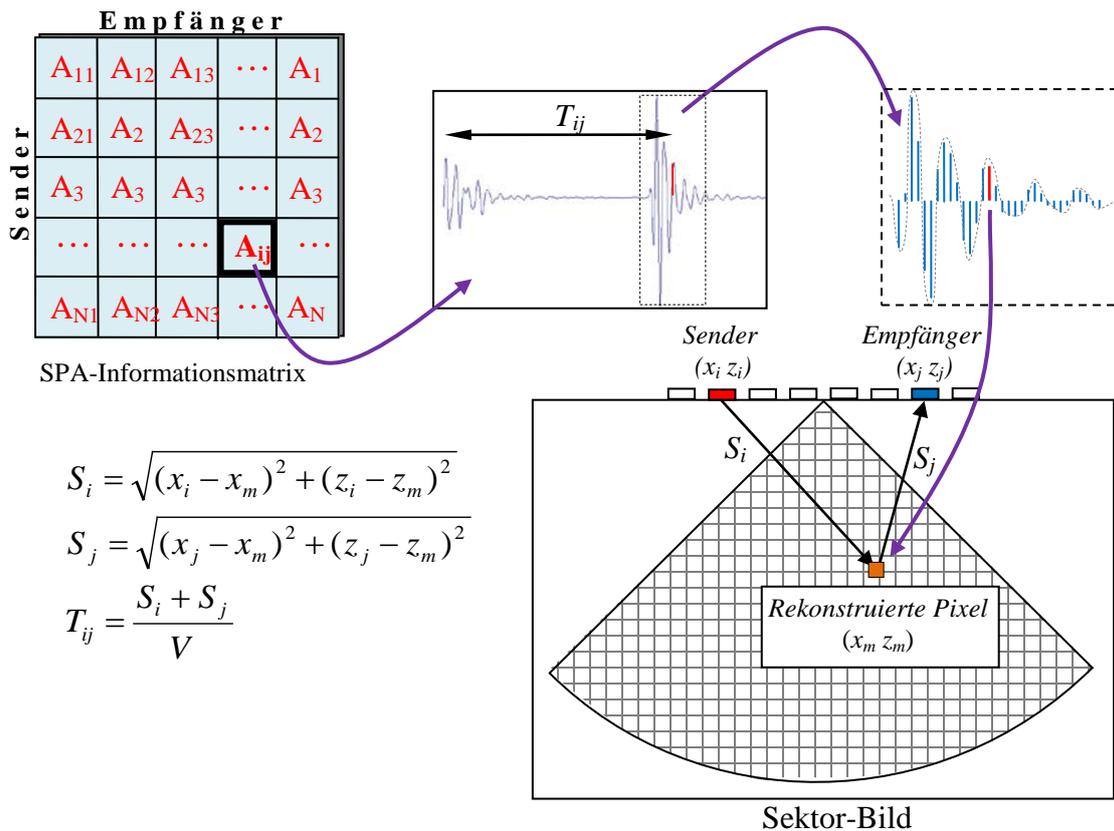


Abb. 19: Das Prinzip der Sektor-Bild-Rekonstruktion

Da die von den Gruppenstrahler-Elementen erzeugten Schallfelder eine sehr divergente Richtcharakteristik aufweisen, enthalten einzelne Elemente der Informationsmatrix keine Information über azimuthale Position des Reflektors – der geometrischer Ort des projizierten Signals A_{ij} entspricht dem Halbkreis bei $i=j$ bzw. der Halbellipse bei $i \neq j$ (Abb. 20b). Je mehr Messdaten (Komponenten der SPA-Informationsmatrix) ins Sektor-Bild projiziert und aufaddiert werden (Abb. 20c, Abb. 20d), desto deutlicher zeichnen sich die Reflektoren im rekonstruierten Sektor-Bild ab (Abb. 20e).

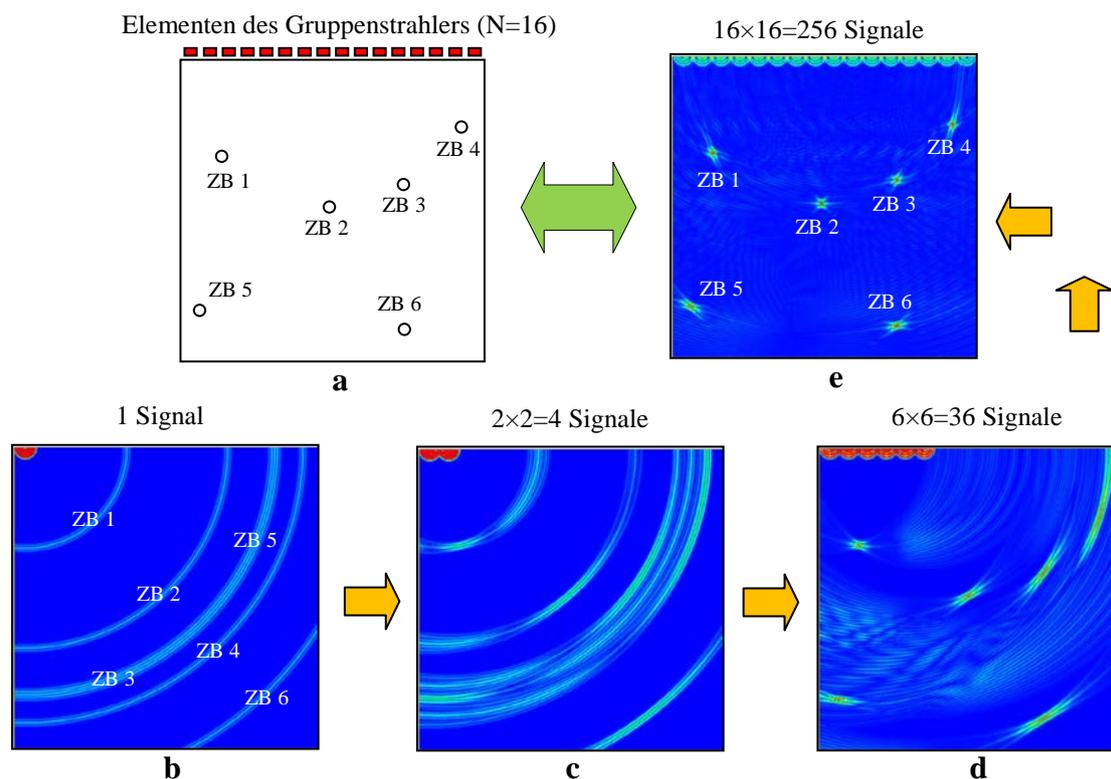


Abb. 20: Beispiel der Sektorbild-Rekonstruktion für 16-Elemente-Gruppenstrahler. Die empfangenen Laufzeitsignale von sechs Zylinderbohrungen werden nach dem SPA-Rekonstruktionsprinzip zurückprojiziert

Die Ultraschall-Laufzeiten von jedem Element des Wandler-Arrays zu jedem Volumenpunkt können im Vorfeld berechnet und in der so genannten Look-Up Tabelle gespeichert werden, sodass der Bildrekonstruktionsvorgang wesentlich beschleunigt werden kann.

6.3.3 Erstellung eines Compound-B-Bildes

Der physikalisch realisierbare Fokusbereich und damit das verbesserte Fehlernachweisvermögen der getakteten Gruppenstrahlertechnik in einer Position des Gruppenstrahlerwandlers (also im Sektor-Bild) beschränken sich auf sein Nahfeldbereich. Das bedeutet, dass bei größeren Bauteildicken die Vorteile des Verfahrens nur in einer schnellen Sektor-Bild-Rekonstruktion und Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit besteht. Je nach Prüfbereichgröße kann die Bildwiederholrate bis zu einigen Kilohertz betragen, was bei einem automatisierten Prüfvorgang einer Prüfgeschwindigkeit bis zu einigen Meter pro Sekunde entspricht.

Allerdings kann auch bei größeren Wandstärken ein verbessertes Auflösungsvermögen erzielt werden, indem die zweidimensionalen Schnittbilder (Sektor-Bilder) von benachbarten Prüfkopfpositionen überlagert werden können. Damit ergibt sich die Möglichkeit, durch den Aufbau einer eindimensionalen synthetischen Apertur (Abb. 21), den Fokusbereich auf die gesamte Bauteildicke zu erweitern. Im Gegensatz zur klassischen SAFT-Rekonstruktion werden dabei nicht einzelne Zeitsignale, sondern 2-dimensionale Amplitudenfelder überlagert. Ähnlich wie bei der SAFT-Rekonstruktion vergrößert sich dadurch der physikalisch realisierbare Fokussierungsbereich, indem ein zweidimensionales Datenfeld (Compound-Scan) in einer Schnittebene aufgebaut wird.

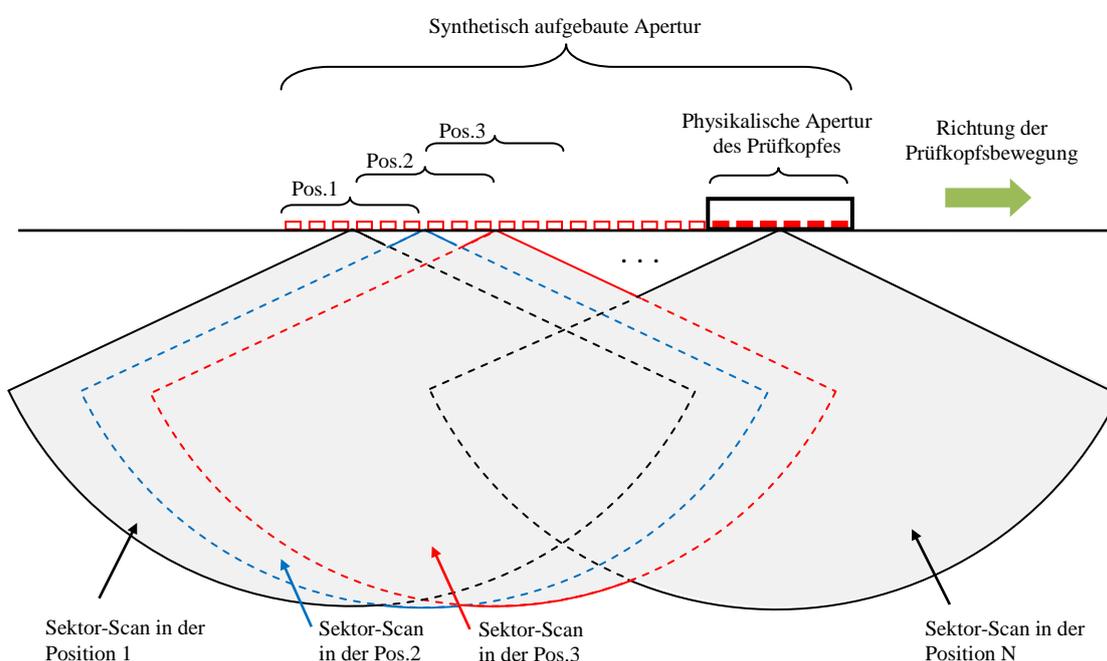


Abb. 21: Aufbau einer synthetischen Apertur

6.3.4 Erstellung eines Volumenbildes

Ein SPA-Volumenbild kann entweder durch Einsatz eines Matrix-Phased-Array-Prüfkopfes oder durch das zweidimensionale Abtasten der Prüffläche anhand eines Linien-Phased-Array erstellt werden. Im letzten Fall werden die Schnittbilder (Compound-Scans) von verschiedenen Messspuren im dreidimensionalen Raum angeordnet. So entsteht das Volumen-Bild des Bauteils (Abb. 22, unten), wobei durch die vergrößerte synthetische Apertur die gesamte Bauteildicke als physikalisch realisierbarer Fokusbereich erfasst werden kann.

Da die, durch die Elemente des Linien-Array-Prüfkopfes erzeugten, Schallfelder eine bestimmte Divergenz auch in der Index-Richtung aufweisen, können die einzelnen Schnittebenen von nebeneinander liegenden Spuren bei ausreichend kleinen Spurbständen ebenfalls „verSAFTet“ werden. Bei dieser Rekonstruktion ist allerdings zu beachten, dass die Apertur eines Linienarray-Elements senkrecht zur Schwenkebene (Elementlänge) in der Regel relativ groß in Bezug auf die Ultraschall-Wellenlänge ist und damit nur eine beschränkte synthetische Apertur in der Index-Richtung aufgebaut werden kann.

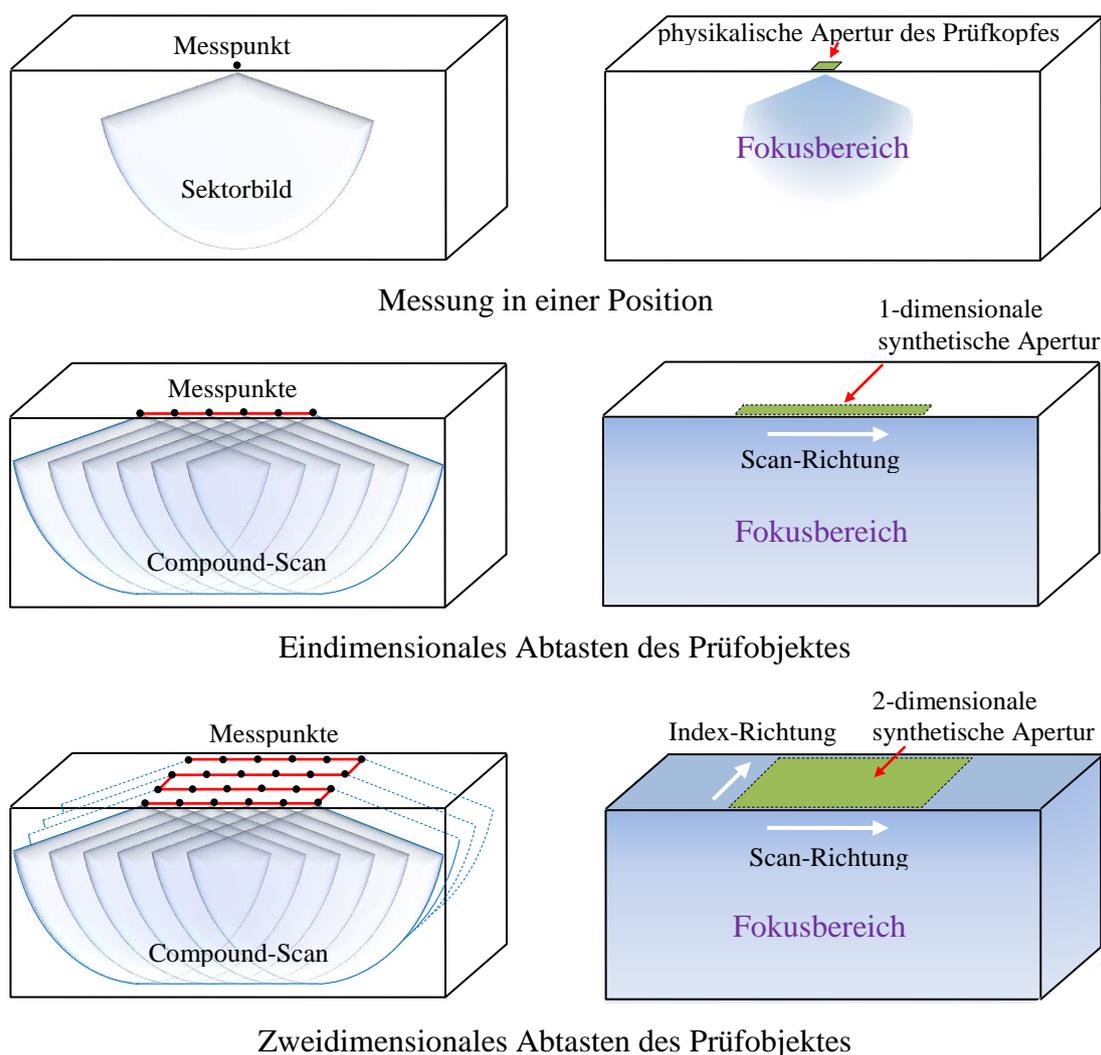


Abb. 22: Aufbau ein- bzw. zweidimensionaler synthetischer Apertur

Das zweidimensionale Abtasten des Prüfobjektes anhand eines Linien-Arrays gestattet eine „quasi“-dreidimensionale tomografische Volumenrekonstruktion, die in Echtzeit,

d.h. während des Scanvorganges innenliegende Materialunregelmäßigkeiten orts- und dimensionsgetreu abbildet.

In entsprechenden Projektionsbildern (B-, C-, D-Bilder) können die Abmessungen des Befundes mittels spezieller Analysewerkzeuge bestimmt werden. Als Beispiel werden in Abb. 23 die Sampling Phased Array-Prüfergebnisse an einem plattierten ferritischen Testkörper dargestellt.

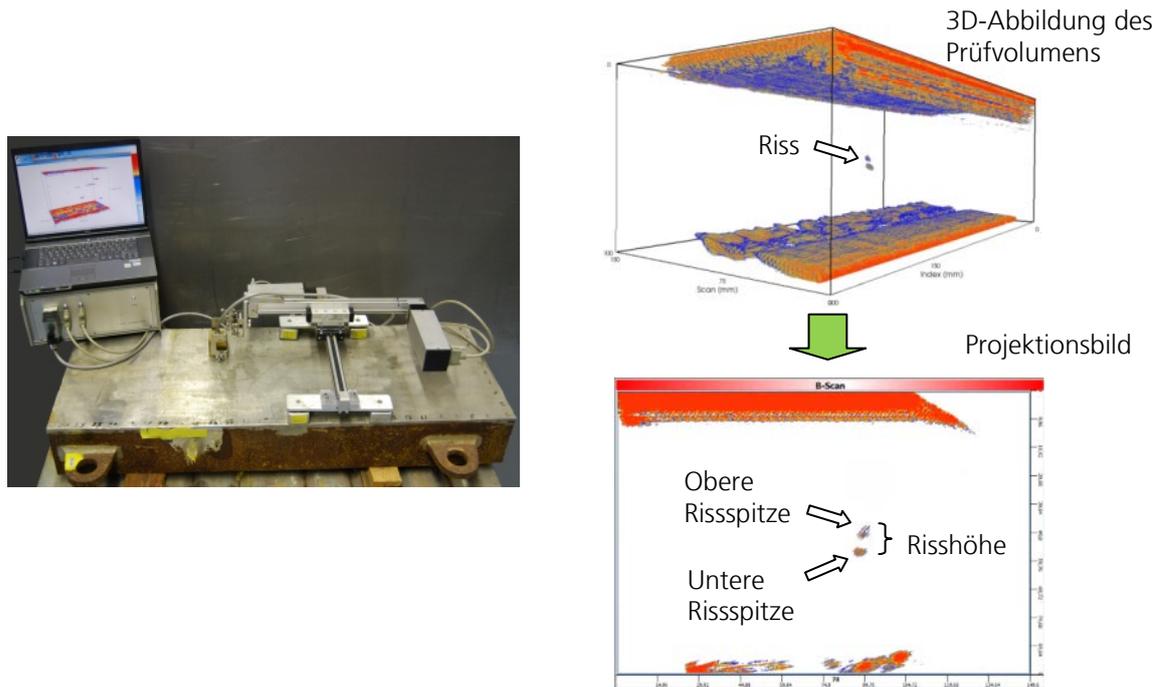


Abb. 23: Quantitative Auswertung eines Befundes durch 3D-Visualisierung des Bauteilvolumens

6.4 Das Prinzip der inversen Phasenanpassung bei Ultraschallprüfung von akustisch anisotropen Werkstoffen

Neben der Beschleunigung des Prüfvorganges sowie der verbesserten Empfindlichkeit und des Auflösungsvermögens im Nahfeld eines Phased-Array-Prüfkopfes, hat die Sampling Phased Array Technik einen weiteren wesentlichen Vorteil. Ihr Messprinzip gestattet die Anregung und Aufnahme von Ultraschall-Elementarwellen und, bei entsprechender Simulation der Schallausbreitung, auch die Fokussierung in einem anisotropen und/oder inhomogenen Werkstoff. Diese Technik der inversen Phasenanpassung („Reverse Phase Matching“) bringt eine wesentliche Verbesserung des Fehlernachweisvermögens bei der Prüfung von Werkstoffen mit bekannter Anisotropie [82].

Die akustischen Eigenschaften eines anisotropen Mediums charakterisieren sich u. a. durch Ablenkung der Energieausbreitungsrichtung von dem Phasenausbreitungsvektor. Die Phase einer Ultraschallwelle breitet sich mit der Phasengeschwindigkeit v unter dem Phasenwinkel θ aus. Ihre akustische Energie – mit Gruppengeschwindigkeit V unter dem Gruppenwinkel ϕ . Sowohl die Längen der beiden Geschwindigkeitsvektoren als auch der Ablenkwinkel zwischen beiden hängen für alle Wellenarten von der Steifigkeitsmatrix des Werkstoffs ab.

Werden die gemessenen Ultraschallsignale unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit nach dem SAFT-Algorithmus zurück ins Volumen projiziert, entsteht das Sampling Phased Array Sektor-Bild mit synthetischer Fokussierung in jedem Volumenpunkt. Man spricht von inverser Phasenanpassung, wenn diese Ultraschallbildrekonstruktion unter Berücksichtigung der Richtungsabhängigkeit der akustischen Eigenschaften und der Inhomogenität des Werkstoffes durchgeführt wird. Im einfachsten Fall eines anisotropen homogenen Mediums (z. B. Kohlefaserstrukturen mit einer Phasenorientierung oder metallische Monokristalle) besteht die inverse Phasenanpassung in einer relativ einfachen winkelabhängigen Korrektur des Schallgeschwindigkeitswertes bei der Berechnung der Ultraschalllaufzeiten zu einzelnen Volumenpunkten. Im Falle eines anisotropen inhomogenen Werkstoffes soll außerdem die Schallbrechung an den Schichtgrenzen in Betracht gezogen werden. Für solche Materialien erfolgt die inverse Phasenanpassung unter anderem durch Berücksichtigung des Brechungsgesetzes, das sowohl die Geschwindigkeit als auch die Richtungen der gebrochenen bzw. reflektierten Wellen beschreibt.

Basierend auf der A-Scan-orientierte Interpretation der SAFT-Rekonstruktion (Abschnitt 6.3.1, Abb. 18b), kann man die Aufgabe bei der inversen Phasenanpassung so formulieren: sie besteht in der Bestimmung der Verteilung von Isochronen, entsprechend denen die empfangenen Laufzeitsignale in das räumliche Modell des Prüfobjektes projiziert werden müssen.

6.4.1 Inverse Phasenanpassung in einem homogenen akustisch anisotropen Medium

Unter einem akustisch homogenen anisotropen Werkstoff versteht man das Medium, dessen akustische Eigenschaften nur von der Richtung abhängen und sich räumlich gar nicht oder nur unbedeutend ändern. Als Beispiel hierfür dienen einige Faserverbundwerkstoffe. Die Wirkung der Anisotropie auf die Ausbreitung der elastischen Wellen ist

im Fall eines Faserverbundwerkstoffes besonders ausgeprägt: der Unterschied zwischen Minimal- und Maximalwert der Schallgeschwindigkeit kann mehr als hundert % erreichen. In Abb. 24 wird die Wirkung der Faserrichtung auf das von einem senkrecht einschallenden Prüfkopf erzeugte Schallfeld dargestellt. Die Schallfelder wurden anhand der Punktquellensynthese-Methode [83] berechnet.

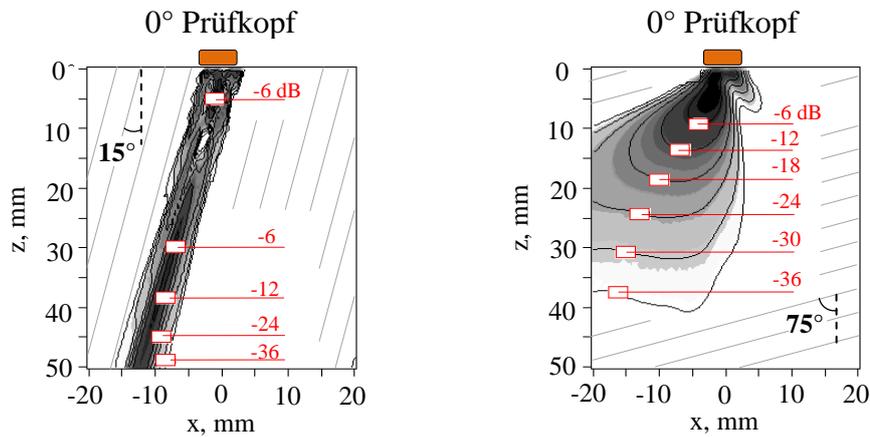
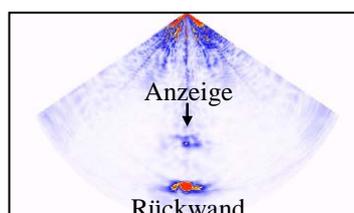


Abb. 24: Einfluss der Faserrichtung eines homogenen anisotropen Kohlefaserwerkstoffes auf das Schallfeld eines senkrechten Prüfkopfes

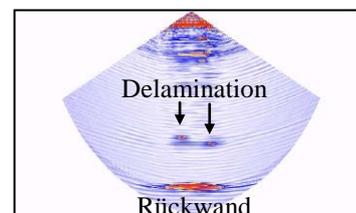
Sind die elastischen Eigenschaften des Prüfobjektes bekannt, kann die akustische Anisotropie bei der Bildrekonstruktion berücksichtigt werden. Trotz der Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit breiten sich die elastischen Wellen in einem homogenen Werkstoff geradlinig aus. Das Prinzip der Sektorbildrekonstruktion ist damit ähnlich dem für isotrope Werkstoffe (6.3.2). Die inverse Phasenanpassung für ein homogenes anisotropes Medium besteht darin, die Berücksichtigung der Gruppengeschwindigkeit in der Ausbreitungsrichtung zwischen dem jeweiligen rekonstruierten Pixel und dem sendenden bzw. empfangenden Array-Element. Die SPA-Technik mit inverser Phasenanpassung gestattet die ortsgetreue Darstellung der Materialungängen (Abb. 25).



4 MHz PA-Prüfkopf am CFK-Testkörper



Sektorbild von konventioneller PA-Technik (Schwenkung)



Sektorbild von der SPA-Technik mit inverser Phasenanpassung

Abb. 25: Vergleich der Ergebnisse der Ultraschallprüfung an einem homogenen akustisch anisotropen CFK-Testkörper

6.4.2 Inverse Phasen Anpassung in einem inhomogenen akustisch anisotropen Medium

Die meisten anisotropen Werkstoffe in der Prüfpraxis weisen neben der akustischen Anisotropie eine inhomogene Struktur auf. Das typische Beispiel dafür sind austenitische Schweißnähte. Während des Schweißprozesses bilden sich im Schweißgut sogenannte Stängelkristalle. Ihre Wachstumsrichtung ist in der Regel durch die Richtung der Wärmeableitung bestimmt. So entsteht ein anisotropes inhomogenes Gefüge mit einer charakteristischen Textur.

Im Gegensatz zu homogenen Materialien breitet sich die Ultraschallwelle in solchen Strukturen nicht geradlinig aus, da die Wellenfront an den Korngrenzen der Brechung unterliegt. Zur Berechnung von korrekten Laufzeitwerten von jedem Gruppenstrahler-Element zu jedem Volumenpunkt (x, z) werden sowohl der Schallpfad als auch die Schallgeschwindigkeit entlang dieses Pfades benötigt (Abb. 26). Dabei muss berücksichtigt werden, dass sich die Schallgeschwindigkeit entlang des Pfades ändert und ihrer Lokalwerte für Berechnung der Laufzeit benutzt werden müssen.

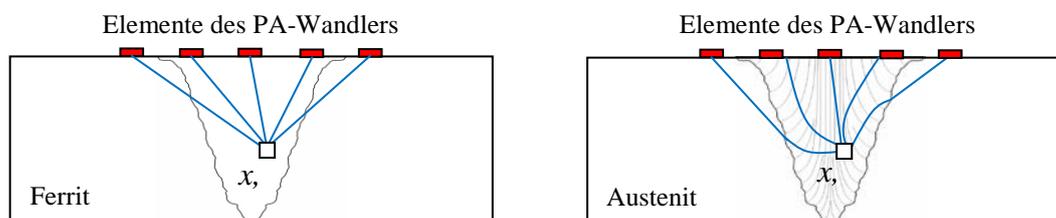


Abb. 26: Schematische Darstellung der Laufwege der Laufzeit von Phased-Array-Elementen zu einem Volumenelement (x,z) für ferritische und austenitische Schweißnähte

Die korrekte inverse Phasen Anpassung für ein anisotropes inhomogenes Medium ist nur dann möglich, wenn die genauen Kenntnisse über die Materialstruktur vorliegen, anhand deren eine Simulation der Ultraschallwellen-Ausbreitung vorgenommen werden kann. Heutzutage verwendet man verschiedene Methoden für die Simulation der Ausbreitung der elastischen Wellen, wie z. B., die Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT) [84, 85], die generalisierte Punktquellensynthese (GPSS) [83] u. a. Eine der einfachsten und zugleich schnellsten Modellierungsmethoden ist das „Ray Tracing“ [86] – die Schallstrahlverfolgung unter Berücksichtigung des Brechungsgesetzes, die in ihrer einfachsten Ausführung keine Amplitudenwerte berücksichtigt.

6.5 „Sampling Phased Array“ mit verteilten Aperturen

Sowohl die physikalische Fokussierung mit konventioneller Phased-Array-Technik als auch die synthetische Fokussierung mit Sampling-Phased-Array verbessert das Auflösungsvermögen nur innerhalb des Nahfeldes des Ultraschallwandlers. Da die Nahfeldlänge eines Ultraschallwandlers unter anderem von seinen physikalischen Abmessungen abhängt, kann der Fokussierungsbereich in einer Position des Prüfkopfes durch Vergrößerung seiner Apertur erweitert werden. Im Fall eines Phased-Array-Wandlers kann man dies (unter Beibehaltung der gleichen Anzahl der Ultraschallkanäle bzw. Elementen) durch Vergrößerung des Elementabstandes realisieren.

Regt der konventionelle Gruppenstrahler Ultraschallwellen unter einem Einschallwinkel θ an, so entsteht das Schallfeld, dessen Richtcharakteristik durch folgende Formel [87]

$$H_{\theta}(\varphi) = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi a \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\frac{\pi a \sin \varphi}{\lambda}} \right| \left| \frac{\sin\left(N \frac{\pi d (\sin \theta - \sin \varphi)}{\lambda}\right)}{N \sin\left(\frac{\pi d (\sin \theta - \sin \varphi)}{\lambda}\right)} \right| \quad (33)$$

beschrieben werden kann. Hierbei sind: $H_{\theta}(\varphi)$ – die normierte Amplitude entlang des Winkels φ , N – Elementanzahl, d – Elementabstand, a – Elementbreite, λ - Wellenlänge.

Wenn der Array-Elementabstand größer als die halbe Wellenlänge ist ($d/\lambda > 0.5$), entstehen in der Richtcharakteristik die Hauptkeulen höherer Ordnung (Abb. 27). Dies ist eine Folge davon, dass das Nyquist-Shannon'sche Theorem (das auch als „Sampling“-Theorem [88] bekannt ist) in diesem Fall nicht befolgt wird.

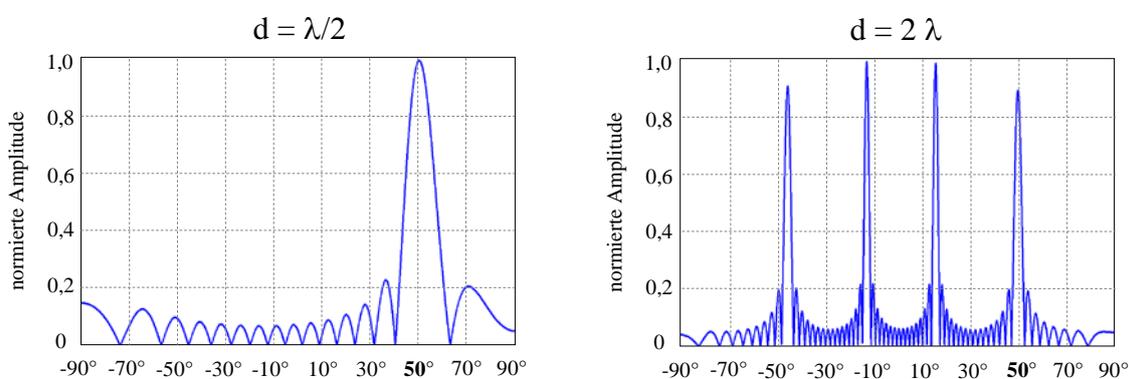


Abb. 27: Richtcharakteristik des konventionellen Gruppenstrahlers, dessen Elemente entsprechend dem Einschallwinkel 50° angeregt werden

Die entstehenden zusätzlichen Maxima verursachen die Scheinanzeigen im Ultraschallbild. Damit können Phased Array Wandler mit vergrößerter Apertur aber kleiner Anzahl der Elemente, so genannte „Sparse Arrays“ nicht nach dem konventionellen Prinzip betrieben werden.

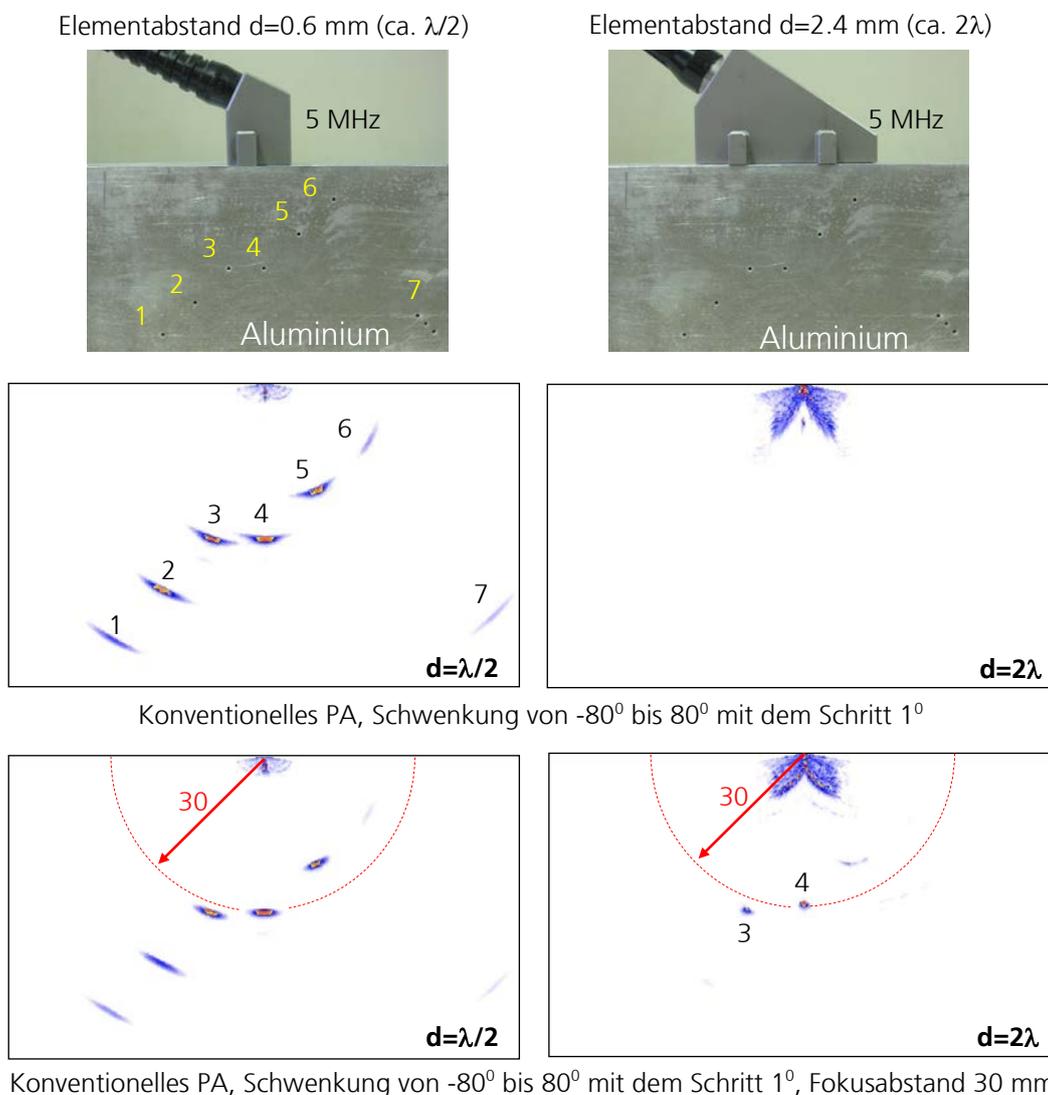


Abb. 28: Sektor-Bilder, erstellt in konventioneller Gruppenstrahler-Technik (Schwenkung und Fokussierung) für verschiedene Elementabstände

Die Bildrekonstruktion der Sampling-Phased-Array-Technik basiert auf dem SAFT-Prinzip. Durch synthetische Fokussierung werden die Hauptkeulen höherer Ordnung in der Richtcharakteristik des Gruppenstrahlers bei „Sparse Arrays“ unterdrückt. Bei konventionellem SAFT-Verfahren (anhand eines Einzelschwinger Prüfkopfes) muss der Schussabstand von ca. 10% der Wellenlänge eingehalten werden. Ist der Abstand größer, so entstehen die Rekonstruktionsartefakte (Abb. 29, Mitte). Bei der

Rekonstruktion nach dem SPA-Prinzip lässt diese Regel umgehen: durch Aufaddieren der zusätzlichen US-Information von Sender-Empfänger-Kombinationen werden die Rekonstruktionsartefakte unterdrückt (Abb. 29, unten). Damit ist es möglich, die Aperturvergrößerung und damit die Verbesserung des Auflösungsvermögens bei Prüfköpfen mit geringer Elementanzahl zu erzielen.

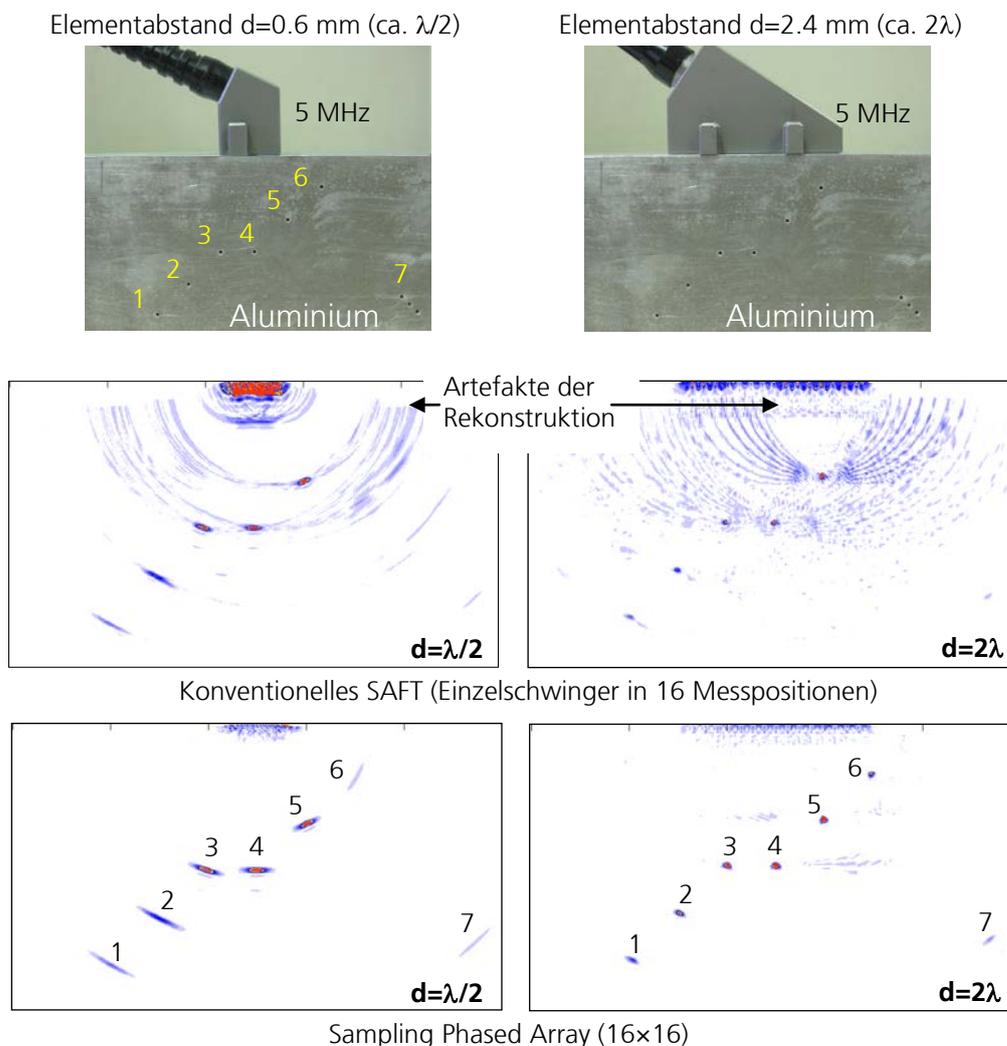


Abb. 29: Sektor-Bilder, erstellt mit den auf SAFT-Algorithmus basierten Prüftechniken: (Einzelschwinger-SAFT und SPA) für verschiedene Elementabstände

7. Modellierung der Schallausbreitung in austenitischer Schweißverbindung

Sind sowohl die akustischen Eigenschaften einer austenitischen Schweißnaht als auch ihre Struktur bekannt, besteht die Möglichkeit, die Ultraschallausbreitung durch das Schweißgut zu modellieren und damit die Laufzeiten von Ultraschallwandlern zu jedem Volumenpunkt zu berechnen.

Für die Simulation der Schallausbreitung in anisotropen inhomogenen Medien kann man verschiedene Methoden verwenden. Eine der einfachsten und zugleich schnellsten Modellierungsmethoden ist das „Ray Tracing“ – die Schallstrahlverfolgung unter Berücksichtigung des Brechungsgesetzes.

In Rahmen des Vorhabens wurde ein „Ray- Tracing“-Algorithmus entwickelt und implementiert, der die Ermittlung von Laufzeiten zwischen zwei beliebigen Punkten in einem inhomogenen und/oder anisotropen Medium berechnet. Bezüglich der Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißverbindungen wird diese Software für die Berechnung der Laufzeiten von Element(en) des Ultraschallwandlers bis zu jedem Volumenpunkt benutzt. Die ermittelten Laufzeiten werden nachträglich für die SAFT-Rekonstruktion verwendet.

Der Algorithmus basiert auf folgenden Annahmen:

- Die inhomogene Struktur einer austenitischen Schweißnaht wird in Zonen aufgeteilt („geclustert“), in welchen die Stängelkristalle annäherungsweise gleichorientiert sind
- Stängelkristalle jeder Zone der austenitischen Schweißnaht werden als ein transversal-isotropes Medium (TI) betrachtet
- Die Stängelkristalle in verschiedenen Zonen unterscheiden sich lediglich durch die Orientierung ihrer akustischen Achse. Ihre elastischen Eigenschaften (Werte der Steifigkeitsmatrix) sowie die Dichte ρ bleiben gleich
- Die akustischen Achsen der Austenitkristalle sind lediglich in der senkrecht zur Schweißnaht entstehenden Ebene angeordnet.

Der Algorithmus gestattet die Laufzeitberechnung sowie die Visualisierung des Schallbündels eines linearen Phased-Arrays mit oder ohne Vorlaufkeil in einem

inhomogenen anisotropen Werkstoff für alle drei Wellenmoden: Longitudinalwelle, vertikalpolarisierte bzw. horizontalpolarisierte Transversalwelle. Der Algorithmus kann auch für andere Prüfanwendungen verwendet werden, wie etwa Prüfungen mit Einzelschwingerprüfköpfen, homogene anisotrope Medien, Einschallung in Bauteile mit komplexer Geometrie u. a.

7.1 Erstellung des Schweißnahtmodells

Wie jeder Simulationsalgorithmus, benötigt die Ray-Tracing-Methode ein Modell, welches sowohl die Geometrie des zu simulierenden Mediums als auch seine akustischen Eigenschaften beschreibt. Im Fall einer austenitischen Schweißnaht gehören zu den Eingangsparametern des Modells die Schweißnahtgeometrie, akustische Eigenschaften des Grundwerkstoffs, sowie Orientierung und akustische Eigenschaften der Stängelkristalle.

Während die Schweißnahtgeometrie und Schallgeschwindigkeit im isotropen Grundmaterial oft bekannt sind bzw. ermittelt werden können, liegt die Kenntnis über die Gefügestruktur und die Eigenschaften des Schweißgutes in der Regel nicht vor.

In einigen Fällen kann man zur Bestimmung der Gefügestruktur ein Schlibbild der Schweißnaht, z. B. an einer Verfahrensprobe, erstellen, welches eine gute Grundlage zur Modellbildung der Schweißnaht ist.

Die Abb. 30 zeigt ein Beispiel, wie aus einem Schlibbild der Schweißnaht zunächst der Verlauf von Stängelkristallen ermittelt werden kann und dann die Bereiche mit annäherungsweise gleicher Kristallorientierung eingegrenzt werden können.

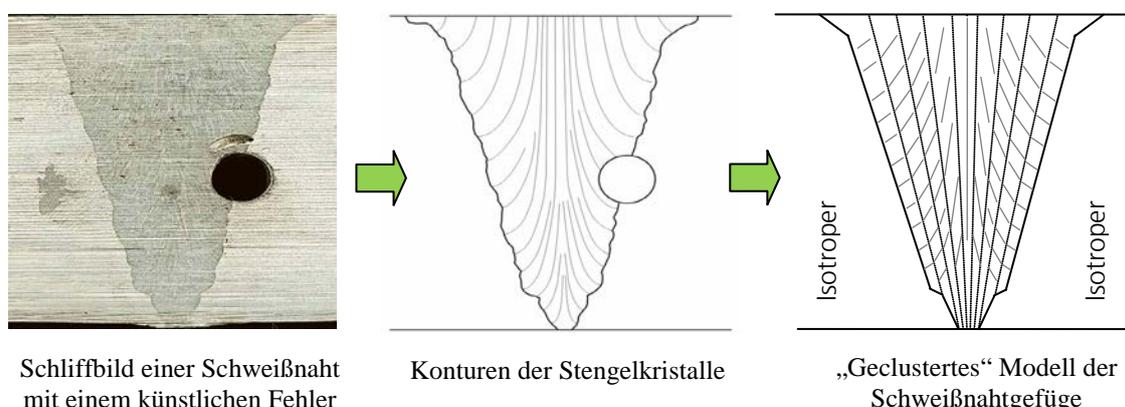


Abb. 30: Erstellung des Schweißnahtmodelles anhand eines Schlibbildes

Die anderen wichtigen Parameter des Schweißnahtmodells sind die akustischen Eigenschaften der Stängelkristalle sowie ihre Dichte. Akustische Eigenschaften werden in der Form der Steifigkeitsmatrix C vorgegeben, die fünf voneinander unabhängige elastischen Konstanten besitzt.

In ähnlicher Weise wird das Modell einer Mischverbindung erstellt. Die elastischen Eigenschaften der miteinander verbundenen Komponenten werden entweder als konstante Schallgeschwindigkeit V (für isotrope Werkstoffe) oder als eine Steifigkeitsmatrix C (für transversal-isotrope Werkstoffe) vorgegeben (Abb. 31).

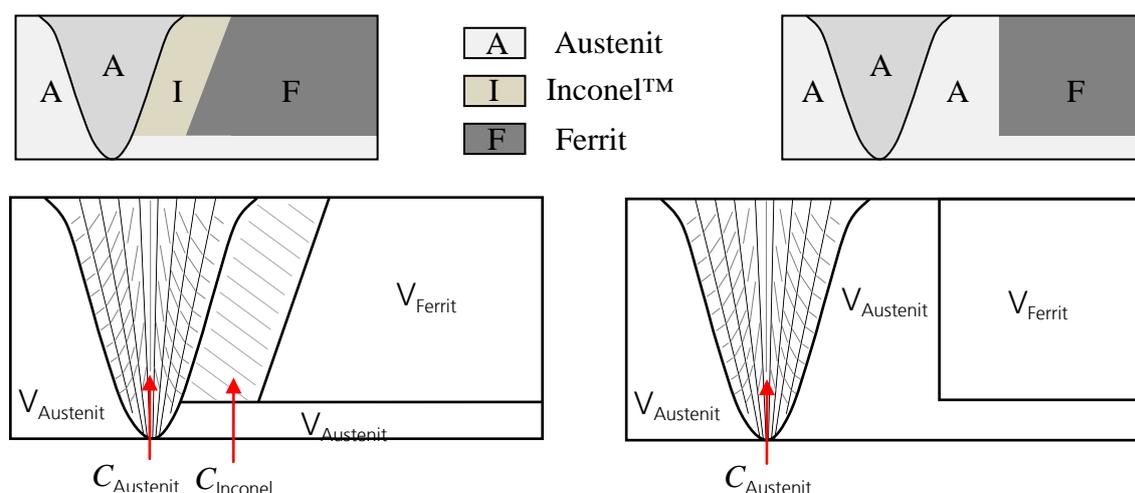


Abb. 31: Beispiele von Mischschweißverbindungen und die entsprechenden Modelle

7.2 Berechnung des Brechungsgesetzes an den Grenzen der transversal-isotropen Zonen des Modells

Für die Ermittlung der Parameter von gebrochenen Wellen wurde ein numerisches Verfahren angesetzt. Jede Funktion $F = f(a)$ kann auch in einer Array-Form vorgegeben sein. Der Funktionswert F sowie das Funktionsargument a werden dann als Vektoren der gleichen Länge dargestellt, sodass für jedes i -te Element der Vektoren $F_i = f(a_i)$ gilt. Die Vektoren präsentieren gleichzeitig die Umkehrfunktion $a_i = f^{-1}(F_i)$. Hierbei dient a , umgekehrt, als der Vektor des Funktionswertes und F - als Vektor des Funktionsargumentes der f^{-1} -Funktion. Obwohl die f^{-1} -Funktion analytisch nicht beschrieben werden kann, kann sie anhand der bekannten Interpolationsmethoden approximiert werden.

Auf diese Weise erfolgt die Berechnung des Brechungsgesetzes an jeder transversal-isotropen Grenze der Schweißnaht. Für den Phasenwinkelbereich von $\theta_1 = 0^\circ$ bis $\theta_n = 180^\circ$ wird mit einem bestimmtem Schritt $\Delta\theta$ eine Reihe von entsprechenden Ray-Parametern ermittelt:

$$[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_i \ x_{i+1} \ \dots \ x_n] = f([\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_i \ \theta_i + \Delta\theta \ \dots \ \theta_n]) \quad (34)$$

wobei die Funktion $f = \sin(\theta)/v(\theta)$ ist und die Phasengeschwindigkeit $v(\theta)$ analytisch nach den Formeln (15-18) berechnet wird.

Für die Ermittlung des Phasenwinkels θ_1^T der gebrochenen Welle, der dem Ray-Parameter x_0 entspricht, wird die kubische Spline-Interpolation-Methode verwendet. Die entsprechenden Werte von Gruppenwinkel, Phasen- und Gruppengeschwindigkeit werden nach den Formeln (15-18) bestimmt.

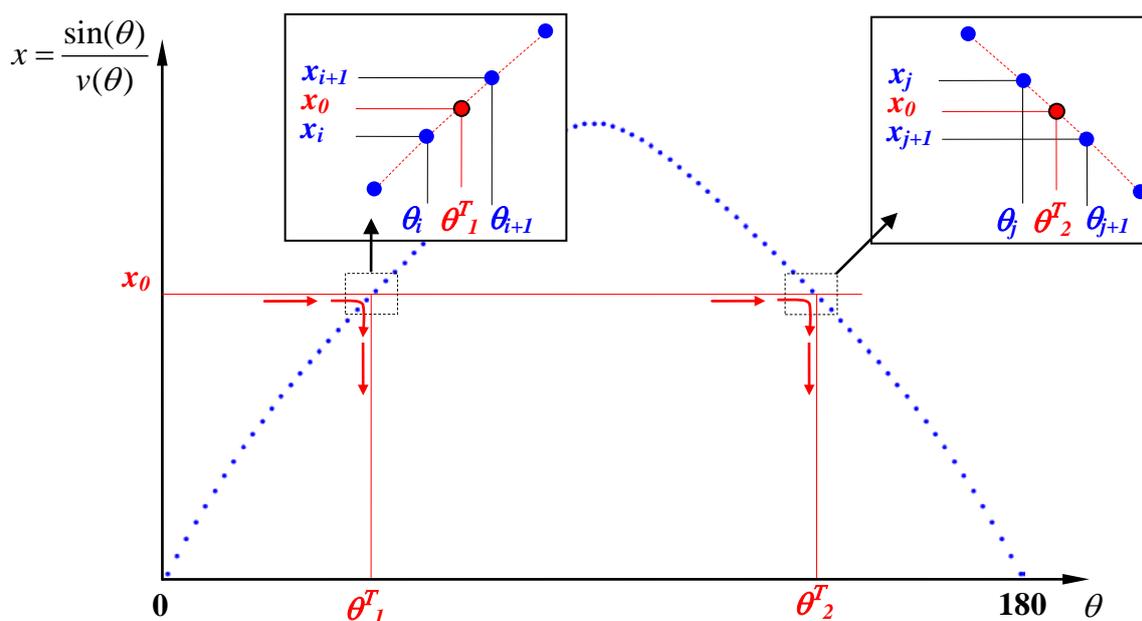


Abb. 32: Ermittlung des Phasenwinkels der gebrochenen qP-Welle im austenitischen Werkstoff X8CrNi1910 durch die kubische Spline-Interpolation

Die Genauigkeit der Winkelbestimmung hängt von der Abtastrate der Ausgangsfunktion $x(\theta)$ ab (Tabelle 2).

Tabelle 2: Genauigkeit und Effizienz der Brechungswinkelbestimmung anhand kubischer Spline-Approximation-Methode

Abtastungsrate der Ray-Parameter-Funktion, Grad	Rechenzeit* (für 10^3 Vorgänge), Sekunden	Maximaler Fehler der Phasenwinkelbestimmung, Grad
0.5 (361 Werte)	1.06	3×10^{-3}
0.1 (1801 Werte)	0.98	1.6×10^{-4}
0.05 (3601 Werte)	1.06	4×10^{-5}
0.01 (18001 Werte)	1.62	1.6×10^{-6}

* Die Berechnung erfolgte in MATLAB® R2010a

Wie aus der Abb. 32. folgt, existieren infolge der Symmetrie eines Stängelkristalles und der Sinus-Funktion zwei Phasenwinkel θ_1^T und θ_2^T , die dem Parameter x_0 entsprechen. Wie im Abschnitt 5.5.4.2 gezeigt wird, ist es wichtig (insbesondere für die qSV-Welle), beide Phasenwinkel in Betracht zu ziehen.

Da die akustischen Eigenschaften der Stängelkristalle als gleich für das gesamte Schweißgut angenommen werden, können die berechneten Vektoren $v(\theta)$ und $V(\phi)$ für alle transversal-isotropen Zonen benutzen werden. Da jede Zone aber ihre eigene Ausrichtung der Stängelkristalle besitzt, müssen die Arrays entsprechend der jeweiligen Symmetrieachse der Kristalle angepasst („gedreht“) werden (Abb. 33).

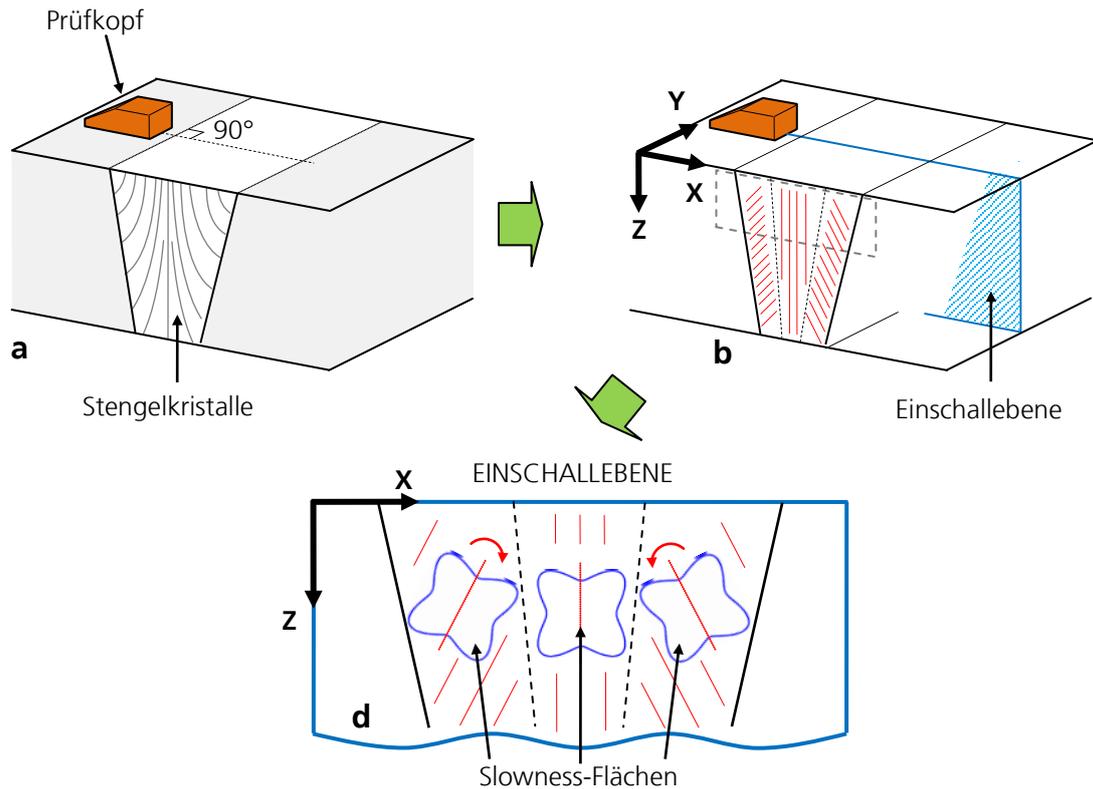


Abb. 33: Slowness-Oberflächen und Slowness-Flächen der Stengelkristalle in transversal-isotropen Zonen der Schweißnaht (hierbei die qSV-Welle)

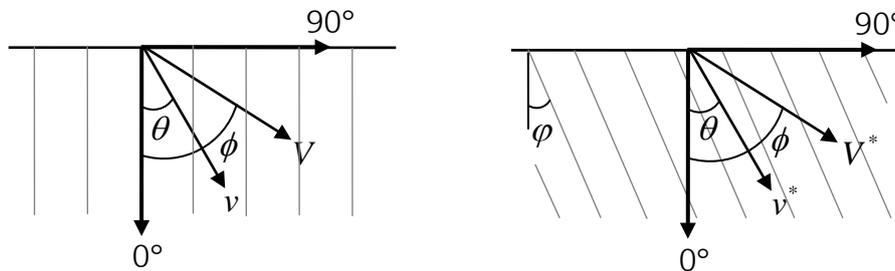


Abb. 34: Die Phasengeschwindigkeit v^* und die Gruppengeschwindigkeit V^* können unmittelbar aus der Ausgangsvektoren v und V ermittelt werden

Die „Rotation“ der Ausgangsvektoren $v(\theta)$ und $V(\phi)$ um Winkel φ besteht in der Verschiebung des Funktionswert-Vektors bezüglich des Argumentvektors (Abb. 34):

$$v^*(\theta) = v(\theta - \varphi) \quad V^*(\phi) = V(\phi - \varphi) \quad (35)$$

Die Ausgangsvektoren $v(\theta)$ und $V(\phi)$ werden einmal nach den Formeln (15-22) für Winkelbereich von -360° bis 360° berechnet und für allen transversal-isotropen Zonen benutzt. Die Rotation der Geschwindigkeitsvektoren um den Winkel bis zu $\pm 180^\circ$ erfolgt

durch einfache Verschiebung (und Inversion, wenn es notwendig ist) der Ausgangsvektoren. Abb. 35 erläutert das Prinzip der Rotation der ursprünglichen Vektoren beim Übergang zum lokalen Koordinatensystem, das auf die Grenzfläche bezogen ist.

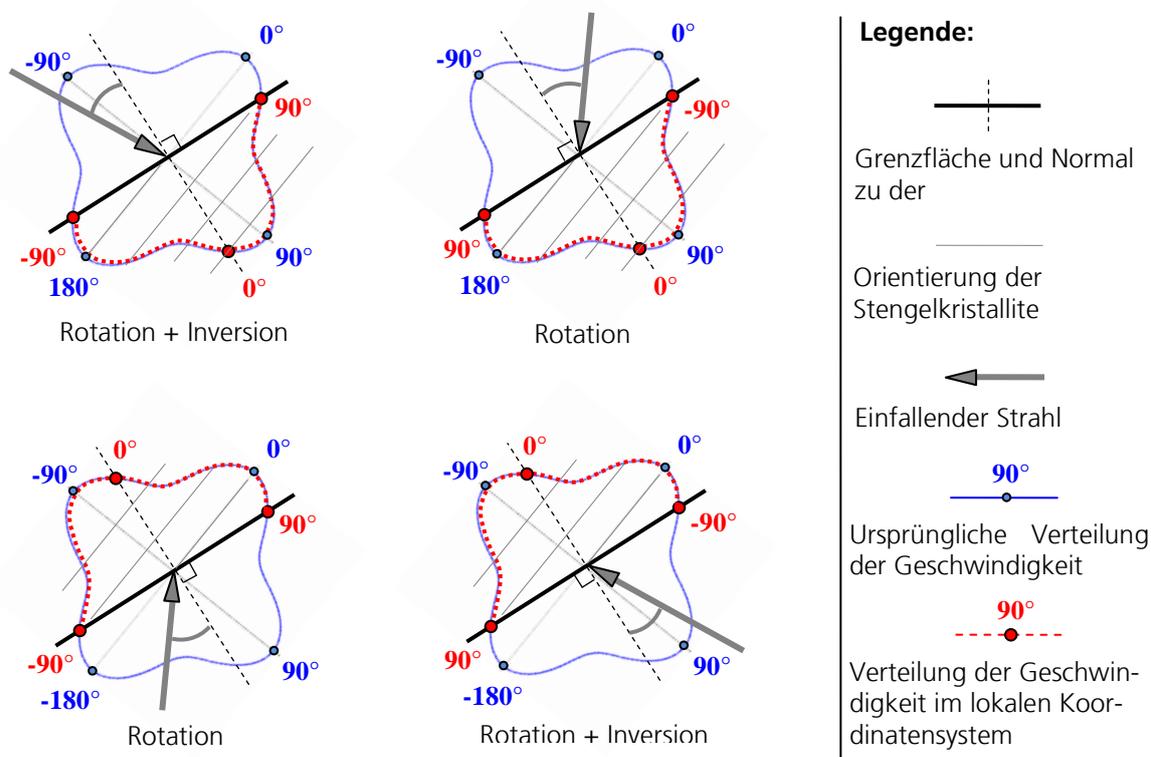


Abb. 35: Anpassung der Geschwindigkeitsverteilung (hier: die Phasengeschwindigkeit der qSV-Welle) zum lokalen, auf die Grenzfläche bezogenen Koordinatensystem

Der Ray-Parameter-Vektor (34) muss für jede Grenzfläche neu berechnet werden: die Formel (35) gilt in diesem Fall nicht:

$$x^*(\theta) = \frac{\sin(\theta)}{v(\theta - \varphi)} \neq x(\theta - \varphi) \quad (36)$$

7.3 Software für Simulation der Schallausbreitung in einem inhomogenen, akustisch anisotropen Medium

Die entwickelte Simulationssoftware basiert auf dem Ray-Tracing Prinzip und modelliert die Schallausbreitung im Prüfgegenstand mit vorgegebener Geometrie und angenommenen akustischen Eigenschaften. Dabei können als mediumdefinierte Parameter für die Simulation eine konstante Schallgeschwindigkeit für das isotrope

Grundmaterial sowie Gefügestruktur und elastische Konstanten für anisotrope Schweißnähte eingegeben werden. Die Software ermöglicht die Simulation der Schallausbreitung sowohl für longitudinale als auch für transversale Ultraschallwellen, für Einzelschwinger- und Gruppenstrahler-Prüfköpfe mit oder ohne Vorlaufkeil und ist für die folgenden Aufgaben geeignet:

- Modellierung und Visualisierung der Schallstrahlausbreitung mit Berücksichtigung des Brechungsgesetzes an Schweißnahtflanken und an Korngrenzen der Stängelkristalle
- Berechnung der Ultraschalllaufzeiten von jedem Wandlerelement zu jedem Volumenpunkt
- Erstellung und Speicherung von Laufzeittabellen (s.g. Look-Up-Tabellen, LUTs) zur Rekonstruktion der Ultraschallbilder nach dem Sampling Phased Array-Prinzip. Die Verwendung von Look-Up-Tabellen gestattet im Folgendem die Echtzeit-Rekonstruktion von Sektor-, Volumen- und Projektionsbilder.

Der Simulations-Algorithmus für die Ray-Tracing Simulation in anisotropen Medien wurde in dem Programm-Paket MATLAB® implementiert.

7.3.1 Eingangparameter für die Simulation der Schallausbreitung durch anisotropes Mehr-Schicht-Modell

Es gibt insgesamt vierzehn Parametern (Abb. 36), die die konkrete Prüfsituation beschreiben und für die Simulation benötigt werden. Man kann diese drei Gruppen zuordnen:

Parameter, die das Prüfobjekt beschreiben

- 1 – Position der Schweißnaht;
- 2 – Grenzen der transversal-isotropen Zonen;
- 3 – Richtung der Stängelkristalle in jeder transversal- isotropen-Zone;
- 4 – Dichte und elastischen Eigenschaften der Stängelkristalle;
- 5 – Schallgeschwindigkeit im Grundmaterial.

Parameter, die den Prüfkopf und den Vorlaufkeil beschreiben:

- 6 – Anzahl der Elemente des Gruppenstrahlerwandlers;
- 7 – Elementabstand;
- 8 – Keilwinkel;
- 9 – Vorlaufstrecke für Nominalwinkel;

10 – Schallgeschwindigkeit im Keil;

11 – Abstand zwischen dem Prüfkopf und der Schweißnaht.

Parameter der Look-Up-Tabelle und des Ray-Tracing Algorithmus:

12 – Dimensionen X und Z des zu berechnende Bereiches;

13 – Raster der Look-Up-Tabelle (entspricht der Auflösung des rekonstruierenden Bildes);

14 – Bereich der zu berechnende Einschallwinkel (von..., bis..., Schritt).

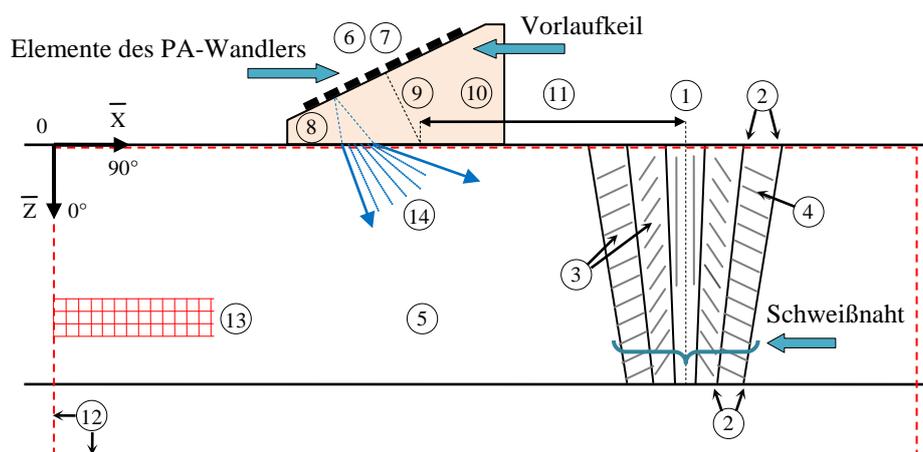


Abb. 36: Eingangsparameter des Simulations-Algorithmus

7.3.2 Prinzipielle Funktionsweise

Im Ray-Tracing-Algorithmus wird das ungerichtete Schallfeld einer punktförmigen Schallquelle durch eine Vielzahl von Strahlen modelliert, die diese Quelle quasi aussendet. Während des Simulationsvorgangs wird jeder Strahl durch ein pixeliertes räumliches Modell des zu beschallenden Mediums „durchgeführt“. Beim „Verfolgen“ des Strahles durch ein anisotropes- inhomogenes Medium werden die Phänomene der Schallbrechung an den Grenzen und der Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit berücksichtigt.

Jeder Strahl entspricht der Normalen zur Strahlenfläche und zeigt die Richtung, in welcher sich die akustische Energie ausbreitet. In jedem Punkt des Modellraums charakterisiert sich der Strahl durch momentane Werte der Phasen- und Gruppengeschwindigkeit (Richtung und Betrag) und durch die Laufzeit der simulierten Welle, die im Ausgangspunkt (an der Schallquelle) gleich Null ist und mit der Strahlausbreitung durch das Raummodell „akkumuliert“ wird.

Es wird eine dreidimensionale ($a \times b \times N$) Look-Up-Tabelle erstellt, wobei a und b den Dimensionen des nachträglich rekonstruierten Bereiches entsprechen ($a = Z/\Delta Z$, $b = X/\Delta X$, ΔX und ΔZ - Rastergröße) und N die Anzahl der PA-Elemente (Schallquellen) ist. Die Tabelle repräsentiert quasi das pixelierte Modell des Prüfobjektes. Ihre Zelle $[a_i, b_i, K]$ enthält die Laufzeit, die die vom Element K angeregte elastische Welle braucht, um den Punkt ($x_i = b_i \times \Delta X$, $z_i = a_i \times \Delta Z$) des Modells zu erreichen. Die Look-Up-Tabelle wird während des Simulationsvorganges wie unten beschrieben ausgefüllt.

7.3.2.1 Ray-Tracing Prozedur bei Anordnung des Wandlers am Grundmaterial

Nehmen wir an, dass sich ein Prüfkopf an dem Basismaterial einer Schweißverbindung befindet. Der Punktwandler (Schallquelle) ist an einem Vorlaufkeil angeordnet (Abb. 37). Für eingegebenen Einschallwinkel α im Prüfobjekt werden der entsprechende Winkel β und Zeitverzögerung T_0 im Vorlaufkeil berechnet und der Schallaustrittspunkt (X_{IN}, Z_{IN}) an der Kontaktfläche ermittelt. Danach bestimmt man den Kreuzungspunkt (X_{OUT}, Z_{OUT}) mit der nächsten Grenze G des transversal-isotropen Bereiches oder mit der Randgrenze.

In diesem Punkt wird die Laufzeit $T_1 = T_0 + \frac{\|(X_{OUT}, Z_{OUT}) - (X_{IN}, Z_{IN})\|}{V}$ ausgerechnet,

wobei $V = V_0$ die Schallgeschwindigkeit im isotropen Grundwerkstoff ist. In allgemeinem Fall ist V die Gruppengeschwindigkeit der Welle an dieser Strecke. Der Strahl wird in die LUT übertragen: die von ihm getroffenen Zellen werden gleichmäßig (ΔT^*

$= \frac{1}{2V} \min[\Delta X, \Delta Z]$) von T_0 bis T_1 ausgefüllt (Abb. 37).

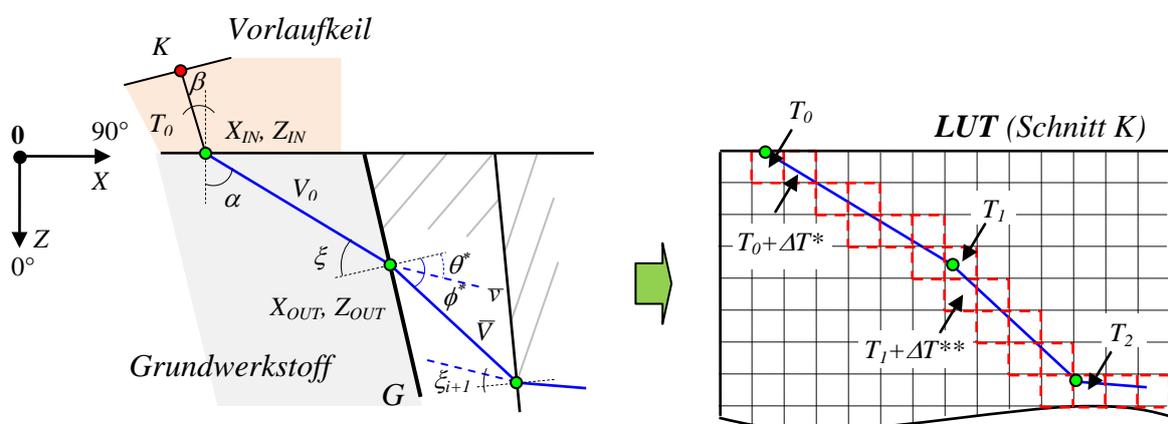


Abb. 37: Verfolgung eines Strahls durch das Modell einer inhomogenen Schweißnaht und Ausfüllung der Look-Up-Tabelle

An der Grenze G bricht sich der Strahl. Man ermittelt den Auftreffwinkel ξ und berechnet den Ray-Parameter $x_0 = \sin(\xi)/v$, wobei v die Phasengeschwindigkeit der einfallenden Welle ist (im isotropen Grundwerkstoff $v = V = V_\theta$). Die im Vorgang berechneten Vektoren $v(\theta)$ und $V(\phi)$ werden entsprechend der Stängelkristallitenorientierung für lokales grenzbezogene Koordinatensystem angepasst (Abb. 35). Die Brechungswinkeln und die Geschwindigkeiten der gebrochenen Welle werden, wie im Abschnitt 5.4 beschrieben (Abb. 34), ermittelt. Die bestimmten Phasen- und Gruppenwinkel (θ^* , ϕ^*) müssen von lokalen Koordinatensystem ins globale (Abb. 37 links) umgewandelt werden. So wird der Strahl durch alle Schichten des erstellten Modells der Naht „verlegt“: der Gruppenwinkel bestimmt die Strahlausbreitungsrichtung in der aktueller Schicht (d.h. die Koordinate der Kreuzungspunkte), die Gruppengeschwindigkeit, die Laufzeit, der Phasenwinkel und die Phasengeschwindigkeiten werden für Berechnung der Schallbrechung benutzt. Die Strahlverfolgung wird beendet, wenn: 1. der Strahl eine Randgrenze des Modells erreicht oder 2. der Brechungswinkel ϕ^* nicht ermittelt werden kann (der Strahl nicht bricht, sondern reflektiert).

Der Startwinkel α wird so variiert, dass möglichst alle Punkte des gewünschten Bereiches von den Strahlen abgedeckt sind und die entsprechenden Zellen der Look-Up-Tabelle ausgefüllt sind.

Das der Ray-Tracing-Prozedur entsprechende Flussdiagramm ist in Abb. 38 dargestellt.

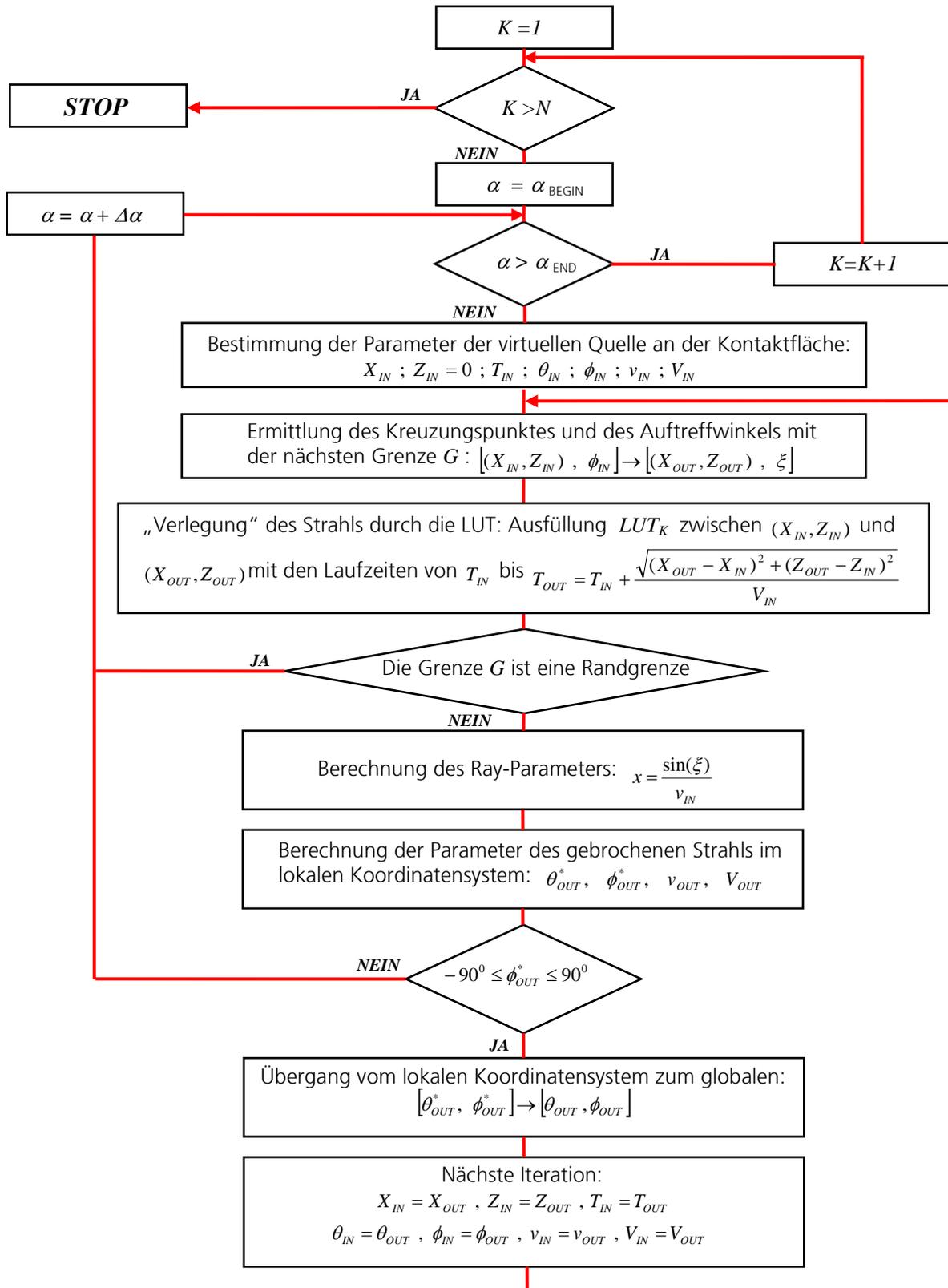


Abb. 38: Flussdiagramme der Ray-Tracing-Procedure

7.3.2.2 Ray-Tracing Prozedur bei Anordnung des Wandlers am Schweißgut

Wird der Prüfkopf an dem Prüfobjekt so angeordnet, dass sich der Austrittspunkt eines Strahles nicht an den Grundwerkstoff, sondern an der anisotropen Naht befindet, ist die Prozedur der Bestimmung von Anfangsparametern des Strahles etwas komplizierter. Nach der Ermittlung von β , $T_{IN} = T_0$ und (X_{IN}, Z_{IN}) (Abb. 37, Abb. 39) wird festgelegt, zu welcher transversal-isotropen Zone des Nahtmodells der Austrittspunkt gehört. Unter Inbetrachtung der Kristallorientierung in dieser Schicht wird das Brechungsgesetz für die Grenze „isotroper Vorlaufkeil – anisotropes Schweißgut“ berechnet und die Anfangswerte der Phasen- und Gruppenwinkel θ_{IN} , ϕ_{IN} und der Phasen- und Gruppengeschwindigkeit v_{IN} , V_{IN} für den aktuellen Strahl bestimmt. Weiterhin erfolgt die Strahlverfolgung und Ausfüllung der Look-Up-Tabelle wie im Abschnitt 7.3.2.1 beschrieben.

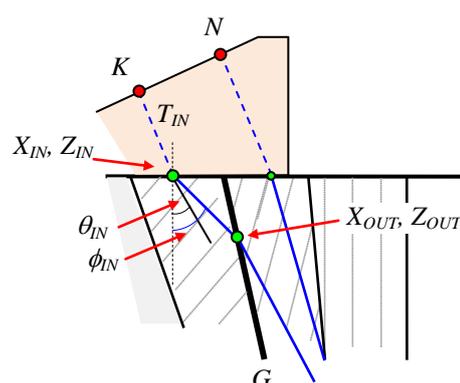


Abb. 39: Ermittlung der Anfangsparameter eines Strahls bei Anordnung des Wandlers an dem anisotropen inhomogenen Schweißgut

7.3.2.3 Ray-Tracing-Simulation im Fall eines PA-Wandlers

Die Bemerkung, dass die parallelen Strahlen während ihres Durchgangs durch die homogenen transversal-isotropen Zonen parallel bleiben (Abb. 40), ermöglicht eine Beschleunigung des Simulationsvorganges für einen PA-Wandler: die von N verschiedenen Elementen ausgesendete gleichorientierte Strahlen werden parallel verfolgt. Das Brechungsgesetz an jeder Grenze wird einmal berechnet und für alle N Strahlen angewandt.

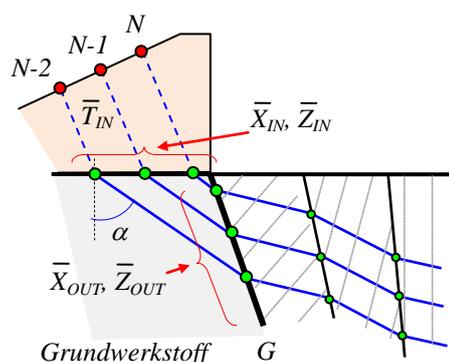
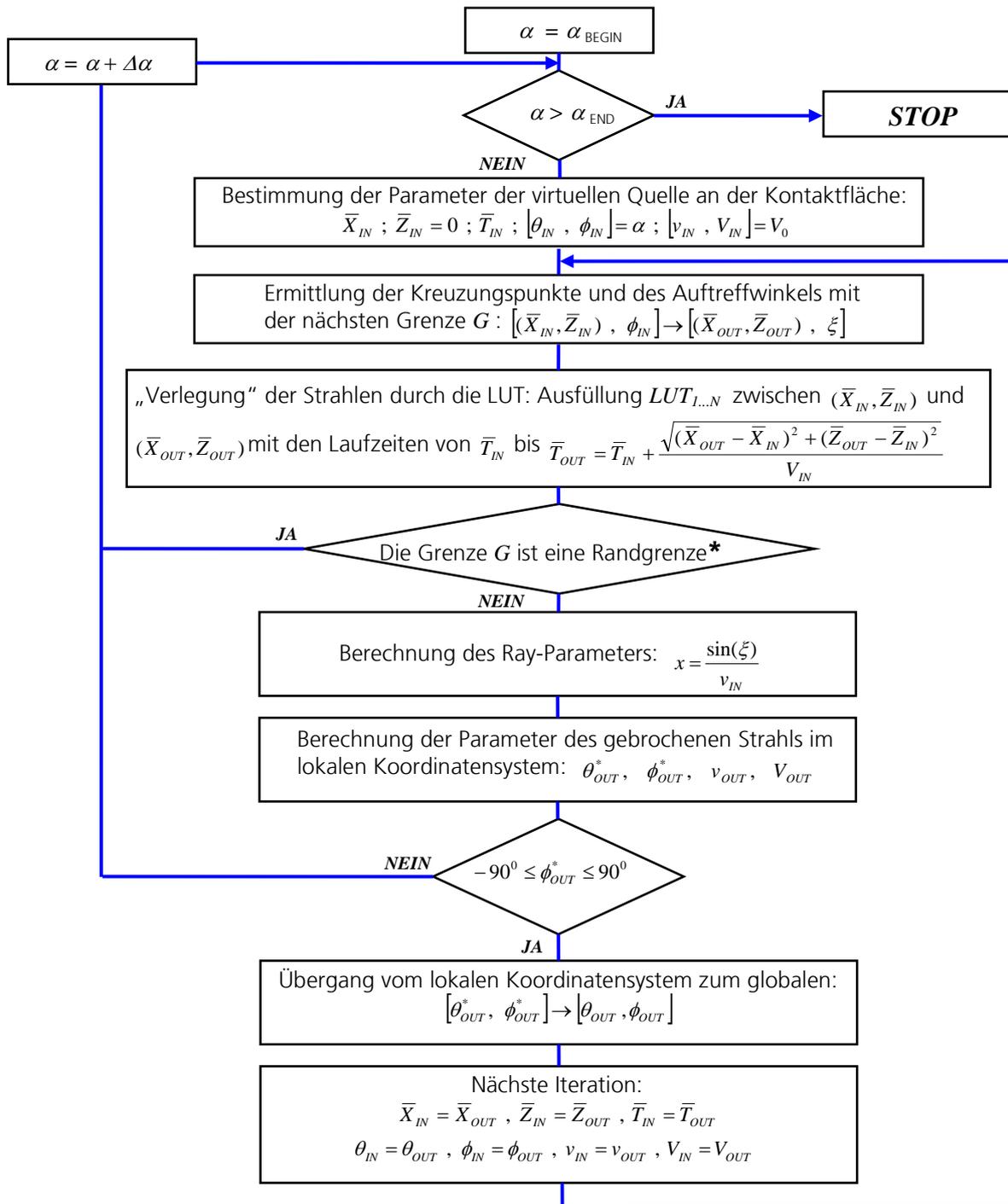


Abb. 40: Parallelisierung der Ray-Tracing-Prozedur für einen PA-Wandler

Dies ermöglicht, eine Schleife aus dem Programmablauf auszunehmen und dadurch den Simulationsvorgang zu beschleunigen (vergleiche Abb. 38 und Abb. 41). Die Unterschiede in der Länge der von verschiedenen Strahlen „durchgegangenen“ Laufstrecken werden berücksichtigt. Die Eintritts- und Austrittspunkte (X_{IN}, Z_{IN}) , $(X_{OUT},$

Z_{OUT}) der Strahlen und die Laufzeiten T_{IN} , T_{OUT} am Anfang und am Ende der Laufstrecken stellen die Vektoren mit der Länge N dar.

Diese Ausführung des Ray-Tracing-Algorithmus ist nur dann anwendbar, wenn alle N Strahlen parallel sind. Damit ist nicht nur die Richtung eines Strahles (Gruppenwinkel), sondern auch der entsprechende Phasenwinkel gemeint. Deswegen lässt sich der Algorithmus parallelisieren, wenn ein PA-Wandler an dem isotropen Grundwerkstoff angeordnet wird. In dem Fall, der in Abb. 39 dargestellt ist, muss man Strahl für Strahl, Element für Element separat berechnen / verfolgen.



* Diese Bedingung wird als nicht erfüllt betrachtet, wenn es mindestens einen Strahl gibt, der sie nicht erfüllt. Betätigung der Strahlen in der LUT-Ausfüllung bei der teilweise erfüllten Bedingung wird von der Wrapper-Funktion gesteuert.

Abb. 41: Flussdiagramme der "beschleunigten" Ray-Tracing-Procedur

7.3.3 Prinzipieller Aufbau der Simulationssoftware

Ein vereinfachtes generalisiertes Schema der Simulationsprogramme ist in der Abb. 42 dargestellt. Es beinhaltet die Komponente von drei Typen.

Parameterdatensatz

Der Parameter-Datensatz ist eine Liste der Parameter, die man für die Simulation benötigt (siehe Abschnitt 7.3.1). Alle Parameter werden in eine strukturierte Variable eingepackt und an die Kommando-Funktion weitergeleitet.

Berechnungsmodule

Unter den Berechnungsmodulen sind Funktionen und Unterfunktionen zu verstehen, welche die einzelnen Rechenaufgaben lösen, wie z. B. die Berechnung der Schallbrechung an den Korngrenzen der Kristalle, Bestimmung der lokalen Schallgeschwindigkeit, Laufzeitberechnung usw. Die Module sind so programmiert, dass sie möglichst universell sind und für verschiedene Simulations-Modi (Anisotrop, Anisotrop-parallelisiert, Isotrop) verwendet werden können (siehe die Farbkodierung an den Modulen 3-5 in Abb. 42).

Wrappers (Steuerfunktionen)

Eine Steuerfunktion (engl. *Wrapper*) bestimmt die Funktionsfolge und Programmschleifen und verwaltet den Datenaustausch zwischen den Berechnungsmodulen. Zusätzlich werden von einer Wrapper-Funktion einige lokale Bearbeitungs- und Vorbereitungsoperationen realisiert, wie z. B. den Übergang vom lokalen Koordinatensystem, auf welches die berechneten Phasen- und Gruppenwinkel bezogen sind, zum Hauptkoordinatensystem bzw. umgekehrt.

Die Haupt-Wrapper-Funktion (Kommando-Funktion) lädt den Parameter-Datensatz herunter, verteilt ihn zwischen den Modulen, initiiert die Vorberechnungen (Module 1-2) und steuert die Rechenschleifen, innerhalb derer der Rechenvorgang von einer der untergeordneten Wrapper-Funktionen gesteuert wird. Diese Funktionen bestimmen die Rechenlogik und steuern die Rechenkonsequenz für ausgewählte Software-Modi – Anisotrop, Anisotrop parallelisiert oder Isotrop.

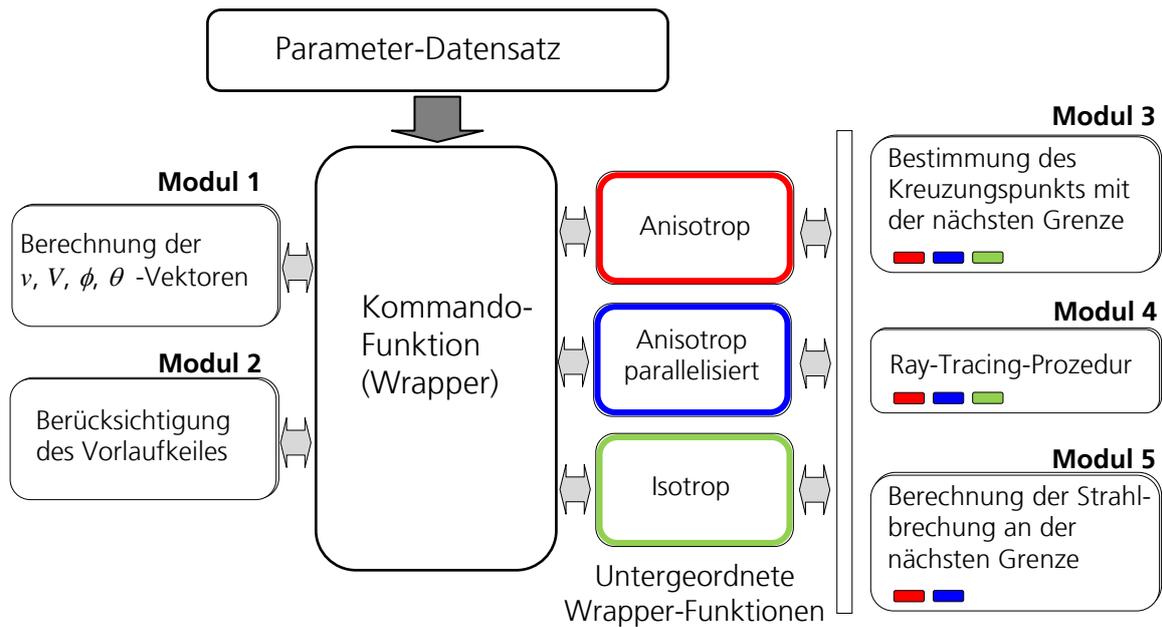


Abb. 42: Prinzipieller Gesamtaufbau der Ray-Tracing-Simulationssoftware

Beschreibung der einzelnen Rechenmodule

- **Modul 1** – berechnet die Phasengeschwindigkeit, Gruppengeschwindigkeit, Gruppenwinkel der ausgewählten Wellen-Mode (L, SV oder SH) für alle Phasenwinkel von 0° bis 360° mit vorgegebener Winkelauflösung. Als Eingangsparameter werden die vorgegebenen Dichte und Steifigkeitsmatrix der Stängelkristalle verwendet. Da die transversal-isotropen Zonen des Schweißnahtmodells sich nicht durch elastische Eigenschaften, sondern lediglich durch Orientierung der Kristalle unterscheiden, gelten die berechneten Zusammenhänge für alle transversal-isotrope Zonen.
- **Modul 2** – berücksichtigt den Vorlaufkeil des Wandlers. Der Modul berechnet die Schallaustrittspunkte und Vorlaufzeiten im Keil für alle Winkel aus der vorgegebenen Winkelreihe. Wird kein Vorlaufkeil verwendet, entspricht das dem Null-Wert der Parameter „Vorlaufstrecke“ und „Keilwinkel“. Befindet sich der Schallaustrittspunkt innerhalb einer der transversal-isotropen Zonen, berechnet der Modul das Brechungsgesetz für die Grenze „isotroper Keil – anisotroper Schweißgut“ und bestimmt die Anfangswerte von den Phasen-, Gruppenwinkel und von der Phasen-, Gruppengeschwindigkeit.

- **Modul 3** – bestimmt den Kreuzungspunkt und den Winkel beim Auftreffen des aktuellen Strahls mit der nächsten Grenze (transversal-isotrope Zone oder die Randgrenze des Simulationsmodells). Die ermittelten Kreuzungspunkte werden in einem Daten-Vektor gesammelt und bei anschließender Visualisierung des Schallbündels verwendet.
- **Modul 4** – realisiert die „Ray Tracing“-Prozedur. Das Modul „verlegt“ den Strahl durch die aktuelle transversal-isotrope-Zone unter von Modul 4 berechnetem Gruppenwinkel. Damit werden die betroffenen Zellen der Look-Up-Tabelle bestimmt, in die die berechnete Laufzeit gespeichert wird. Die Laufzeit wird anhand der von Modul 5 bestimmten Gruppengeschwindigkeit berechnet (für das Grundmaterial gilt die vorgegebene Schallgeschwindigkeit). Vom Modul 4 werden die Ergebnisse des Moduls 2 sowie die Laufzeiten von vorangehenden TI-Zonen berücksichtigt.
- **Modul 5** – berechnet das Brechungsgesetz zwischen den Zonen des Nahtmodells:
 - *isotroper Grundwerkstoff – transversal-isotrope Zone 1;*
 - *transversal-isotrope Zone i – transversal-isotrope Zone $i+1$;*
 - *transversal-isotrope Zone n – isotroper Grundwerkstoff.*

Das Modul bestimmt die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit, Phasen- und Gruppenwinkel für gebrochenen Strahl. Dafür werden die Ergebnisse der Module 1 und 3 benutzt. Tritt die Aufspaltung der gebrochenen Welle auf (siehe Abschnitt 5.5.4.2), so werden alle dem vorgegebenen „Phase-Slowness“ entsprechenden Gruppenwinkel bestimmt.

Die berechnete Phasengeschwindigkeit und der Phasenwinkel des gebrochenen Strahls werden nach Umwandlung ins generalisierte Koordinatensystem für die nächste Iteration verwendet.

Der Gruppenwinkel sowie die Gruppengeschwindigkeit werden vom Modul 4 benutzt.

7.3.4 Simulationsergebnisse

7.3.4.1 Ultraschalllaufzeiten zur Berechnung der SPA-Ergebnisbilder

Der Bestimmungszweck der Simulationssoftware ist die Ermittlung der Laufzeiten von der modellierten Schallquelle bis zu jedem Punkt des räumlichen Objektmodells für die nachfolgende SAFT-Rekonstruktion. Während des Simulationsvorganges werden die ermittelten Laufzeiten in einer Look-Up-Tabelle gespeichert (wie in Abb. 37). gezeigt). Jede Zelle der LUT-Tabelle entspricht einem Volumenelement des pixelierten Modells des zu rekonstruierenden Prüfobjekts und enthält die Laufzeit, in welcher die elastische Welle von der Schallquelle dieses Volumenelement erreicht (Abb. 43).

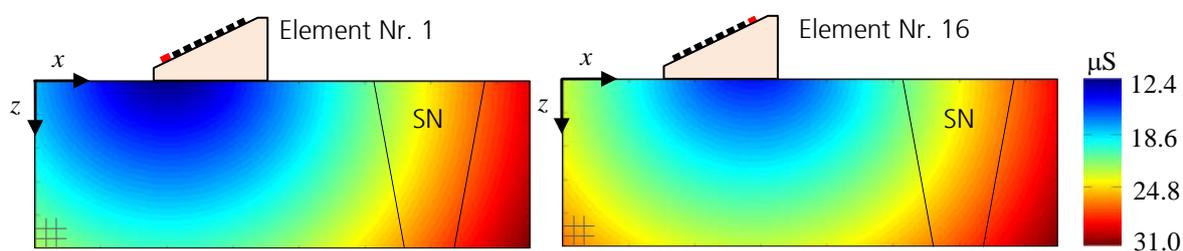


Abb. 43: Farbkodierten Laufzeiten für den ersten und den letzten Elemente eines linearen PA-Wandlers mit Vorlaufkeil (longitudinale Welle, $V=5740$ m/s, Simulationsbereich 50×150 mm, Rastergröße 0.2 mm)

Eine Look-Up-Tabelle für die SAFT-Rekonstruktion eines zweidimensionalen Sektor-Bildes ist dreidimensional: zwei Dimensionen entsprechen dem räumlichen Modell des zu rekonstruierenden Bereiches und die dritte Dimension präsentiert die Ultraschallquelle (Messpositionen eines Einzelschwinger Prüfkopfes bei konventionellem SAFT-Verfahren bzw. die Elemente eines linearen Phased-Array-Wandlers in der Sampling Phased Array-Prüftechnik).

Dank der Look-Up-Tabelle beschleunigt sich die SAFT-Rekonstruktion. Die Rekonstruktion des Volumenpixels (a,b) nach dem Sampling Phased Array-Prinzip besteht in der Summierung der entsprechenden Samples von allen Laufzeitsignalen A_{SE} , die in der SPA-Informationsmatrix vorhanden sind:

$$R(a,b) = \sum_{S=1}^N \sum_{E=1}^N A_{SE} [T = LUT(a,b,S) + LUT(a,b,E)] \quad (37)$$

Hierbei sind S – Sender, E – Empfänger, N – Anzahl der Elemente eines PA-Wandlers. Da die Look-Up-Tabelle im Vorgang berechnet wird, erfolgt die Bildrekonstruktion in Echtzeit.

7.3.4.2 Visualisierungen des Schallbündels

Während der Strahlverfolgung werden auch die Schallbrechungspunkte an jeder transversal-isotropen Schicht des Nahtmodells gespeichert. Dies ermöglicht, das Schallbündel darzustellen, um ein Verständnis der Ausbreitung der elastischen Wellen und den begleitenden Beugungseffekten zu haben. In Abb. 44 wird die Schallausbreitung von drei Wellenarten durch das anisotrope inhomogene Schweißgut für dieselbe Prüfkopfposition dargestellt.

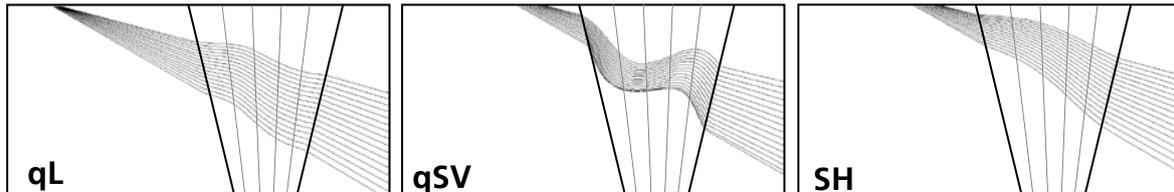


Abb. 44: Visualisierung der Beugungseffekte bei Ausbreitung des Schallbündels durch die austenitische Schweißnaht – quasilongitudinale Welle, vertikal- und horizontalpolarisierten (quasi-) transversalen Wellen

Abbildung 44 bestätigt, dass die quasilongitudinale Welle qL und die horizontalpolarisierte transversale Welle SH in geringerem Maße von der Anisotropie und Inhomogenität beeinflusst ist, als die vertikalpolarisierte quasitransversale Welle qSV.

8. Iterative Suche von unbekanntem akustischen Eigenschaften: „Gradient Elastic Constant Descent“-Methode

8.1 Grundvoraussetzungen zur Anwendung der iterativen Suche von unbekanntem Größen auf Basis der SPA-Prüftechnik

Der SAFT-Algorithmus, auf dessen Prinzip die Sampling Phased Array Bildrekonstruktion basiert, gehört zu den tomographischen Verfahren. Die synthetische Fokussierung erfolgt durch konstruktive und destruktive Interferenz der projizierenden Signale. Werden die gemessenen Laufzeitsignale in das räumliche Modell fehlerhaft projiziert (z. B., infolge einer Abweichung der angenommenen Ausbreitungsgeschwindigkeit von ihrem tatsächlichen Wert), so erfolgt durch die entstehende Phasenverschiebung eine inkohärente Summierung der Signale, die die Fokussierungsqualität vermindert. Diese Voraussetzung dient als Grundlage für iterative Anpassung der Größen, die die konstruktive und destruktive Interferenz im räumlichen Modell beeinflussen.

Als ein Axiom wird angenommen, dass die beste Fokussierung dann und nur dann erfolgt, wenn die, eine kohärente/inkohärente Summierung beeinflussende, Größe ihrem realen Wert entspricht. Unter der besten Fokussierung ist zu verstehen, dass die Positionen der rekonstruierten Anzeigen mit den Koordinaten der entsprechenden Reflektoren übereinstimmen, die Abmessungen der Anzeigen sich maximal den tatsächlichen Reflektorgrößen annähern und das rekonstruierte Bild die wenigsten Rekonstruktionsartefakte (die Folge der inkohärenten Addierung) aufweist.

Die zweite Voraussetzung besteht darin, dass man die Fokussierungsqualität quantitativ beschreiben kann. Als quantitative Größen dienen dementsprechend die Amplitude, Fläche und Positionsabweichung einer Anzeige und die Amplitude der Scheinanzeigen (Artefakte).

8.2 Das Prinzip der iterativen Suche von akustischen Eigenschaften: „Gradient Elastic Constant Descent“-Methode anhand eines bekannten Referenzreflektors

8.2.1 Praktischer Bedarf der automatischen Ermittlung von unbekanntem akustischen Eigenschaften

Die Ergebnisse der Schallausbreitungssimulation hängen unmittelbar von den elastischen Eigenschaften des Mediums ab. Die den elastischen Konstanten zugeordneten Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten verursachen die Schallbeugung, beeinflusst aber auch

die Laufzeiten. Die korrekte Berechnung der Laufzeiten für die Sampling Phased Array Rekonstruktion ist nur dann möglich, wenn sowohl die Gefügestruktur, als auch die elastischen Eigenschaften des Mediums bekannt sind. Sind die elastischen Konstanten als Simulationseingangsparameter falsch angenommen, so entsteht ein Fehler in den Laufzeitberechnungen, was wiederum zum nichtkohärenten Aufaddieren der Ultraschallsignale bei der SAFT-Rekonstruktion führt. Reflektoren werden an den falschen Ort zurückpropagiert. Eine zuverlässige quantitative Bewertung der Prüfergebnisse ist damit ausgeschlossen.

Andererseits, ist die direkte Ermittlung der elastischen Eigenschaften, insbesondere von inhomogenen anisotropen Medien, selbst in Labor, nur mit hohem Aufwand verbunden und normalerweise nur mittels zerstörenden Verfahren möglich. Bei der Ultraschallprüfung nach dem hier vorgeschlagenen Algorithmus ist dies nicht der Fall. Während die Werkstoffstruktur einer Schweißnaht durch den Fertigungsprozess bestimmt ist bzw. durch ein Schlibfbild ermittelt werden kann, sind die Werte der Steifigkeitsmatrix in der Regel unbekannt.

8.2.2 Allgemeines Prinzip der iterativen Suche von unbekanntem akustischen Eigenschaften

Zur Lösung des Problems der Ermittlung/Anpassung von unbekanntem elastischen Konstanten wurde die „**G**radient **E**lastic **C**onstants **D**escent“-**M**ethode (GECDM) entwickelt, die es gestattet, eine automatische Bestimmung der elastischen Konstanten an einer Schweißnaht mit angenommener Kristalliten-Struktur durchzuführen.

Der Ansatz besteht in der inversen Anpassung der angenommenen Steifigkeitsmatrix. Da die elastischen Konstanten (Elemente der Matrix) die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit bestimmen (15-22), beeinflussen sie indirekt auch die SPA-Fokussierung. Als Optimierungskriterium dient dabei die ortstgetreue Rekonstruktion eines Modellreflektors im Vergleichskörper, dessen genaue Lage und Größe bekannt sind. Die Gefügestruktur der Referenznaht wird auch als bekannt betrachtet: sie kann zum Beispiel anhand des Schlibfbildes ermittelt werden.

Zunächst erfolgt die Simulation der Wellenausbreitung mit angenommenen, im Allgemeinen falschen elastischen Konstanten. Anhand von damit berechneten Laufzeitwerten wird ein Ultraschall-Sektorbild rekonstruiert. Da die elastischen

Konstanten nicht korrekt sind, erscheint die Ultraschallanzeige von dem bekannten Reflektor unfokussiert und an einer falschen Position. Nach dem GECDM-Verfahren werden die elastischen Konstanten im Folgenden iterativ solange angepasst (Abb. 45), bis die Anzeige im Sektor-Bild ihre richtige Position (von IST nach SOLL) erreicht und die Amplitude sowie die Schärfe der Anzeige ihre optimale Werte haben.

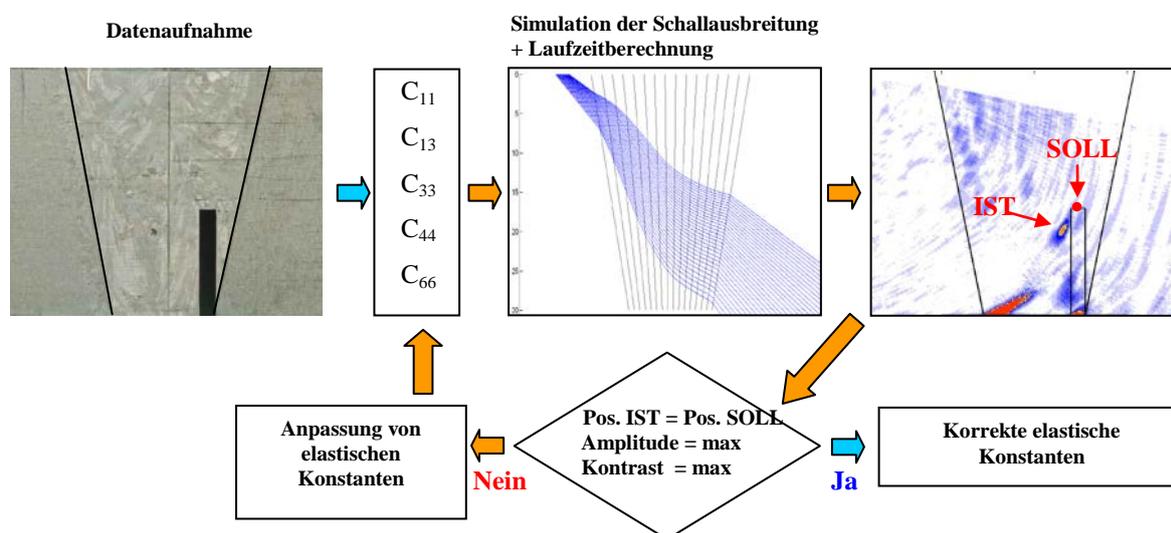


Abb. 45: Iterative „Gradient-Elastic-Constants-Descent-Methode“

8.2.3 „Descent Search“-Funktion

8.2.3.1 „Descent Search“-Funktion als Bewertungswert der Fokussierungsqualität

Für eine quantitative Bewertung der SPA-Fokussierungsqualität für den Fall eines bekannten (Referenz-) Reflektors wird der Begriff „Descent Search“-Funktion f_{DS} eingeführt.

Die Argumente dieser Funktion sind die Amplitude A des Referenzreflektors im Schnittbereich B des Sektor-Bildes, die Abweichung der Anzeige von der Soll-Position, L und die Fokussierungsschärfe S , die gemeinsam die Qualität des Ergebnisses repräsentieren. Die „Descent-Funktion“ lautet:

$$f_{DS}(C) = G_1 \cdot L + G_2 \cdot \frac{1}{A} + G_3 \cdot S \quad (38)$$

wobei L der Abstand zwischen der richtigen Position **Soll** (x_{soll} und z_{soll}) und der Position **Ist** des Fehlers in dem rekonstruierten Schnittbild (x_{ist} und z_{ist}) ist:

$$L = \sqrt{(x_{soll} - x_{ist})^2 + (z_{soll} - z_{ist})^2} \quad (39)$$

Die Erklärung der Funktionsparameter ist in Abb. 46 dargestellt.

Die Parameter G_1, G_2 und G_3 sind die Gewichtskoeffizienten der entsprechenden Funktionskomponenten.

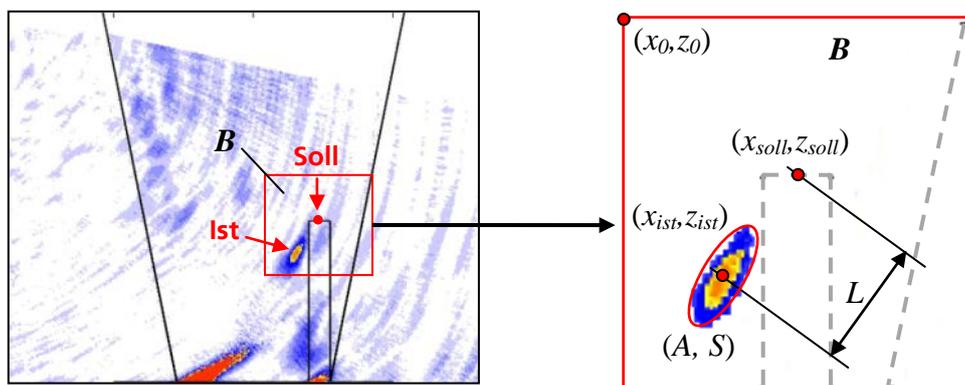


Abb. 46: Analyse einer Anzeige im ausgewählten Bildbereich

Der „Descent Search“-Algorithmus funktioniert wie folgt: Bei der Analyse des rekonstruierten Sektor-Bildes wird ein Bereich („Fenster“) um die korrekte Position des Referenzreflektors herum ausgewählt. Als Zusatzparameter des Suchalgorithmus dient auch ein Amplituden-Schwellenwert („Treshold“) A_{Tr} , wobei sämtliche Punkte mit Amplitudenwerten unter dem Schwellenwert in der Bildanalyse keine Berücksichtigung finden. Diese Werte werden zu 0 gesetzt:

$$B_{ij} = \begin{cases} B_{ij} & \text{wenn } B_{ij} \geq A_{Tr} \\ 0 & \text{wenn } B_{ij} < A_{Tr} \end{cases} \quad (41)$$

wobei B_{ij} die Werte (Amplituden) der einzelnen Bildpunkte des ausgewählten Bereiches B sind.

Als aktuelle Ist-Position der Anzeige bei jeder Iteration wird die Position des sogenannten Massenschwerpunktes des analysierten Bereiches angenommen. Für die Bestimmung des Schwerpunktes wird die Momenten-Funktion verwendet. Besteht der Bereich B aus $m \times n$ Punkten, berechnet man die x -Koordinate und z -Koordinate des Massenschwerpunktes als:

$$x_{ist} = x_0 + \left(\frac{\sum_{i=1}^m (i \cdot \sum_{j=1}^n B_{ij})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij}} \right) \cdot \Delta x \quad (42)$$

$$z_{ist} = z_0 + \left(\frac{\sum_{j=1}^n (j \cdot \sum_{i=1}^m B_{ij})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij}} \right) \cdot \Delta z \quad (43)$$

wobei x_0 und z_0 die Koordinaten des ausgewählten Bereiches im übergeordneten Koordinatensystem (Abb. 46), Δx und Δz – die Diskretisierungswerte (Ortsauflösung) des Bildes entlang der entsprechenden Achse sind.

Die Amplitude der Ultraschallanzeige A wird als arithmetisches Mittel der Amplituden aller Bildpunkte des ausgewählten Bereiches berechnet.

$$A = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij}}{N} \quad (44)$$

wobei N die Anzahl der Bildpunkte ist, deren Werte die ausgewählte Schwelle A_{Tr} überschreiten.

Unter Schärfe S der Anzeige versteht sich die Gesamtfläche der Anzeige in dem Sektor-Bild. Zahlenmäßig entspricht die Schärfe S der Gesamtfläche der Bildpunkte im Bereich B_1 , deren Amplituden größer als $k \cdot A$ sind:

$$S = |B_1| \cdot \Delta x \cdot \Delta z \quad B_1 = \{B : B_{ij} \geq k \cdot A\} \quad (45)$$

Der Koeffizient k ist neben dem A_{Tr} ein zusätzlicher Parameter des Suchalgorithmus, der einen Wertebereich zwischen 0 und 1 hat und der einen Schwellenwert für die Anzeigenausdehnung bezogen auf Ihre Mittelamplitude A darstellt. Zum Beispiel entspricht der Wert $k=0.5$ der Halbwerts-Methode bei konventioneller Ultraschallprüfung [89].

Die Gewichtskoeffizienten G_1, G_2 und G_3 gleichen den Einfluss von entsprechenden Parametern in die Descent-Search-Funktion aus. Die Abweichung der Anzeigeposition kann bis zu einigen Millimeter betragen, die Fläche der Anzeige – bis zu einigen Quadratmillimeter. Die Amplituden der Anzeige werden bei der Ultraschallprüfung

üblicherweise normiert und besitzen den Wert von 0 bis 100%. Diesbezüglich wurden die Gewichtskoeffizienten mit folgenden Werten eingesetzt: $G_1 = 1$ (für die Positionsabweichung der Anzeige), $G_2 = 1000$ (für die Anzeigeamplitude), $G_3 = 1$ (für die Anzeigeschärfe).

8.2.3.2 „Descent Search“-Funktion als nichtanalytische Funktion der Steifigkeitsmatrix

Wie schon erwähnt wurde, beeinflussen die elastischen Konstanten durch die Wirkungskette „Phasen- / Gruppengeschwindigkeit - Schallbrechung – Laufzeitkurven“ die Fokussierungsqualität der Rekonstruktion, nämlich – den Wert der „Descent Search“-Funktion. Die f_{DS} ist dadurch mit der Steifigkeitsmatrix indirekt verbunden und kann als eine nichtanalytische Funktion mit Argumenten $C_{11} - C_{66}$ bezeichnet werden.

Durch Berücksichtigung der korrekten Werte der elastischen Konstanten entsteht das Ultraschallbild, welches eine Anzeige des Referenzreflektors erzeugt, die:

- 1) maximale Amplitude hat und
- 2) mit maximaler Schärfe dargestellt wird, sowie
- 3) keine Abweichung von der Soll-Position des Reflektors bewirkt.

Die „Descent Search“-Funktion erreicht in diesem Falle ihren Minimalwert. Damit besteht der Suchalgorithmus in der Minimierung der Funktion f_{DS} .

8.2.4 Minimierung der „Descent“-Funktion

8.2.4.1 Gradienten-Verfahren

Die Gradient-Elastic-Constant-Descent-Methode ist ein Gradienten-Verfahren im iterativen Suchvorgang. Die elastischen Konstanten werden dabei als Vektor $\vec{c} = (C_{11} \ C_{13} \ C_{33} \ C_{44} \ C_{66})$ gehandhabt. Der Suchvorgang startet mit einem Ausgangsvektor $\vec{c}^{(0)}$ mit zunächst falsch angenommenen elastischen Konstanten, die mit jeder Iteration präzisiert werden:

$$\vec{c}^{(i+1)} = \vec{c}^{(i)} + \lambda^{(i)} d^{(i)} \quad (46)$$

wobei $c^{(i)}$ und $c^{(i+1)}$ die Vektoren in der i bzw. $i+1$ Iteration und $\lambda^{(i)}$ die Schrittweite sind.

Die Komponente $d^{(i)}$ der Gleichung (46) ist der negative Gradient der Funktion f_{DS} :

$$d^{(i)} = -\nabla f_{DS}(\vec{c}^{(i)}) = -(\bar{k}_1 \frac{\partial}{\partial C_{11}} + \bar{k}_2 \frac{\partial}{\partial C_{13}} + \dots + \bar{k}_5 \frac{\partial}{\partial C_{66}}) f_{DS} \quad (47)$$

Hierbei sind $\bar{k}_1, \bar{k}_2 \dots \bar{k}_5$ die Einheitsvektoren des fünf-dimensionalen Raums von den Descent-Funktion-Argumenten $[C_{11} C_{13} C_{33} C_{44} C_{66}]$.

Der Suchvorgang läuft mit einer dynamischen Schrittweite λ , die auf jeden Iterationsschritt angepasst wird. Dadurch reduziert sich die Anzahl der Iterationen, in welchen der Minimalwert der Descent-Funktion ermittelt werden kann.

$$\lambda^{(i+1)} = \arg \min_{\lambda} [f_{DS}(\vec{c}^{(i)} - \lambda \nabla f_{DS}(\vec{c}^{(i)}))] \quad (48)$$

Der Iterationsprozess wird abgebrochen, wenn der Unterschied der Funktions-Werte bei zwei aufeinander folgenden Iterationen kleiner als die vorgegebene Toleranz ε ist.

$$|f_{DS}(\vec{c}^{(i+1)}) - f_{DS}(\vec{c}^{(i)})| \leq \varepsilon \quad (49)$$

8.2.4.2 Nelder-Mead-Verfahren

Das Nelder-Mead-Verfahren (auch als Downhill-Simplex-Verfahren oder als Simplexmethode bekannt) ist ein Algorithmus zur Optimierung einer Funktion von mehreren Parametern [90]. Im Unterschied zum Gradienten-Verfahren ist der Simplex-Algorithmus eine Direktsuche-Methode, die weder einen analytischen noch einen numerischen Gradient verwendet. Der Algorithmus basiert auf der Modifizierung des Simplex, das zunächst um den Ausgangsvektor $\vec{c}^{(0)}$ angebaut wird und danach während des Suchvorganges iterativ angepasst wird.

Bei der Optimierung einer Funktion von n Parametern versteht man unter dem Simplex eine Punktmenge aus $n+1$ Elemente. Das Start-Simplex besteht aus Ausgangsvektor $\vec{c}^{(0)}$ und n Vektoren, die durch das Inkrement der Funktionsargumente ausgebildet werden. Der Inkrement-Wert ist ein von den Parametern des Simplex-Algorithmus.

Als Beispiel wird in Abb. 47 das Start-Simplex für den Fall der horizontalpolarisierten Transversalwelle dargestellt. Da die Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten der SH-Welle nur von der Dichte ρ und von zwei elastischen Konstanten C_{44} und C_{66} abhängen, hat die „Descent“-Funktion also drei Argumente. Das Simplex stellt sich ein Tetraeder dar. Die Simplexe der „Descent“-Funktion für die Fälle der qL-Welle bzw. der qSV-Welle sind fünfdimensional und können grafisch nicht dargestellt werden.

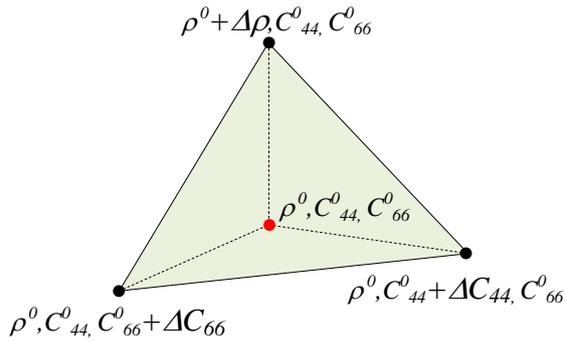


Abb. 47: Dreidimensionales Start-Simplex der „Descent“-Funktion für die SH-Welle

Während der Iterationen wird der schlechteste Punkt des Simplex ausgenommen und durch einen neuen Punkt ersetzt. Der Minimierungsvorgang der „Descent“-Funktion von n Argumenten nach dem Nelder-Mead-Algorithmus läuft wie folgend [91]:

1. Es wird zunächst ein $n+1$ -Simplex $\hat{S}^{(0)}$ rund um den Ausgangspunkt $\vec{c}^{(0)}$ ausgebaut.
2. Im Iterationsschritte i werden die Funktionswerte in allen Punkten des Simplex berechnet und in aufsteigender Reihenfolge rangiert:

$$\begin{aligned} \vec{c}_1 &= \arg \min \{ f_{DS}(\vec{c}) : \vec{c} \in \hat{S}^{(i)} \} \\ \vec{c}_{n+1} &= \arg \max \{ f_{DS}(\vec{c}) : \vec{c} \in \hat{S}^{(i)} \} \end{aligned} \quad (50)$$

3. Es wird das Zentrum M der n besten Punkte bestimmt, das weiter als Transformationspunkt dient:

$$M = \frac{\sum_{k=1}^n \vec{c}_k}{n} \quad (51)$$

4. Es werden auch die Punkte A_1, A_2, B_1, B_2, C und D (Abb. 48) bestimmt. Abhängig von den Beziehungen zwischen den „Descent“-Funktionswerten in diesen Punkten wird das Simplex $\hat{S}^{(i)}$ nach der i -te Iteration extrahiert, kontrahiert, gespiegelt oder geschrumpft (Simplex $\hat{S}^{(i+1)}$ in Abb. 48).

$$\begin{aligned}
 A_{1,2} &= M \pm \alpha \cdot (\vec{c}_{n+1} - M) & \hat{S}^{(i+1)} &= \{\vec{c}_1 \quad \vec{c}_2 \quad \vec{c}_3 \quad \dots \quad A_{1,2}\} \\
 B_{1,2} &= M \pm \beta \cdot (M - \vec{c}_{n+1}) & \hat{S}^{(i+1)} &= \{\vec{c}_1 \quad \vec{c}_2 \quad \vec{c}_3 \quad \dots \quad B_{1,2}\} \\
 C &= 2 \cdot M - \vec{c}_{n+1} & \hat{S}^{(i+1)} &= \{\vec{c}_1 \quad \vec{c}_2 \quad \vec{c}_3 \quad \dots \quad C\} \\
 D_k &= \vec{c}_1 + \frac{\vec{c}_{k+1} - \vec{c}_1}{2}, \quad k = 1 \dots n & \hat{S}^{(i+1)} &= \{\vec{c}_1 \quad D_1 \quad D_2 \quad \dots \quad D_n\}
 \end{aligned}
 \tag{52}$$

Hierbei sind α und β die Parameter des Nelder-Mead –Algorithmus.

- Der Suchvorgang wird abgebrochen, wenn das Simplex \hat{S} auf das vorgegebene Maß geschrumpft ist: der Abstand zwischen den Simplex-Ecken ist kleiner als der Toleranzwert ε .

$$\forall (a, b) \in \hat{S} : \|\vec{c}_a - \vec{c}_b\| \leq \varepsilon
 \tag{53}$$

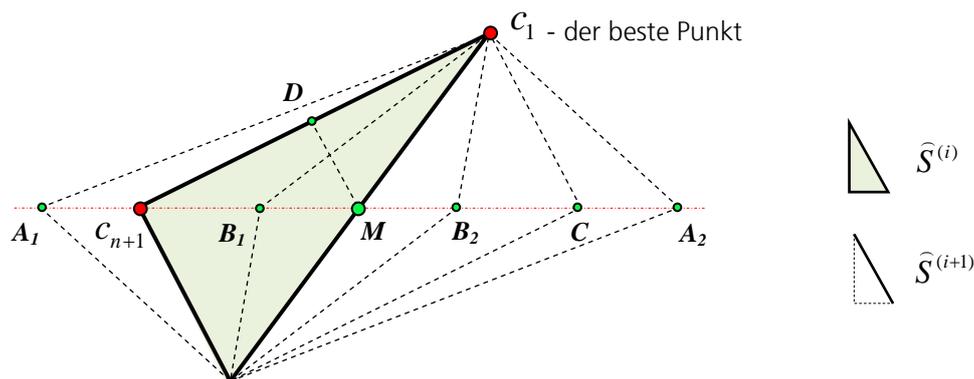


Abb. 48: Schematische Darstellung der Simplex-Transformation während der i -ten Iteration

9. Ultraschallmessungen an den austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen mittels der SPA-Technik mit inverser Phasenanpassung und iterativer Suche der elastischen Eigenschaften

Der experimentelle Teil des Vorhabens beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

- Zusammenstellung der Testkörper
- Auswahl der Prüfköpfe und Vorlaufkeile
- Laboraufbau der Messtechnik (SPA-Prüfsystem, 3-Achsenmanipulator, 2-Achsen-Rohrmanipulator)
- Datenaufnahme nach dem Sampling Phased Array-Prinzip
- Rekonstruktion der Ergebnisbilder mit Berücksichtigung der Werkstoffanisotropie und -inhomogenität und iterativer Anpassung der akustischen Eigenschaften in Form von zweidimensionalen Sektor- und B-Bildern sowie von quasidreidimensionale Volumenbildern (wie in 6.3.4 beschrieben wird)
- Auswertung der Anzeigen: Lage, Ausdehnung, quantitative Bestimmung der Fehlerparameter
- Vergleich der aus den Ultraschallbilder ermittelte Werte mit den tatsächlichen Lagen und Größen der Materialungängen

9.1 Verwendete Testkörper

Für die Zwecke des Vorhabens wurden austenitischen Testkörper sowie ein Rohr mit einer Mischschweißverbindung aus den Testkörperbibliotheken des Fraunhofer IZFP und der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA) zusammengestellt. Die Testkörper lassen sich, je nach Bestimmungszweck, in vier Gruppen einordnen.

- **Testkörper TK 01/48, US 62 und UTT 1046** (Pos. 1-3 in Tabelle 3) aus der Testkörperbibliothek des IZFP besitzen künstlich eingebrachte Fehler. Im Rahmen des BMBF-Projektes Austenit I [25] wurden die akustischen Eigenschaften des Testkörpers TK 01/48 ermittelt. Diese drei Testkörper (Abb. 49, A) wurden im Rahmen des genannten Vorhabens für Validierung der Algorithmen von inverser Phasenanpassung (Abschnitt 6.4) und iterativer Suche von elastischen Konstanten (GECDM-Methode, siehe Kapitel 8) benutzt.

- **Austenitische Testkörper mit künstlich eingebrachten Fehlern** (Pos. 4-11 in Tabelle 3) besitzen Zylinderbohrungen und Nuten unterschiedlicher Größe und Orientierung in der Schweißnaht bzw. im Grundwerkstoff (Abb. 49, B). Anhand dieser Testkörper wurde die Fähigkeit der Sampling Phased Array-Technik nachgewiesen, die Fehler form- und ortsgetreu zu rekonstruieren, sowie die Genauigkeit der Fehlergrößenbestimmung („sizing“) abgeschätzt.
- **Austenitische Testkörper mit realistischen Schwing- und Spannungskorrosionsrissen** in der Schweißnaht, Wärmeeinflusszone und/oder im Grundwerkstoff (Pos. 12-28, in Tabelle 3, Abb. 49C) wurden an der MPA Stuttgart hergestellt [92]. Anhand dieser Testkörper wurde das Nachweis- und Sizing-Vermögen der SPA-Technik mit inverser Phasen Anpassung abgeschätzt. Die tatsächlichen Größen, Lagen und Form der Fehler wurden an der MPA anhand der Sicht- (Schliffbilder), Farbeindring- und Durchstrahlungsprüfung ermittelt.
- **Rohr mit einer Mischschweißverbindung** (Pos. 29 in Tabelle 3)
Ein Rohrtestkörper aus austenitischem und ferritischem Stahl mit einer Rundschweißnaht (Abb. 49, D).

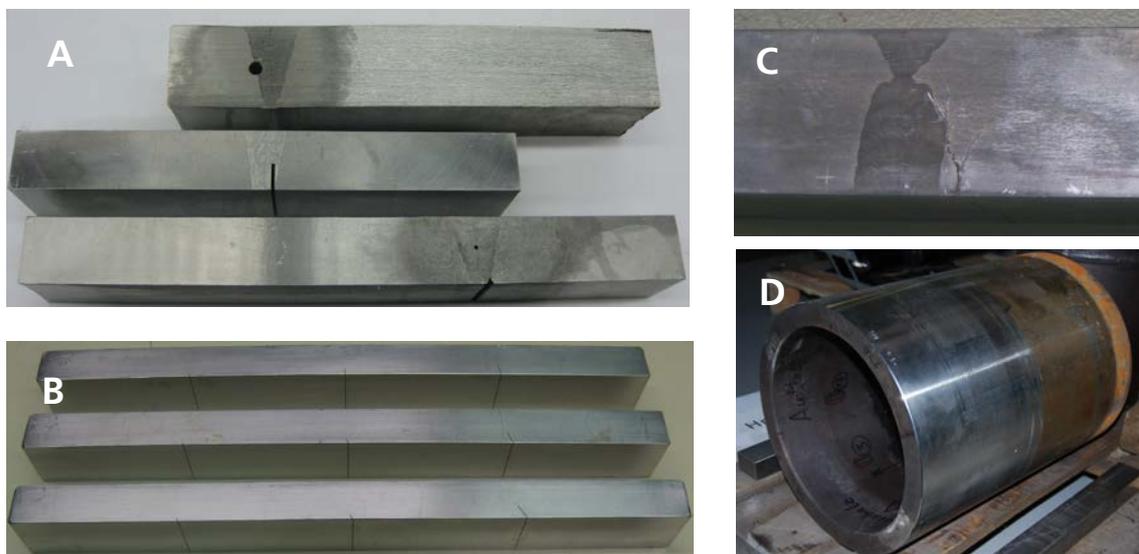


Abb. 49: Einige von den geprüften Testkörpern

Tabelle 3: Zusammenstellung der verwendeten Testkörper

Pos.	Bezeichnung	Abmessungen, mm	Werkstoff / Zusammensetzung	Fehlerart	Fehlertyp
1	TK 01/48	500×40×32	Aust. 1.4948 (X8CrNi1910)	künstlich	Nut in SN
2	US 62	-	keine Information	k	Bohrung in SN
3	UTT 1046	-	keine Information	k	Bohrung und Nut in SN
4	P1/50	500×40×32	Aust. 1.4401 (X5CrNiMo17-12-2)	k	Nuten im GW
5	P2/40	500×40×32	1.4401	k	Nuten im GW
6	P3/30	500×40×32	1.4401	k	Nuten im GW
7	P4/20	500×40×32	1.4401	k	Nuten im GW
8	P5/10	500×40×32	1.4401	k	Nuten im GW
9	R33	500×40×32	keine Information	k	Bohrungen in SN und im GW
10	17/31	432×45×38	1.4948	k	Nuten im GW
11	5	400×40×32	1.4948	k	Nuten im GW
12	6	400×40×32	1.4948	natürlich	Schwingrisse in WEZ und Naht
13	7	400×40×32	1.4948	n	Schwingriss in Naht
14	8	400×40×32	1.4948	n	Spannungskorr. Riss in der WEZ
15	9	400×40×32	1.4948	n	Spannungskorr. Riss in der WEZ
16	10	400×40×32	1.4948	n	Spannungskorr. Riss in der WEZ
17	11	400×40×32	1.4948	n	Spannungskorr. Riss in der WEZ

18	12	400×40×32	1.4948	n	Spannungskorr. Riss in der WEZ
19	13	400×40×32	1.4948	n	Spannungskorr. Riss in der WEZ
20	14	400×40×32	1.4948	n	Spannungskorr. Riss in der WEZ
21	15	400×40×32	1.4948	n	Spannungskorr. Riss in der WEZ
22	16	400×40×32	1.4948	n	Spannungskorr. Riss in der WEZ
23	18	484×40×35	1.4948	n	Schwingriss in der Naht
24	19	484×40×35	1.4948	n	Schwingriss in der Naht
25	20	484×40×35	1.4948	n	Spannungskorr. Risse in der Naht
26	32	400×42×32	1.4401	n	Spannungskorr. Riss in der Naht
27	33	400×48×31	1.4401	n	Spannungskorr. Riss in der Naht
28	34	400×48×31	1.4401	n	Spannungskorr. Riss in der Naht
29	MN1	Rohr, Länge 435, Ø 327 (außen), Ø 268 (innen)	Mischnaht: Ferrit 20MnMoNi5-5 Austenit X10CrNiNb18-9	künstlich	Nuten in der SN

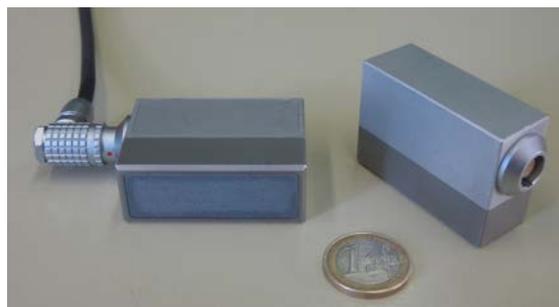
9.2 Auswahl der Prüfköpfe

Die Ultraschallmessungen und Experimente im Laufe des Vorhabens wurden mit handelsüblichen Phased Array Prüfköpfen von Firmen „Sonaxis“ und „Olympus NDT“ durchgeführt (Abb. 50 links).

Für die Schrägeinschallung wurden Vorlaufkeile sowohl für longitudinale (LW) als auch für transversale Wellen (SW) mit nominalen Brechungswinkeln 45 und 60 Grad (Werte für den C-Stahl) verwendet.



Konventionelle PA-Prüfköpfe
Hersteller: Olympus, Sonaxis



PA-Prüfköpfe mit verteilten Aperturen („Sparse Arrays“). Hersteller: ACSYS

Abb. 50: Phased-Array-Ultraschallwandler

Außerdem wurden für die Messungen auch die Prüfköpfe verwendet, die speziell für Ultraschall-Tomographie-Verfahren entwickelt worden sind (Abb. 50 rechts).

Die Abstände der Elemente der Prüfköpfe sind hier größer als $1/2$ Wellenlänge (ca. 1.7λ für die Longitudinal-Welle bzw. 3λ für die Transversal-Welle im Stahl). Die Anwendung der verteilten Aperturen führt zur Erhöhung des Auflösungsvermögens bei der Rekonstruktion der Prüfergebnisse nach dem SPA-Prinzip (siehe Abschnitt 6.5).

Die verwendeten Prüfköpfe besitzen integrierte Plexiglaskeile und sind für die Schrägeinschallung vorgesehen.

Der Hersteller von den Prüfköpfen mit verteilten Aperturen ist die Firma „Acoustic Control Systems“ (Moskau, Russland) [93].

Die Kennwerte der für die Ultraschallmessungen verwendeten Ultraschallwandler sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Parameter der Ultraschallwandler

Sensorbezeichnung	Nennfrequenz, MHz	Anzahl der Elemente	Elementabstand, mm
Olympus 2L16-A1	2.0	16	0.75
Olympus 2L64-A2	2.0	64	0.75
Olympus 5L16-A1	5.0	16	0.6
Olympus 5L64-A2	5.0	64	0.6
Olympus 5L16-A3	5.0	16	1.2
Sonaxis ME16-LMP3	2.5	16	1.3
Sonaxis ME16-LMP4	3.5	16	1.3
Sonaxis ME16-LMP5	5.0	16	1.0
ACSYS 60 LW	4.0	16	2.5
ACSYS 60 SW	4.0	16	2.5

9.3 Aufbau des Systemprototyps

Die beschriebene Sampling Phased Array-Technik wird durch spezielle Hardware- und Softwaremodule realisiert. Die Ultraschall-Hardware besteht aus folgenden Modulen (Abb. 51):

1. Prüf- und Auswertestation
 - Ultraschall-Server (Prüfrechner)
 - Manipulator-Steuerung
 - Koordinateninterface
2. Ultraschall-Elektronik OPTUS

Die Prüfobjekte wurden anhand eines Dreiachsen-Manipulators abgetastet. Die ortsbezogene Datenaufnahme wurde durch die Weginformationen von der Manipulatorsteuerung und eine Koordinatenschnittstelle gewährleistet.

Das Ultraschallprüfsystem ist in der Lage, Ultraschallprüfungen nach dem klassischen Impuls-Echo-Prinzip (Einzelschwinger-Wandler) sowie nach dem Gruppenstrahler-Prinzip (konventionelle PA-Technik und Sampling Phased Array-Technik) durchzuführen.

Im Folgenden werden die Funktionen und technischen Parameter der einzelnen Module kurz beschrieben.

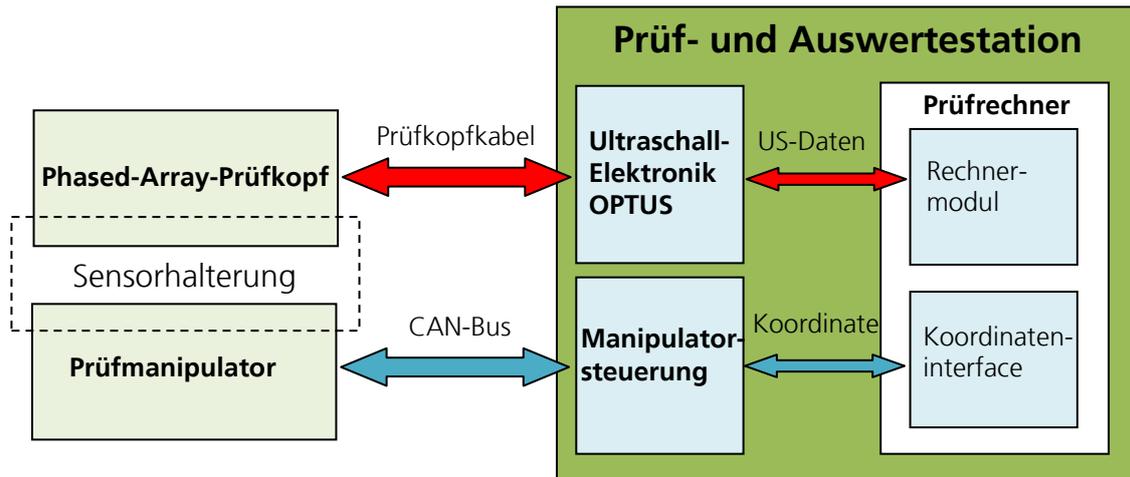


Abb. 51: Blockschaltbild des Ultraschallprüfsystems

9.3.1 Prüf- und Auswertestation

Die Prüf- und Auswertestation besteht aus einem Ultraschall-Server, einer Manipulatorsteuerung und peripheren Komponenten sowie den erforderlichen Anzeige- und Bedienelementen in folgender Zusammenstellung:

- Ultraschall-Server

Die im Abb. 52 dargestellte Prüf- und Auswertestation ist ein moderner, leistungstarker Industrierechner, in dem das Rechnermodul integriert ist und eine schnelle Rekonstruktion der Ultraschallprüfergebnisse erfolgt. Der Prüfrechner verfügt über folgende Konfiguration:

- Netzteil ca. 1000 W
- Prozessor min. 3 GHz, Quadcore
- 16 GB RAM (bei Windows XP64 Bit)
- High-End Grafikkarte
- DVD Multi Brenner
- Windows XP Professional 64-Bit



Abb. 52: Prüf- und Auswertestation

- **Manipulatorsteuerung**

Die Manipulatorsteuerung stellt eine separate Einheit dar, die in der Prüf- und Auswertestation integriert und mittels Kabelverbindungen mit der Prüfmechanik verbunden wird.

- **Koordinateninterface**

Die Koordinatenschnittstelle gewährleistet die ortsbezogene Anregung der Ultraschallelektronik und Datenaufnahme. Alle Ultraschalldaten werden mit der Ortsposition abgespeichert, so dass die zweidimensionalen Projektionsbilder bzw. das dreidimensionale Volumenbild erstellt werden können.

9.3.2 „Sampling Phased Array“-Ultraschallelektronik OPTUS

Das Ultraschall-Frontend OPTUS (Abb. 53) stellt ein vollständiges, autonomes 64-kanaliges Ultraschallgerät mit integrierten Phased-Array- und Sampling Phased Array-Funktionen dar, das auch als konventionelles Ultraschallsystem betrieben werden kann.



Abb. 53: Ultraschall-Elektronik-Frontend OPTUS

Die OPTUS-Elektronik erfüllt alle Anforderungen der EN-12668-1 „Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung - Teil 1: Prüfgeräte“ [93]. Die technischen Daten der OPTUS-Elektronik sind in der Anlage 1 zu entnehmen.

9.3.3 Dreiachsen-Prüfmanipulator

Abb. 54 zeigt das Prüfsystem mit einem 3-Achsenmanipulator sowie mit speziellen doppelt-kardanischen Sensorhalterungen für die Ultraschallprüfung an leicht gekrümmten Oberflächen.



Abb. 54: SPA-Prüfsystem für Tauch- und Kontakttechnik mit 3-Achsenmanipulator

Der Manipulator wird von dem entsprechenden Modul der Prüf- und Auswertestation gesteuert und gestattet zweidimensionale Abtastung des Prüfobjektes sowohl in der Tauch- als auch in der Kontakttechnik. Die Information über die aktuelle Prüfkopfposition wird während der Prüfung von dem Koordinateninterface in Echtzeit abgelesen und in die OPTUS-Steuerung sowie in das Rekonstruktionsmodul geleitet.

9.3.4 Rohrmanipulator

Für Ultraschallprüfung des Rohres mit einer Mischschweiß-Rundnaht wurde ein 2-Achsen-Manipulator entwickelt und konstruiert. Der Manipulator (Abb. 55) gewährleistet das Abtasten von stark gekrümmten Oberflächen nach vorgegebenem Fahrschema (Mäander  , Kombo  , Rundfahrt oder einzelne Linie) mit ausreichender Ankopplung des Prüfkopfes.

Der Prüfmanipulator wird an dem Rohr mithilfe eines Zahnringes angesetzt, der als Auflage für das Manipulator Getriebe dient. Zwei Servomotoren gewährleisten die Verschiebung der Prüfkopfhalterung mit befestigtem Phased-Array-Wandler in Umfangs- und Längsrichtung. Die Parametrierung des Manipulators und Übertragung der aktuellen Prüfkoordinate in den Prüfrechner erfolgt durch spezielle Schnittstelle.

In der Prüfkopfhalterung sind auch die Leitungskanäle für die Koppelmediumversorgung (Wasser oder Öl) vorgesehen.

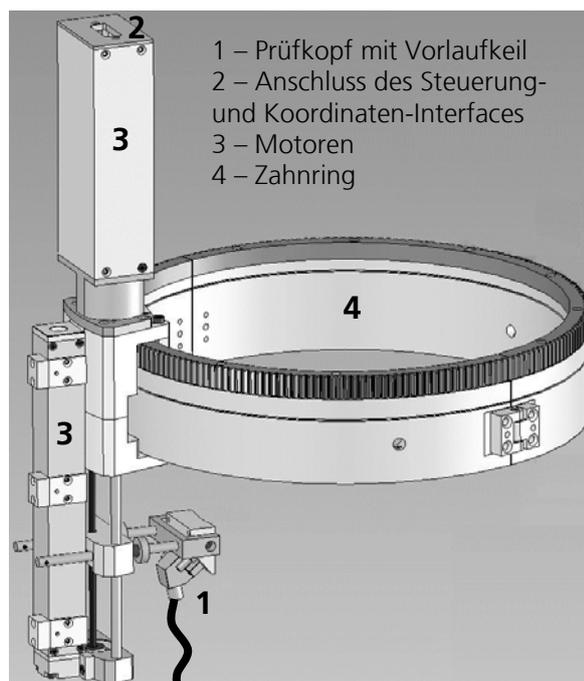


Abb. 55: Rohrmanipulator

9.4 Software für die Datenaufnahme, Schallausbreitungssimulation, SPA-Rekonstruktion und Auswertung der Prüfergebnisse

Die Prüfsoftware des Ultraschallprüfsystems beinhaltet die Module zur Steuerung der einzelnen Hardwarekomponenten (Ultraschallelektronik, Manipulatorsteuerung, Koordinateninterface) in manuellem und automatischem Betrieb. Sie übernimmt die Kontrolle über den Gesamtprüfprozess sowie die Parametrisierung von Systemkomponenten und das Datenmanagement. Das Prüfsystem und entsprechende Softwaremodule sind modular aufgebaut, sodass die Skalierbarkeit des Systems für verschiedene Prüfaufgaben (z. B. mit unterschiedlicher Anzahl der Gruppenstrahler-Kanäle, verschiedenen Bibliotheken der Rekonstruktionsalgorithmen usw.) gewährleistet ist.

Die Datenaufnahme im Sampling Phased Array Modus erfolgt so, dass die hochfrequenten Rohdaten von allen vorhandenen Empfangskanälen aufgenommen und durch SPA-Rekonstruktionsalgorithmen in Echtzeit verarbeitet werden. Im Fall eines isotropen Mediums wird die Look-Up-Tabelle automatisch berechnet.

In einem anisotropen, inhomogenen Werkstoff, indem sich die akustischen Wellen nicht linear ausbreiten, hängen die Form der Wellenfront sowie die Geschwindigkeit der Wellenausbreitung unter anderem von der Struktur des Werkstoffes ab. Bezüglich austenitischer Schweißnähte bedeutet dies, dass der Abstand zwischen dem Ultraschallprüfkopf und der Naht die Look-Up-Tabelle beeinflusst.

Um die austenitischen Schweißnähte in Echtzeit prüfen zu können, wird vor dem Prüfvorgang die Simulation der Schallausbreitung für alle vorgesehenen Messpositionen durchgeführt. Die berechneten Look-Up-Tabellen werden in einzelnen Dateien gespeichert und danach, während der Prüfung, entsprechend der Prüfkoordinate ausgewählt und von dem Rekonstruktionsmodul verwendet. Dadurch erfolgt die Rekonstruktion der zwei- und dreidimensionalen Ergebnisbilder ebenfalls in Echtzeit. Die gespeicherten Prüfergebnisse können nach Abschluss der Prüfung geladen und dargestellt werden.

Die Kommunikation zwischen den Softwaremodulen während der Prüfung wird in der Abb. 56 dargestellt.

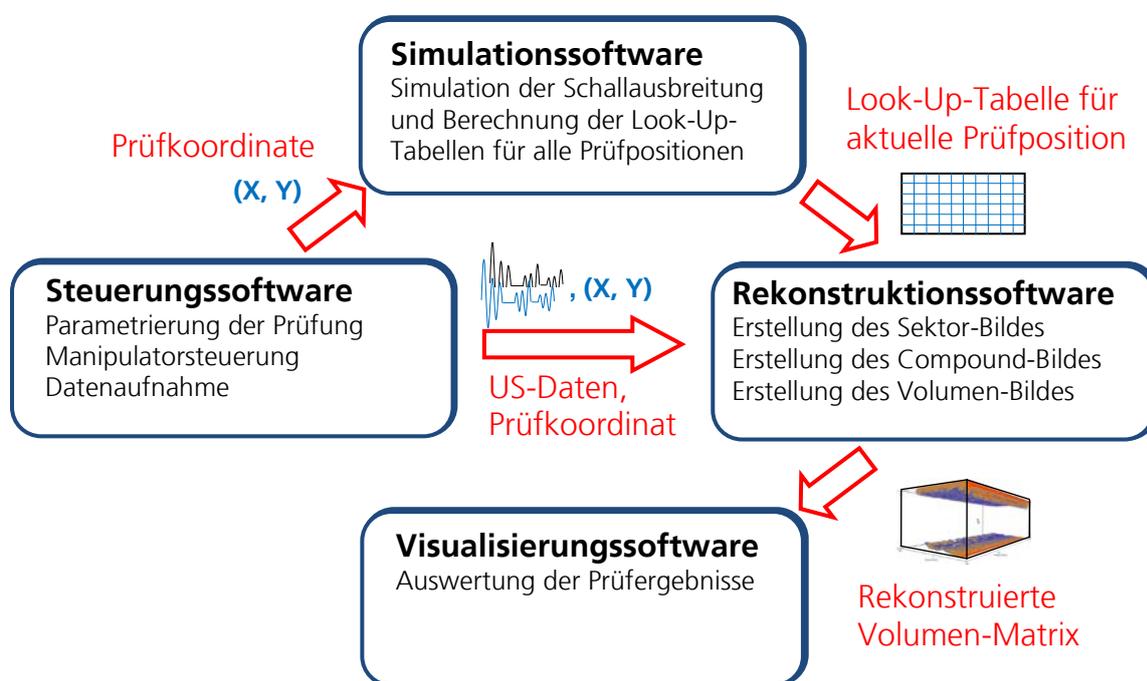


Abb. 56: Kommunikation der Softwaremodule

Die Besonderheit der Prüfsoftware ist ihre Fähigkeit, die gemessenen Ultraschalldaten während der Messung, d. h. on-line, dreidimensional darzustellen (Abb. 57).

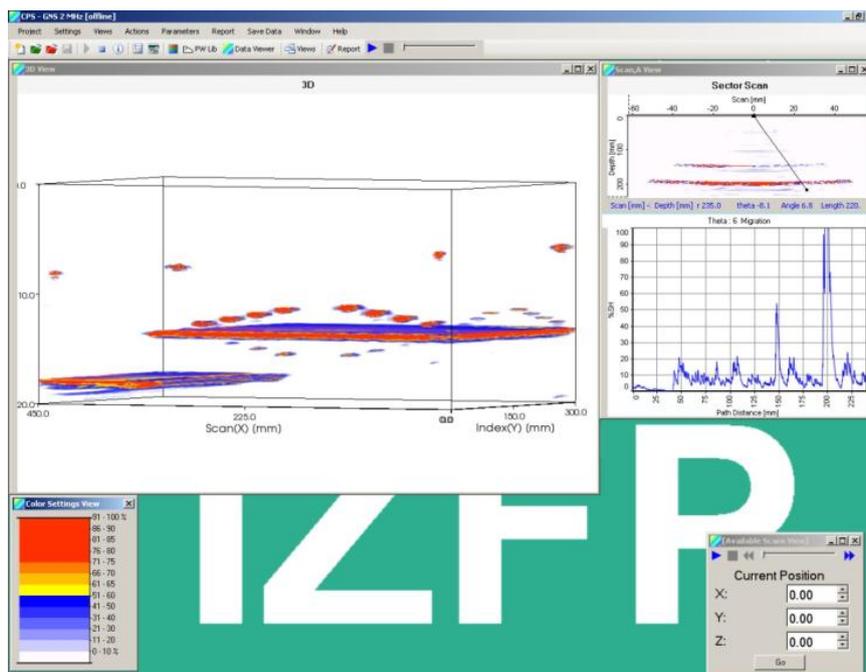


Abb. 57: 3D-Visualisierung der US-Prüfergebnisse im Sampling Phased Array Betrieb mit Prüf- und Auswertesoftware des Fraunhofer-IZFP

9.5 Durchführung von Ultraschallmessungen

9.5.1 Ermittlung der Schallgeschwindigkeit im Grundwerkstoff

Weil die Geometrie (u. a. Wanddicke) von allen Testkörpern bekannt ist, wurden für die Ermittlung der Schallgeschwindigkeit die Rückwand (für die longitudinale Welle) beziehungsweise die Kante der Testkörper (als Winkelspiegel für die transversale Welle) als Justierreflektoren benutzt (Abb. 58). Die gemessenen Werte der Schallgeschwindigkeit im Grundwerkstoff für die Testkörper sind in der Tabelle 5 zusammengestellt.

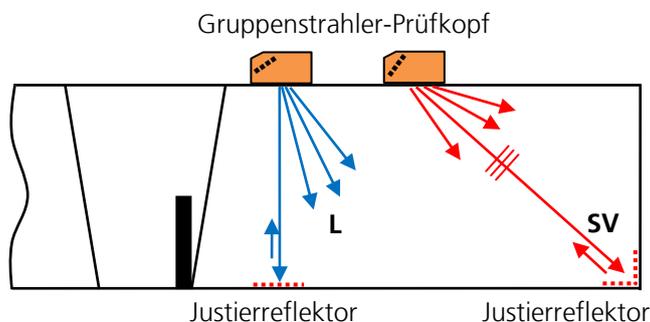


Abb. 58: Justierung der Schallgeschwindigkeit der Longitudinal- und der Transversalwelle im Grundwerkstoff der Testkörper

Tabelle 5: Gemessene Werte der Schallgeschwindigkeit von akustischen Wellen im Grundmaterial

Pos.	Bez.	Wanddicke mm	Geschwindigkeit von akustischen Wellen, m/s	
			Longitudinal-Welle	Transversal-Welle
1	TK 01/48	32	5740	3200
2	US 62	40	5640	3240
3	UTT 1046	32	5680	3180
4	P1/50	32	5780	3200
5	P2/40	32	5780	3200
6	P3/30	32	5780	3200
7	P4/20	32	5780	3200
8	P5/10	32	5780	3200
9	R33	32	5740	3210
10	17/31	38	5820	3200
11	5	32	5820	3200
12	6	32	5800	3220
13	7	32	5800	3200
14	8	32	5800	3200
15	9	32	5800	3220
16	10	32	5800	3200
17	11	32	5800	3200
18	12	32	5800	3210
19	13	32	5820	3200
20	14	32	5810	3200
21	15	32	5800	3200
22	16	32	5800	3200
24	18	35	5790	3200
25	19	35	5780	3200
26	20	35	5800	3200
31	32	32	5750	3180

32	33	31	5750	3180
33	34	31	5750	3180
34	MN1	29.5	Austenit: 5720 Ferrit: 5920	Austenit: 3210 Ferrit: 3260

9.5.1 Datenaufnahme

An den flachen Testkörpern wurden die Prüfköpfe mittels des 3-Achsen-Manipulators quer zur Schweißnaht verfahren (Abb. 59).

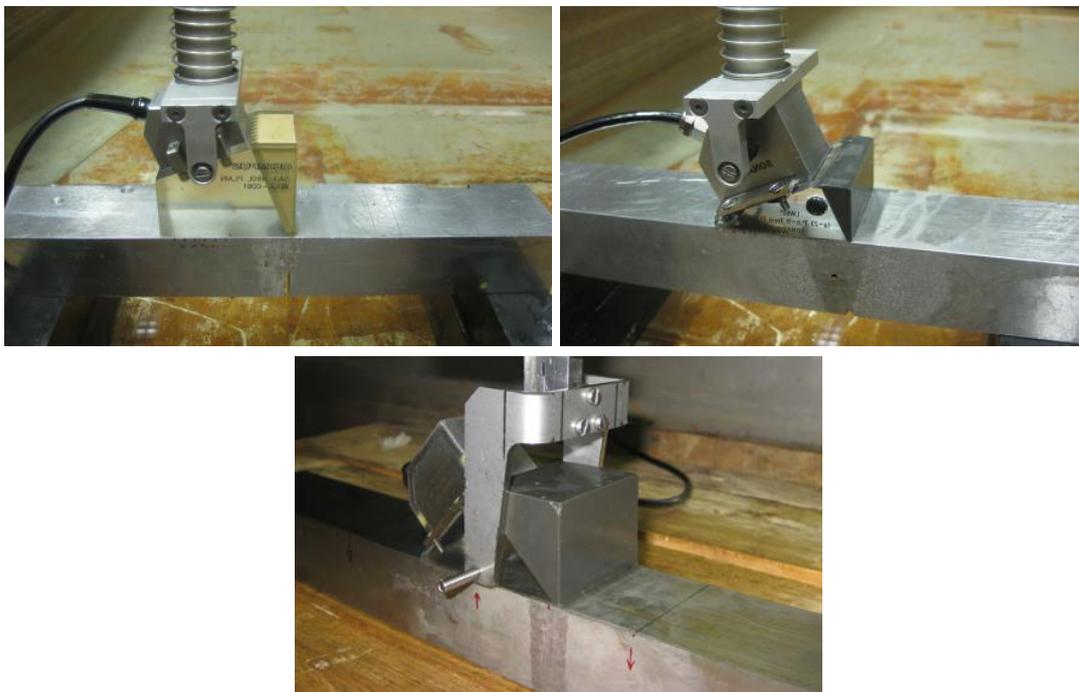


Abb. 59: Abtastung der austenitischen Testkörper

Mit einem Schussabstand von 1 mm und einem Spurabstand von 2 mm wurden die Ultraschalldaten nach dem Sampling Phased Array-Prinzip aufgenommen (Abb. 60).

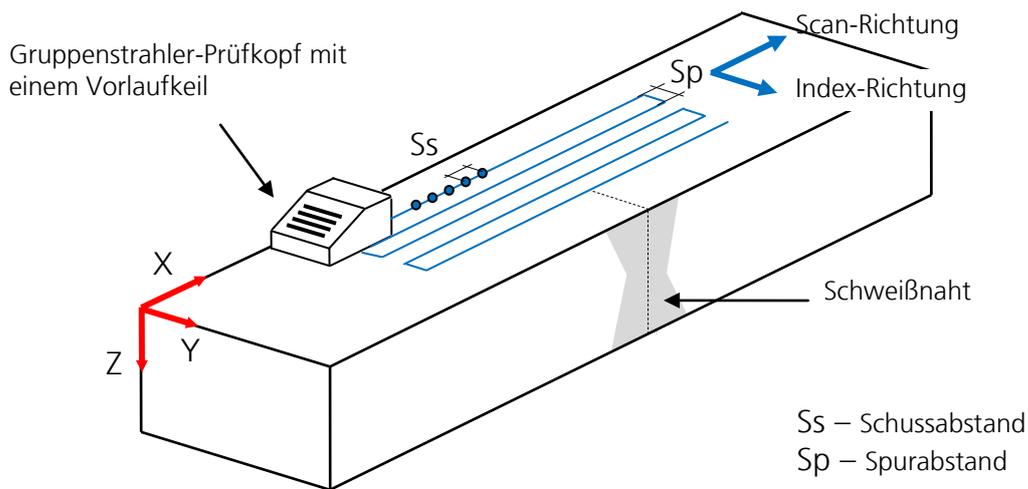


Abb. 60: Schematische Abbildung der Prüfpositionen an flachen Testkörpern

Die aufgenommenen Messdaten werden während des Messvorganges für die Echtzeit-Rekonstruktion von zweidimensionalen Sektor- und B-Bildern benutzt und gleichzeitig auf eine Festplatte für die nachfolgende Analyse gespeichert. Die rekonstruierten B-Bilder füllen schrittweise eine im Vorfeld vorbereitende dreidimensionale Matrix, dadurch entsteht ein Ultraschall-Volumenbild vom Prüfobjekt.

In ähnlicher Weise wurden die Ultraschalldaten an dem Mischnaht-Rohrtestkörper aufgenommen (Abb. 61). Der Gruppenstrahler-Prüfkopf wurde quer zur Naht verfahren, von der ferritischen Seite ausgehend. Die Index-Richtung entspricht der Umlaufrichtung. Der Schussabstand beträgt 1 mm, der Spurbestand 2 mm.

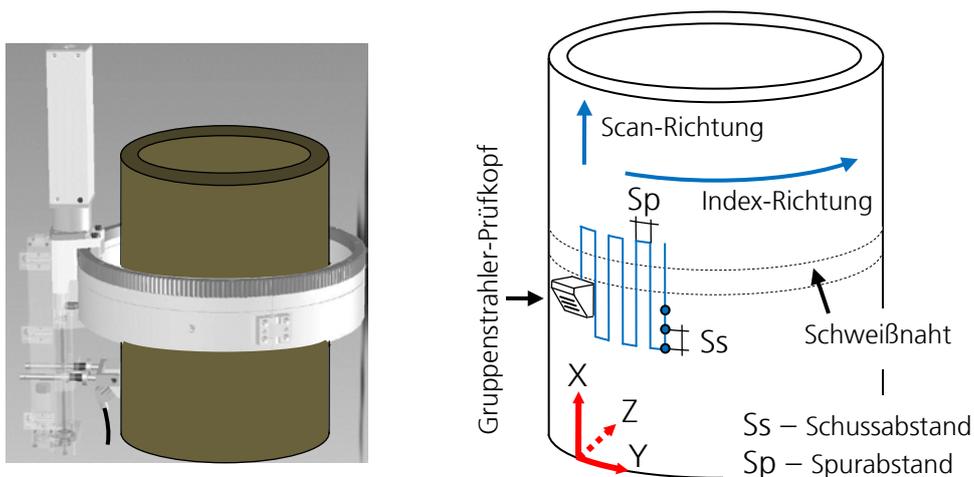


Abb. 61: Schematische Abbildung der Prüfpositionen an dem Mischnaht-Rohr

9.5.2 Rekonstruktion von Ergebnisbildern

Zur Rekonstruktion der Ergebnisbilder wurden für alle Testkörper mit Schweißnaht entsprechenden Modelle der Schweißnahtgefüge erstellt, die anhand von Schlifffbildern ermittelt wurden.

Für alle Messpositionen wurde die Simulation der Schallausbreitung durchgeführt, die die Look-Up-Tabelle mit den Laufzeiten von jedem Prüfkopfelement zu jedem Volumenpunkt berechnet und die entsprechenden Sektor-Bilder rekonstruiert. Die Sektor-Bilder wurden anschließend in einem Compound-B-Bild überlagert und gemittelt. Letztendlich wurden aus den Compound-B-Bildern von verschiedenen Spuren dreidimensionale Volumen-Bilder erstellt.

An den Testkörpern mit einer Schweißnaht und künstlichen Fehlern (TK 01/48, US62, UTT 1046) wurden die elastischen Konstanten nach der GECDM-Methode (siehe Kapitel 8) präzisiert. Für eine ausgewählte Messposition wurde die Schallausbreitungssimulation durchgeführt, die Look-Up-Tabelle mit den Laufzeiten von jedem Prüfkopfelement zu jedem Volumenpunkt berechnet und das entsprechende Sektor-Bild rekonstruiert. Das erstellte Bild wurde für eine iterative Anpassung der elastischen Eigenschaften genutzt. Die Prozedur wurde für andere Messpositionen wiederholt und die Ergebnisse zweier Suchvorgänge wurden miteinander verglichen (beim Testkörper TK 01/48 - auch mit den vorher ermittelten Werten [26]). Die Erstellung von Ergebnisbildern ist unter Annahme der präzisierten elastischen Konstanten durchgeführt worden.

An den Testkörpern mit realistischen Fehlern (Schwingrisse, Spannungskorrosionsrisse), konnte keine Nut als Referenzfehler eingebracht werden. Diese Testkörper sind aus dem austenitischen Werkstoff 1.4948 (X6CrNi1810) bzw. 1.4401 (X5CrNiMo17-12-2) hergestellt. Für die Simulation der Schallausbreitung wurden die elastischen Konstanten des ähnlichen Werkstoffes 1.4301 (X5CrNi1810) genommen, die im Rahmen des Forschungsprojektes Austenit-I [25] ermittelt worden sind: $C_{11}=241$ GPa, $C_{13}=138$ GPa, $C_{33}=240$ GPa, $C_{44}=112$ GPa, $C_{66}=72$ GPa, $\rho=7820$ kg/m³.

Für Testkörper mit isotroper Gefügestruktur erfolgt die SPA-Rekonstruktion unter der Annahme von konstanter Schallgeschwindigkeit, wie im Abschnitt 6.3.2 beschrieben.

10. Prüfergebnisse

10.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen der MPA- Stuttgart.

10.1.1 Metallographie

Da die Korngrößen- und -orientierungen in der Schweißnaht einen wesentlichen Einfluss auf die Ultraschallausbreitung haben und damit auch auf das Fehlernachweisvermögen, wurde zunächst an jedem der Austenit-Testkörper im Bereich der Schweißnähte ein Schliffbild erzeugt um die Kornstruktur darzustellen. Eine Übersicht zur Metallographie findet sich in Abb. 62 und in der Tabelle 1 des Abschlussberichtes [92] der MPA Universität Stuttgart zu diesem Vorhaben.

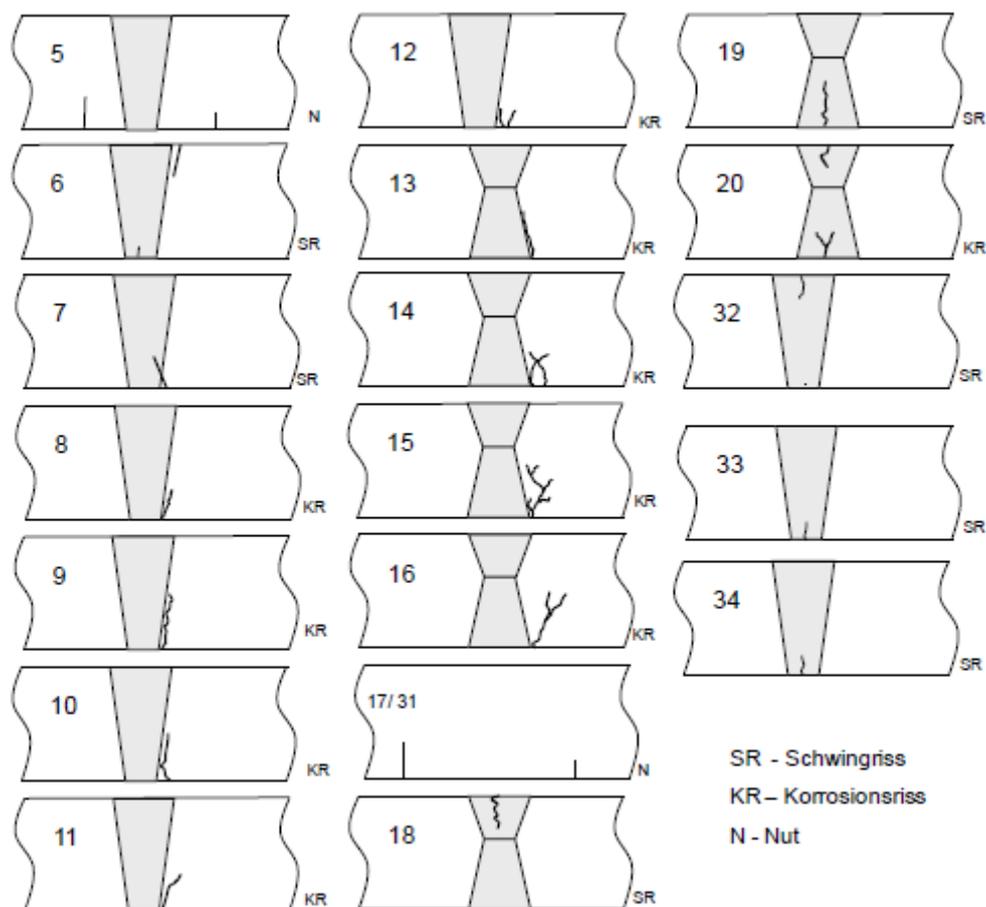


Abb. 62: Lage der von der MPA- Stuttgart eingebrachten Risse

10.1.2 Zerstörungsfreie Prüfung

Farbeindringprüfung

An allen austenitischen Testkörpern wurde im Bereich der Schweißnaht eine Farbeindringprüfung mit fluoreszierendem Eindringmittel durchgeführt. Dabei wurde die max. Tiefenausdehnung, die Schräglage und die Verzweigung der Risse dokumentiert, siehe Tabelle 2 des Abschlussberichtes [92] der MPA Universität Stuttgart zu diesem Vorhaben.

Durchstrahlungsprüfung

Um eine Aussage über die Rissverläufe auch in der Breite der Schweißnaht zu erhalten wurden an allen Testkörpern Durchstrahlungsaufnahmen durchgeführt. In den Durchstrahlungsaufnahmen ist die Verzweigung der interkristallinen Spannungskorrosionsrisse gut abgebildet. Es ist zu erkennen, dass sich die Verzweigung in Testkörperdickenrichtung ändert, siehe Tabelle 3 des Abschlussberichtes [92] der MPA Universität Stuttgart zu diesem Vorhaben.

Ultraschallvorprüfung

Durchgeführt wurde eine Ultraschallprüfung nach der TOFD- Technik (Time of Flight Diffraction Technique) mit zwei 2 MHz- L- Wellenprüfköpfen. Die Ultraschalldaten sind in Tabelle 4 des Abschlussberichtes [92] der MPA Universität Stuttgart zu diesem Vorhaben zusammengestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Technik nicht zum Nachweis von Rissen in inhomogenen, anisotropen Schweißnähten geeignet ist. Die Trennung zwischen Anzeigen aufgrund von Streuung am Interface oder Schweißnahtgefüge sind nur schwer von den Anzeigen der Beugung an den Rissspitzen zu unterscheiden.

An ausgewählten Testkörpern wurden zusätzlich mechanisierte Ultraschallprüfungen mittels der Impulsecho- Technik durchgeführt (Transversalwellen, 45° Einschallwinkel, 1 MHz).

Ergebnis:

- a) Anschallung über den Grundwerkstoff: alle Fehler wurden nachgewiesen.
- b) Anschallung durch die Schweißnaht: Nur die größten Fehler konnten nachgewiesen werden, Abb. 7 – 12 des Abschlussberichtes [92] der MPA Universität Stuttgart zu diesem Vorhaben.

10.2 Ergebnisse der Untersuchungen des IZFP- Saarbrücken

10.2.1 Validierung der entwickelten Algorithmen

Für die Validierung von Rechenvorgängen (Simulation der Schallausbreitung, Laufzeitberechnung, iterative Suche der Eigenschaften) wurden folgende Testkörper mit künstlich eingebrachten Materialfehlern ausgewählt (Tabelle 6):

TK 1/48

Der Testkörper wurde im Rahmen des BMBF-Projektes *Austenit II* [26] verwendet und wurde speziell für Projektzwecke in *The Welding Institute (Cambridge, England)* hergestellt. Der Testkörper besteht aus zwei Schichten Grundmaterial und einer Schicht Schweißgut (Breitspaltschweißnaht, Werkstoff X8CrNi1910), wobei die Stängelkristalle senkrecht zur Plattennormale gezüchtet worden sind. Die elastischen Eigenschaften des Schweißgutes wurden nach der Testkörperfertigung anhand drei verschiedener Verfahren (Impuls-Echo-Verfahren, Stab-Resonanzmessungen und Resonanzspektroskopie) ermittelt und verglichen [26].

Das Probestück enthält eine durchgehende Nut 1.5×13 mm im Schweißgut.

Der Dreischicht-Testkörper mit den ermittelten elastischen Konstanten ist für die Validierung der simulierten Schallausbreitung in einem anisotropen homogenen Medium sowie für die Validierung des GECDM-Algorithmus geeignet.

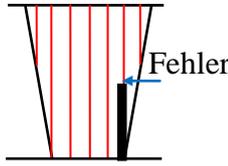
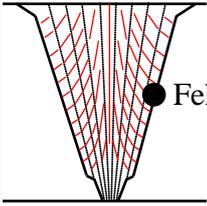
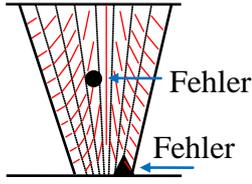
US 62

Der Testkörper enthält eine Breitspaltschweißnaht, wobei in die Nahtflanke eine Zylinderbohrung $\varnothing 6$ mm eingebracht wird. Das Probestück wurde für die Validierung der Schallausbreitungssimulation in einem anisotropen, inhomogenen Medium genutzt.

UTT 1046

Der Testkörper enthält eine Breitspaltschweißnaht und besitzt zwei künstliche Fehler – eine Zylinderbohrung $\varnothing 2$ mm und eine dreieckige Nut 2.5×3 mm in der Nahtflanke.

Tabelle 6: Testkörper für Validierung von Rechenvorgängen

Bez.	Werkstoff	Gefügestruktur	Elastischen Eigenschaften		Zweck
			GW	SN	
TK 1/48	X8CrNi1910		+	+	Validierung der Schallausbreitungssimulation für den Fall „isotrop“-„anisotrop homogen“-„isotrop“. Validierung der iterativen Suche GECDM (durch Vergleich von Ergebnissen mit tatsächlichen Werten).
US 62	unbekannt		+	-	Validierung der Schallausbreitungssimulation für den Fall „isotrop“-„anisotrop inhomogen“-„isotrop“. Nachweis der Funktionalität des GECDM-Algorithmus.
UTT 1046	unbekannt		+	-	Validierung der iterativen Suche GECDM

Legende: GW – Grundwerkstoff, SN – Schweißnaht, +/- bekannt oder messbar / unbekannt

Unter der Bemerkung „bekannten elastischen Eigenschaften des Grundmaterials“ in der Tabelle 6 ist zu verstehen, dass die Dicke des Testkörpers bekannt ist und dadurch die Schallgeschwindigkeit im Grundwerkstoff gemessen werden kann. Die Gefügestruktur der Testkörper wurde anhand der Schliiffbilder ermittelt.

10.2.1.1 Schweißnaht mit homogener Struktur (3-Schicht-Modell)

Der Testkörper TK 1/48 enthält eine Breitspaltschweißnaht mit senkrecht zur Oberfläche verlaufenden Stängelkristallen. Die gemessene Schallgeschwindigkeit im isotropen Grundmaterial betrug 5740 m/sec. In die Schweißnaht ist eine künstliche Nut 1.5×13 mm eingebracht (Abb. 63, links).

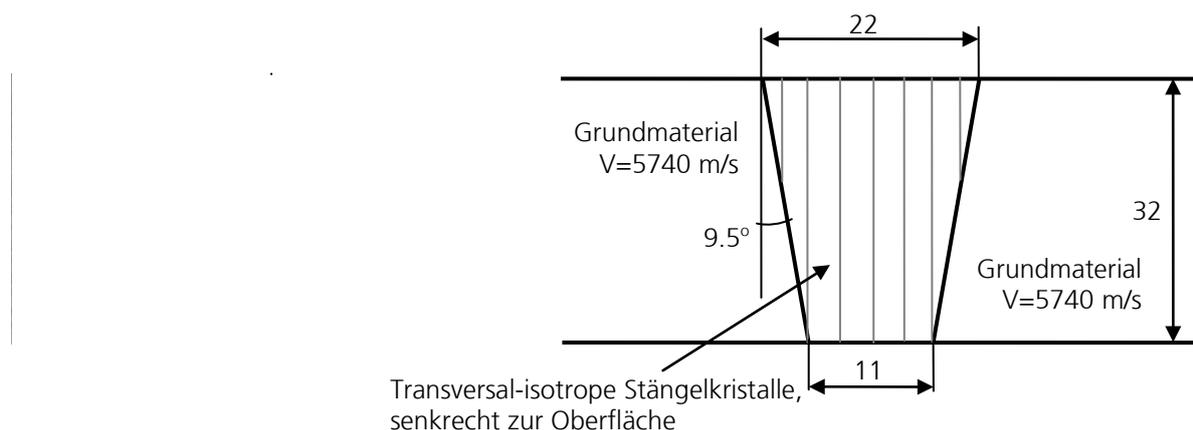


Abb. 63: Das Schlibbild und angenommenes Modell des Testkörpers TK 1/48

Da alle Stängelkristalle in der Schweißnaht gleich orientiert sind, kann sie als ein 3-fach geschichteter Werkstoff betrachtet werden. Das entsprechende Modell wird in Abb. 63 rechts dargestellt. Als Ausgangswerte für die **Gradient Elastic Constant Descent Methode** wurden folgende Werte angenommen: $C_{11}=280$ GPa, $C_{13}=150$ GPa, $C_{33}=200$ GPa, $C_{44}=140$ GPa, $C_{66}=86$ GPa, Dichte 8100 kg/m³.

Mittels **GECD-Methode** wurden die elastischen Konstanten für zwei Prüfpositionen ermittelt und miteinander verglichen. Als Referenzreflektor für den Suchvorgang wurde die Spitze der künstlichen Nut verwendet. Die Ergebnisse der GECD-Methode (wobei der 5 MHz –Phased-Array-Prüfkopf von Fa. Olympus, quasilongitudinale Welle, Nominalkeilwinkel 20° , Nominalbrechungswinkel im C-Stahl 60° verwendet wurde) sind in der Tabelle 7 zusammengestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse des GECDM-Suchvorganges im Vergleich mit anderen Messverfahren

Elast. Konst.	Im Rahmen des Forschungsprojektes [34] ermittelte Werte, GPa		Nach der GECDM ermittelte Werte, GPa (Toleranz der Suche 0.5 GPa)			
	Impuls-Echo und Resonanzmessungen	Akustische Resonanzspektroskopie	Abstand 25 mm von der SN-Mitte	Maximaler Fehler, %	Abstand 35 mm von der SN-Mitte	Maximaler Fehler, %
C_{11}	229.6	221.1	225	2.0	223.5	2.7
C_{13}	141.4	128.1	132.5	6.3	135	5.4
C_{33}	217.4	217.4	215	1.1	216.5	0.4
C_{44}	118.5	118.5	118	0.4	121	2.1
C_{66}	85.67	85.67	-		-	

Da die Konstante C_{66} die Schallgeschwindigkeit der qL-Welle nicht beeinflusst (siehe Formel 19 und 22), kann ihr Wert anhand des GECDM-Algorithmus nicht ermittelt werden. Andererseits ist diese Konstante für die Prüfung mittels qL-Wellen bzw. qSV-Wellen nicht relevant.

Aus der Tabelle 7 folgt, dass die Ergebnisse der GECDM-Suche mit den anhand anderer Verfahren ermittelten Werten gut korrelieren. Außerdem wird die Identität der Suchergebnisse von zwei unterschiedlichen Positionen (d.h., bei den sich unterscheidenden Ausgangsbedingungen des GECDM-Algorithmus) ausgewiesen.

Basierend auf den ermittelten elastischen Konstanten und dem angenommenen Schweißnahtmodell wurde die Simulation der Schallausbreitung für jede Prüfposition durchgeführt und die Laufzeiten von jedem Element des Phased Array Prüfkopfs bis zu jedem Volumenpunkt berechnet und in der Form von Look-Up-Tabellen gespeichert.

Da die Schweißnaht als ein 3-Schicht-Werkstoff angenommen ist, wobei jede Schicht als transversal-isotrop betrachtet wird, entsteht die Schallbrechung nur an den Schweißnahtflanken. Innerhalb des Grundmaterials und des Schweißgutes breiten sich die Strahlen linear aus (Abb. 64).

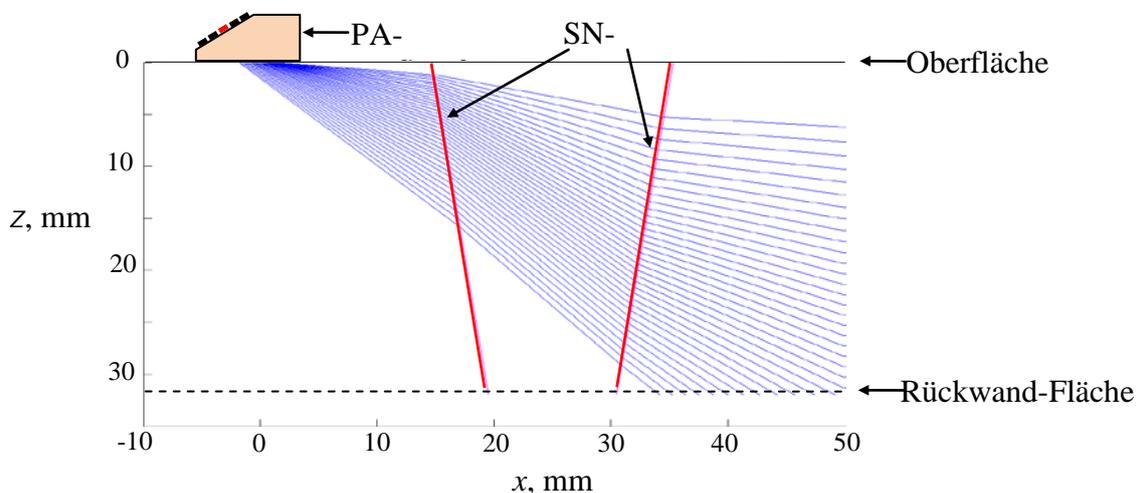


Abb. 64: Ray-Tracing-Simulation der Ausbreitung der quasilongitudinalen Welle im Testkörper TK 1/48.

Anhand der berechneten Look-Up-Tabellen wurden die Sektor-Bilder für jede Prüfposition rekonstruiert und anschließend in dem Compound-B-Bild überlagert und gemittelt.

In Abb. 66 und Abb. 65 werden die Prüfergebnisse der SPA-Technik mit inverser Phasenanpassung in Form der Compound-B-Bilder im Vergleich mit den Ergebnissen der konventionellen Gruppenstrahler-Technik dargestellt.

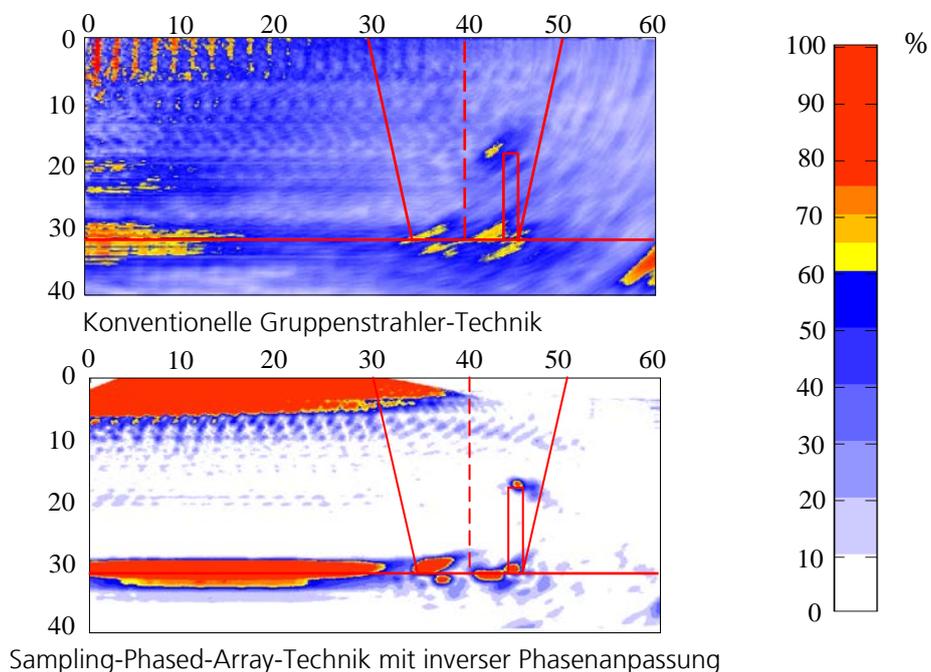


Abb. 65: Compound-B-Bilder vom Testkörper TK 1/48
Prüfpositionen 0-40 mm von der SN-Mitte. Prüfkopf: Sonaxis, 3.5 MHz;
Elementabstand: 1.3 mm; Vorlaufkeil: 60 LW

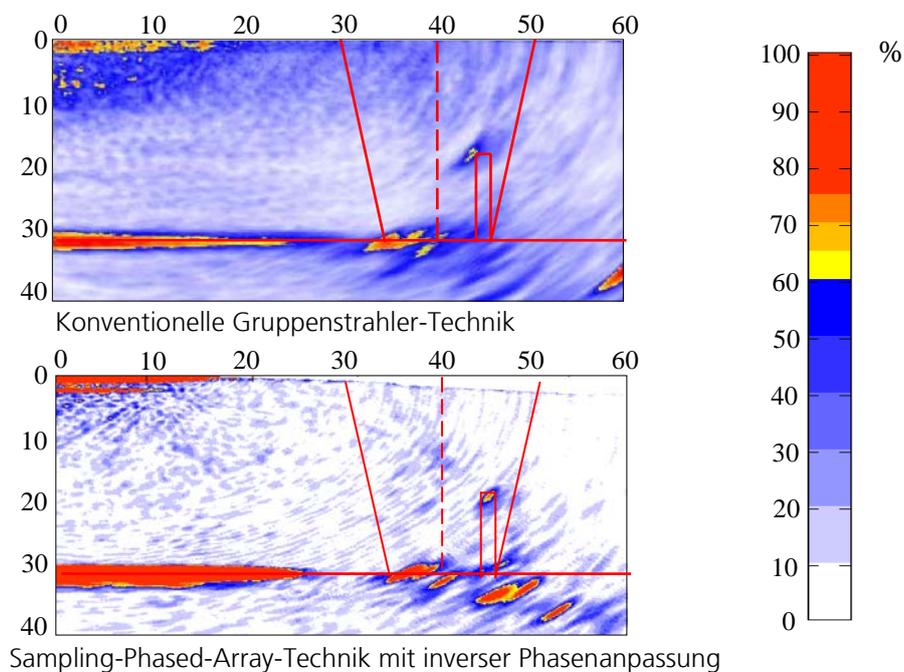


Abb. 66: Compound-B-Bilder vom Testkörper TK 1/48
Prüfpositionen 0-40 mm von der SN-Mitte. Prüfkopf: Olympus 5L16-A3, 5 MHz;
Elementabstand: 1.2 mm; Vorlaufkeil: 60 LW

10.2.1.2 Schweißnaht mit inhomogener Struktur (Mehr-Schicht-Modell)

Der Testkörper US 62 enthält eine V-förmige Breitspaltschweißnaht. Die gemessene Schallgeschwindigkeit im isotropen Grundmaterial beträgt 5680 m/sec. Es liegt keine Information über die Materialanisotropie vor. Das Schweißgut des Testkörpers besitzt eine inhomogene Struktur, die Stengelkristalle verlaufen von den Schweißnahtflanken (senkrecht zu diesen) in die Richtung der Oberfläche (Abb. 67). In die Schweißnaht ist eine zylindrische Bohrung mit $\varnothing 6\text{mm}$ eingebracht.

Die Schweißnaht im Testkörper wird als ein 9-fach geschichteter Werkstoff betrachtet. Das entsprechende Modell ist in Abb. 68 dargestellt.

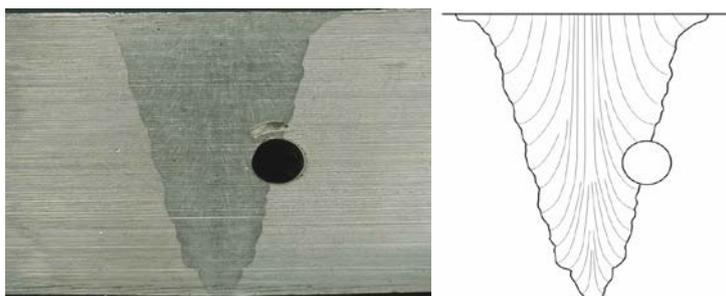
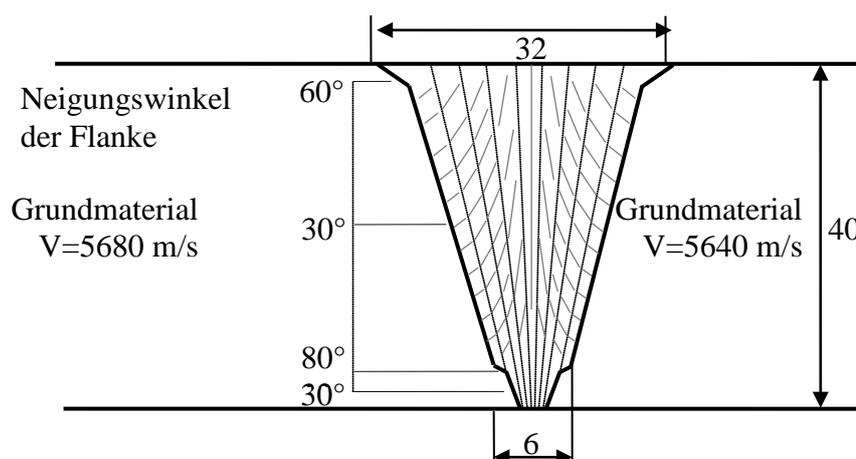


Abb. 67: Das Schlibbild (l.) und die Konturen der Stängelkristalle (r.) vom Testkörper US 62

Als Ausgangswerte für die Gradient Elastic Constant

Descent Methode wurden die Eigenschaften des austenitischen Monokristalls X8CrNi1910 angenommen: $C_{11}=263\text{ GPa}$, $C_{13}=145\text{ GPa}$, $C_{33}=216\text{ GPa}$, $C_{44}=129\text{ GPa}$, Dichte 8100 kg/m^3 . Als Referenzreflektor für den Suchvorgang wurde die Zylinderbohrung verwendet und als Datensatz wurden die Ultraschalldaten, angenommen mittels 5 MHz PA-Prüfkopf von Fa. Olympus (quasilongitudinale Welle, Elementabstand 1.2 mm, Nominalbrechungswinkel im C-Stahl 60°) benutzt.



Orientierung der Stängelkristalle (v.l.n.r.): $60^\circ, 47^\circ, 23^\circ, 12^\circ, 0^\circ, -12^\circ, -23^\circ, -47^\circ, -60^\circ$

Abb. 68: Das angenommene Modell des Testkörpers US 62

Mittels der **GECD-Methode** wurden dann folgende Werte der Steifigkeitsmatrix für den Testkörper US 62 ermittelt: $C_{11}=318$ GPa, $C_{13}=122.5$ GPa, $C_{33}=167$ GPa, $C_{44}=105$ GPa.

Die simulierte Schallausbreitung vom mittleren Element des PA-Prüfkopfes für die auf 30 mm von der SN-Mitte entfernte Prüfposition ist in Abb. 69 dargestellt. Die mehrfache Brechung an Zonengrenzen führt zur Schalbündelbeugung.

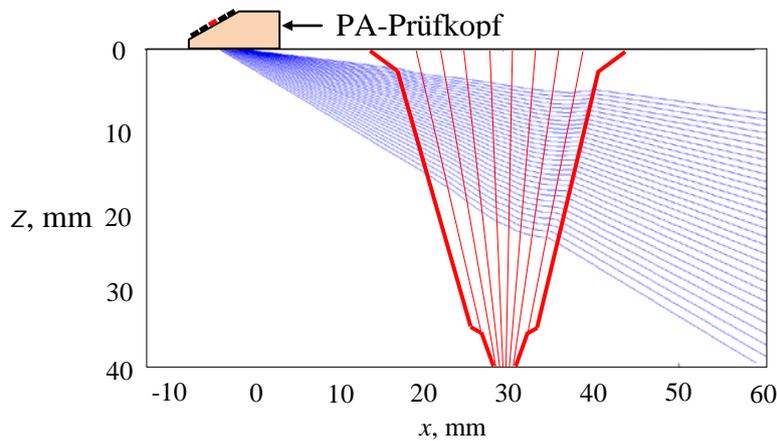


Abb. 69: Ray-Tracing-Simulation der Schallausbreitung (qL-Welle) im Testkörper US 62

Die Einkopplfläche des Testkörpers ist zweidimensional gekrümmt, was während des Abtastens zu Ankopplungsverlusten führt. Deswegen wurde die Messung am US 62 nur in einer Prüfposition durchgeführt. In Abb. 70 - Abb. 71 werden die Prüfergebnisse der SPA-Technik mit inverser Phasenanpassung in der Form der rekonstruierten Sektor-Bilder und entsprechenden A-Bilder dargestellt.

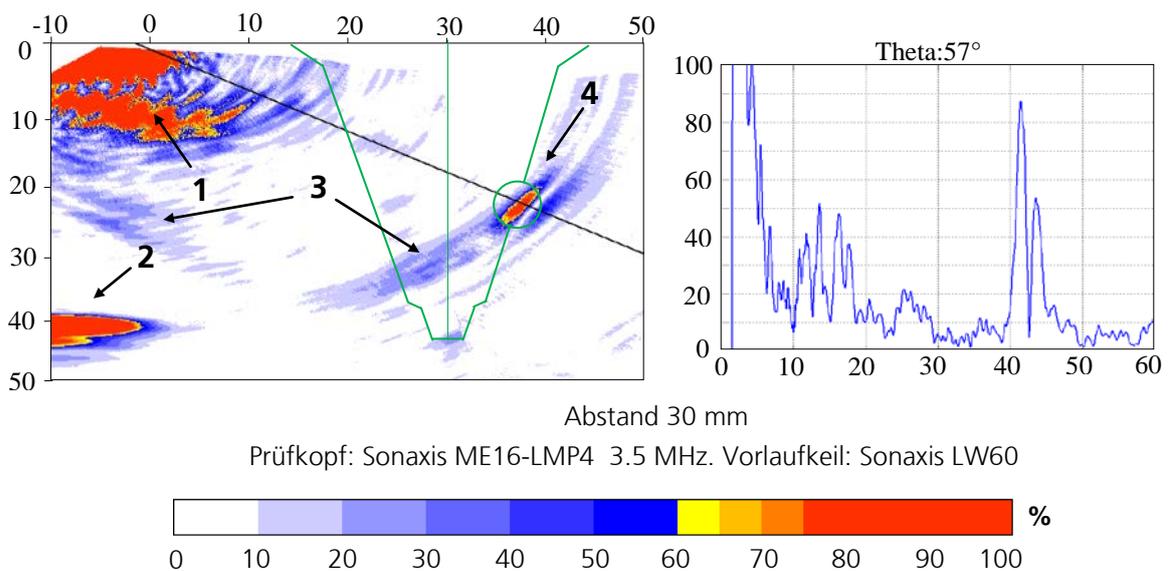


Abb. 70: Sektor- und A-Bild vom Testkörper US 62, rekonstruiert nach dem SPA-Prinzip mit inverser Phasenanpassung. Prüffrequenz 3.5 MHz, quasilongitudinale Welle

Die Anzeigen im Sektor-Bild entsprechen:

- 1 – der Sendeimpuls-Einfluss-Zone;
- 2 – der Rückwandechoanzeige;
- 3 – den Anzeigen, verursacht durch die Reverberationen der Schallwellen im Vorlaufkeil;
- 4 – der Anzeige von der Bohrung;
- 5 – den gestreuten Signale von der vorderen Schweißnahtflanke.

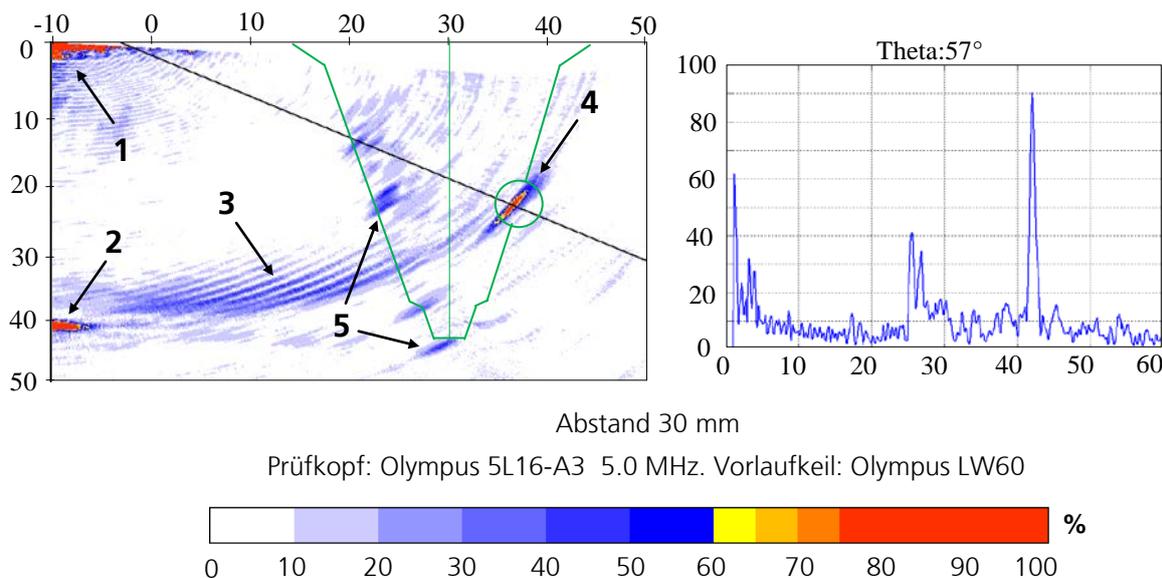


Abb. 71: Sektor- und A-Bild vom Testkörper US 62, rekonstruierten nach dem SPA-Prinzip mit inverser Phasen Anpassung. Prüffrequenz 5 MHz, quasilongitudinale Welle

Die Abbildungen Abb. 70 und Abb. 71 zeigen, dass sich das Auflösungsvermögen des SPA-Verfahrens mit der Frequenzsteigerung verbessert. Zusätzlich reduziert sich die Sendeimpuls-Einfluss-Zone, die mit der Impulslänge in Zusammenhang steht. Andererseits nimmt bei höheren Frequenzen der Pegel der von den Stängelkristallen rückgestreuten Signale zu (der hellblau Bereich zwischen den SN-Flanken in Abb. 71).

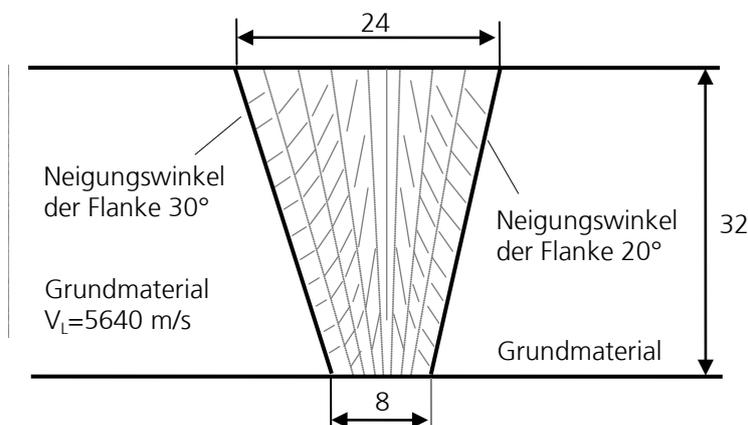
Anhand des Testkörpers US 62 wurde der Algorithmus der iterativen Phasen Anpassung sowie die iterative Suche der elastischen Konstanten für ein inhomogenes anisotropes Medium validiert: der künstliche Reflektor (Bohrung) wird in dem Sektor-Bild ortsgetreu dargestellt, die entsprechende Anzeige besitzt maximale Amplitude und Schärfe.

10.2.1.3 Schweißnaht mit inhomogener Struktur und zwei Fehlern

Der Testkörper UTT 1046 enthält eine V-förmige Breitspaltschweißnaht. Die gemessene Schallgeschwindigkeit im isotropen Grundmaterial beträgt 5640 m/sec. Es liegt keine

Information über die Materialanisotropie vor. Das Schweißgut des Testkörpers besitzt eine inhomogene Struktur.

In die Schweißnaht sind eine zylindrische Bohrung $\varnothing 2\text{mm}$ und eine Dreiecks-Nut $2.5 \times 3\text{mm}$ durchgehend eingebracht (in Abb. 72, links).



Orientierung der Stängelkristalle (v.l.n.r.): $55^\circ, 45^\circ, 22^\circ, 10^\circ, 0^\circ, -10^\circ, -22^\circ, -55^\circ$

Abb. 72: Schliffbild und angenommenes Modell des Testkörpers UTT 1046

Die Schweißnaht im Testkörpers UTT 1046 wird als ein 8-fach geschichteter Werkstoff betrachtet. Das entsprechende Modell wird in Abb. 72, rechts dargestellt.

Als Ausgangswerte für die **Gradient Elastic Constant Descent Method** wurden die elastischen Eigenschaften des austenitischen Monokristalls X8CrNi1910 angenommen:

$C_{11}=263 \text{ GPa}$, $C_{13}=145 \text{ GPa}$, $C_{33}=216 \text{ GPa}$, $C_{44}=129 \text{ GPa}$, $C_{66}=82 \text{ GPa}$, Dichte 8100 kg/m^3 .

Anhand der **GECD-Methode** mit der Suchtoleranz 0.5 GPa wurden dann die elastischen Konstanten für zwei Prüfpositionen ermittelt und miteinander verglichen. Als Referenzreflektor für den Suchvorgang wurde sowohl die Zylinderbohrung als auch die Nut verwendet. Die Dichte des Werkstoffes wurde als $\rho = 8100 \text{ kg/m}^3$ festgelegt.

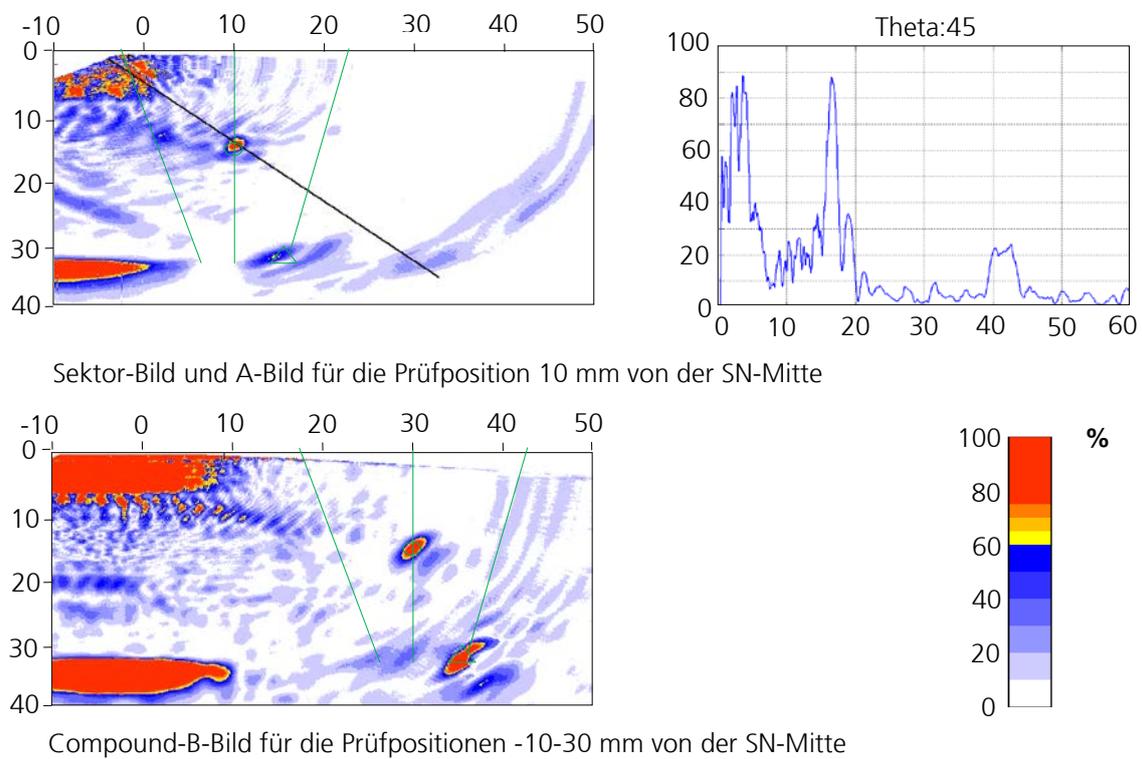
Die Ergebnisse der GECD-Methode (5 MHz PA-Prüfkopf von Fa. Olympus, quasilongitudinale Welle, Nominalbrechungswinkel im C-Stahl 60°) sind in der Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Ergebnisse des GECDM-Suchvorganges [GPa] am Testkörper UTT 1046

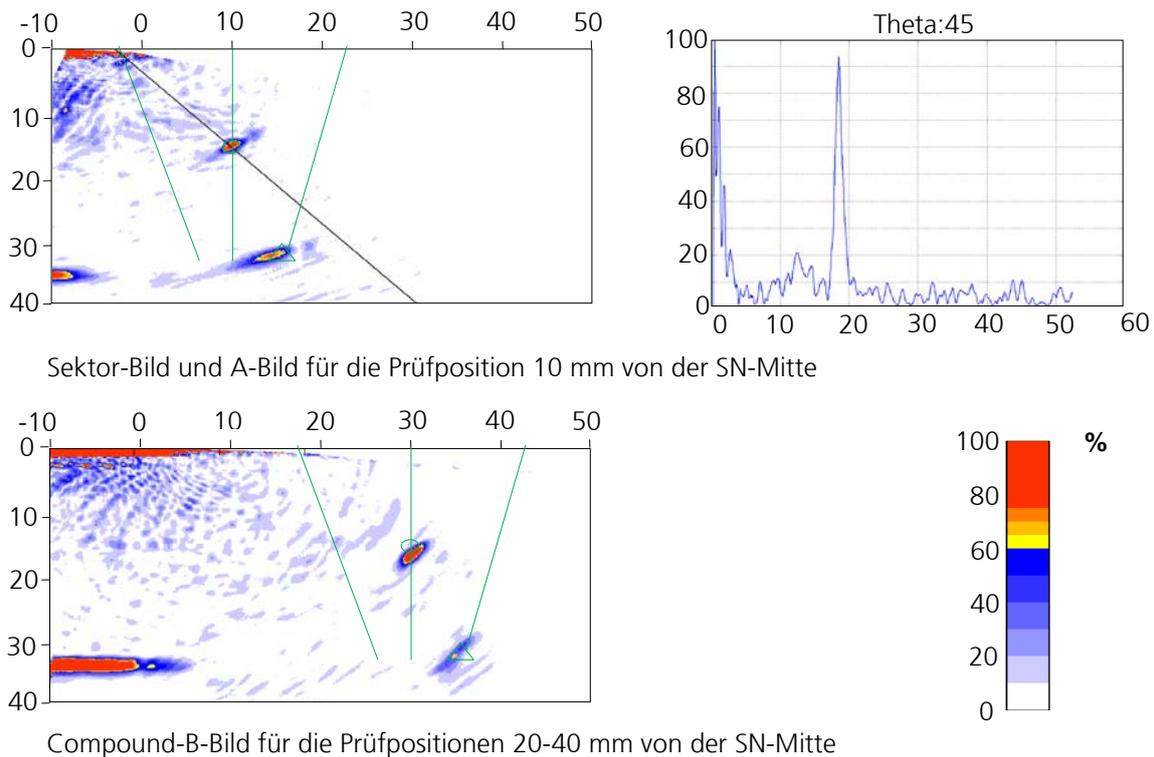
Elastische Konstante	Prüfposition 25 mm von der SN-Mitte		Prüfposition 35 mm von der SN-Mitte	
	Bohrung	Dreieck-Nut	Bohrung	Dreieck-Nut

C_{11}	318	320	312	316
C_{13}	122.5	120	125	127
C_{33}	167	163	168.5	170
C_{44}	105	108.5	108	102

Die Prüfergebnisse der SPA-Technik mit inverser Phasenanpassung werden in Abb. 73 und Abb. 74 dargestellt.



**Abb. 73: SPA-Prüfergebnisse vom Testkörper UTT 1046.
Prüfkopf: Sonaxis ME16-LMP4 3.5 MHz. Vorlaufkeil: Sonaxis LW60**



**Abb. 74: SPA-Prüfergebnisse vom Testkörper UTT 1046
Prüfkopf: Olympus 5L16-A3, 5.0 MHz. Vorlaufkeil: Olympus LW60**

Am Testkörpers UTT 1046 wurde gezeigt, dass die Ergebnisse von auf zwei unterschiedlichen Referenzreflektoren basierenden GECDM-Suchvorgängen miteinander korrelieren, unabhängig von der Position des Reflektors im Schweißgut. Die Berücksichtigung der angenommenen Inhomogenität und der ermittelten Werkstoffanisotropie gestattet die ortsgetreue Darstellung von allen nachweisbaren Materialungängen.

10.2.2 Prüfergebnisse an austenitischen Testkörpern mit künstlichen Fehlern

Die Testkörper aus der Bibliothek der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart sind aus austenitischen Werkstoffen 1.4948 (X 6CrNi1810) und 1.4401 (X5CrNiMo17-12-2) gefertigt und enthalten künstliche Fehler wie Zylinderbohrungen und Nuten.

In die Testkörper P1/50, P2/40, P3/30, P4/20 und P5/10 sind schräge Nuten mit drei verschiedenen Tiefen eingebracht, die durch gesamte Testkörperbreite durchgehen und deren Neigungswinkel entsprechend der Probestückbezeichnung 50°, 40°, 30°, 20° und 10° ist (Abb. 75). Die Testkörper enthalten keine Schweißnaht.

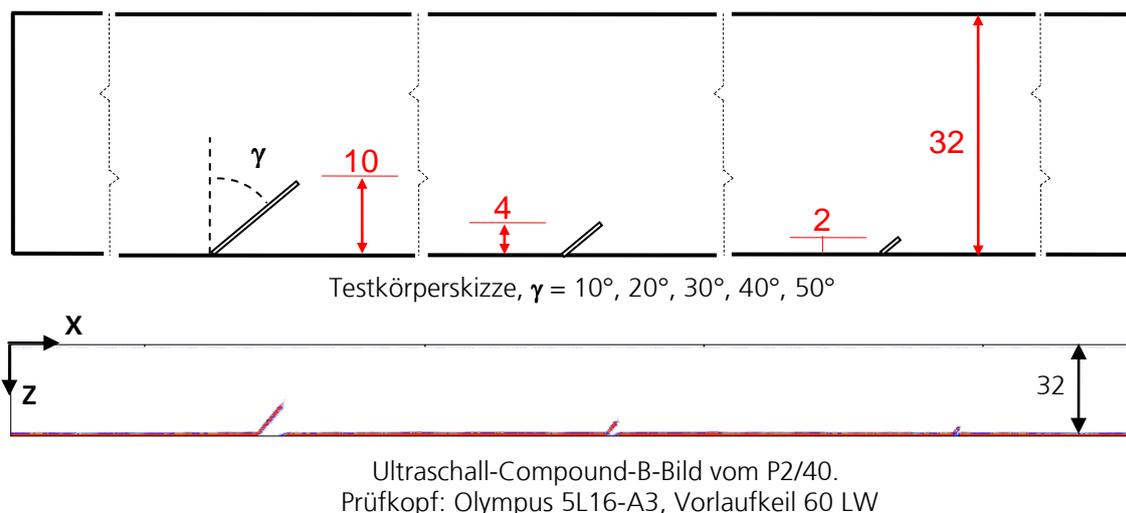


Abb. 75: Testkörper P1/50 – P5/10 und Beispielergebniss der SPA-Rekonstruktion

Die eingebrachten Nuten bilden ausgedehnte Fehler (Risse) unterschiedlicher Orientierung nach. Anhand der Testkörper P1/50 – P5/10 wurde die Fähigkeit und Genauigkeit der Sampling Phased Array-Prüftechnik gezeigt, solche Materialungängen form- und dimensionsgetreu zu rekonstruieren. Die detaillierten Ergebnisse der SPA-Untersuchungen sind in der Anlage 2 zu entnehmen.

Testkörper Nr. 5, 23 und 17/31 enthalten vertikale Nuten verschiedener Tiefe, die oberflächennah liegende Risse repräsentieren. Es ist keine Schweißnaht vorhanden.

In den Testkörper R33 sind Zylinderbohrungen an den drei verschiedenen Tiefen eingebracht – drei im Grundwerkstoff und drei in der Schweißnaht. Der Testkörper entspricht den Anforderungen von KTA 3201.3 zu dem Vergleichskörper bei Ultraschallprüfungen von Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren [1]. Anhand dieses Testkörpers wurde die Fähigkeit der SPA-Technik gezeigt, die Lage von volumenhaften Fehlern zu bestimmen.

Die SPA-Rekonstruktion von allen Testkörpern (außer R33) erfolgte unter Annahme von konstanter Schallgeschwindigkeit (siehe Tabelle 5). Für den Testkörper R33 wurde zusätzlich das Modell des Schweißnahtgefüges erstellt.

Die Ergebnisse der Sampling Phased Array-Untersuchungen sind in Tabelle 9 zusammengestellt. Detaillierte Compound-Bilder und Volumenbilder sind der Anlage 2 zu entnehmen.

Tabelle 9: Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen an den Testkörpern mit künstlichen Fehlern

Bez.	Abmessungen, mm	Vorhandener Fehler				Ergebnisse der US-Prüfung:	
		Pos	Beschreibung	Anordnung*	Ausdehnung, mm	Tiefenaus- dehnung, mm	Abweichung mm
P1/50	500×40×32	1	schräge Nut im Grundwerkstoff (50°)	u. Seite	2.0	2.6	0.6
		2	-----//-----		4.0	4.6	0.6
		3	-----//-----		10.0	10.2	0.2
P2/40	500×40×32	1	schräge Nut im Grundwerkstoff (40°)	u. Seite	2.0	3.0	1.0
		2	-----//-----		4.0	4.5	0.5
		3	-----//-----		10.0	10.0	0
P3/30	500×40×32	1	schräge Nut im Grundwerkstoff (30°)	u. Seite	2.0	2.4	0.4
		2	-----//-----		4.0	4.4	0.4
		3	-----//-----		10.0	10.3	0.3
P4/20	500×40×32	1	schräge Nut im Grundwerkstoff (20°)	u. Seite	2.0	2.2	0.2
		2	-----//-----		4.0	4.6	0.6
		3	-----//-----		10.0	10.4	0.4
P5/10	500×40×32	1	schräge Nut im Grundwerkstoff (10°)	u. Seite	2.0	2.1	0.1
		2	-----//-----		4.0	4.2	0.2
		3	-----//-----		10.0	10.0	0

R33	500×40×32	1	Bohrung Ø 3 mm im Schweißgut		8.0	8.1	0.1
		2	-----//-----		16.0	16.2	0.2
		3	-----//-----		24.0	24.1	0.1
		4	Bohrung Ø 3 mm im Grundwerkstoff	-	Tiefe: 8.0	Tiefe: 8.0	0
		5	-----//-----		16.0	16.0	0
		6	-----//-----		24.0	24.0	0
17/31	432×45×38	1	vertikale Nut im Grundwerkstoff	o. Seite	2.0	2.4	0.4
		2	-----//-----		10.0	10.4	0.4
5	400×40×32	1	vertikale Nut im Grundwerkstoff	u. Seite	2.0	2.1	0.1
		2	-----//-----		10.0	10.1	0.1
23	400×40×32	1	vertikale Nut im Grundwerkstoff	u. Seite	1.5	1.6	0.1
		2	-----//-----		3.0	3.2	0.2

* obere Seite – an der Skanfläche, untere Seite – an der Rückwandfläche (gegenüber der Skanfläche)

10.2.3 Prüfergebnisse an austenitischen Testkörpern mit realen Fehlern

Die Testkörper aus austenitischen Werkstoffen 1.4948 (X6CrNi1810) und 1.4401 (X5CrNiMo17-12-2) wurden aus der Bibliothek der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart ausgewählt. Sie besitzen Schweißnähte verschiedener Form (Engspaltnaht, X- und V-förmigen Breitspaltsschweißnähte). In den Schweißnähten und in der Wärme-Einfluss-Zone der Testkörper sind Schwing- und Spannungskorrosionsrisse vorhanden.

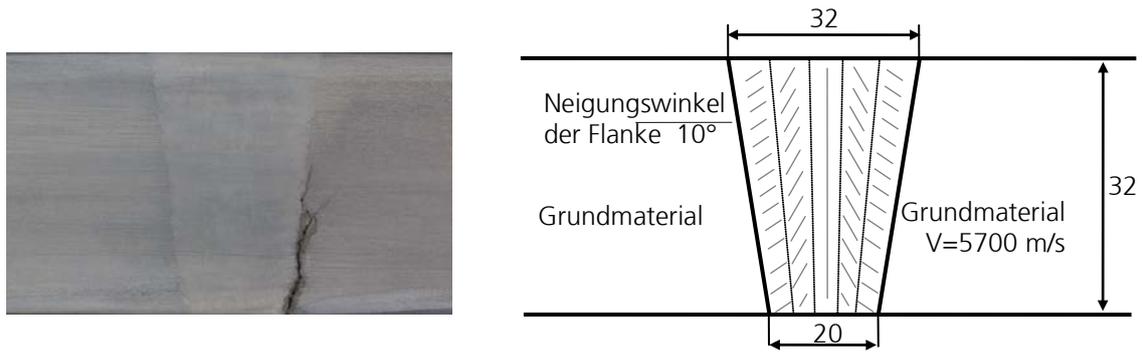
Das Ziel der SPA-Messungen an diesen Testkörpern war zu zeigen, dass man über die inverse Phasen Anpassung in der Lage ist, rissförmige Materialfehlern orts- und formgetreu darzustellen und die Fehlerausdehnung möglichst präzise zu bestimmen.

Für die Simulation der Schallausbreitung wurden anhand der Schlibfbilder die entsprechenden Modelle der Gefügestruktur erstellt. Da das dem GECDM-Algorithmus zugrunde liegend Prinzip auf einem bekannten punktförmigen Reflektor basiert (siehe Kapitel 8), kann diese Technik der iterativen Anpassung von elastischen Konstanten für die Testkörper mit Spannungskorrosionsrisse nicht angewendet werden. Als elastische Eigenschaften der Stängelkristalle wurde in diesem Fall die Steifigkeitsmatrix des austenitischen Werkstoffes 1.4301 (X5CrNi1810) verwendet.

Aus dem Vergleich der Schlibfbilder folgt, dass die Gefügestruktur an beiden Seiten der ausgewählten Testkörper ähnlich ist. Darüber hinaus wurde angenommen, dass die Anordnung der Stängelkristalle entlang der Naht als unveränderlich betrachtet werden kann. Andererseits variieren die vorhandenen Spannungskorrosionsrisse entlang der Schweißnaht sowohl in der Form als auch in der Ausdehnung. Als Folge kann sich die anhand der SPA-Rekonstruktion ermittelte Form und Ausdehnung der Risse von den Ergebnissen der Farbeindring-, Sicht- und Durchstrahlungsprüfungen unterscheiden: die ersten beiden sind Oberflächenverfahren, das Röntgen-Verfahren ergibt ein integrales Bild des Risses entlang der Testkörperbreite.

Bei den SPA-Untersuchungen an den erwähnten Testkörpern wurden sowohl die handüblichen Phased-Array-Prüfköpfe (Nennfrequenz 2.5, 3.5 und 5 MHz) als auch die ‚Sparse Arrays‘ (siehe Abschnitt 6.5) mit verbessertem Auflösungsvermögen eingesetzt.

In der Abb. 76 sind beispielhaft das Schlibfbild, das Nahtmodell und die Ultraschallergebnisse von dem Testkörper Nr. 9 dargestellt.



Orientierung der Stängelkristalle (v.l.n.r.): 60°, 47°, 23°, 12°, 0°, -12°, -23°, -47°, -60°

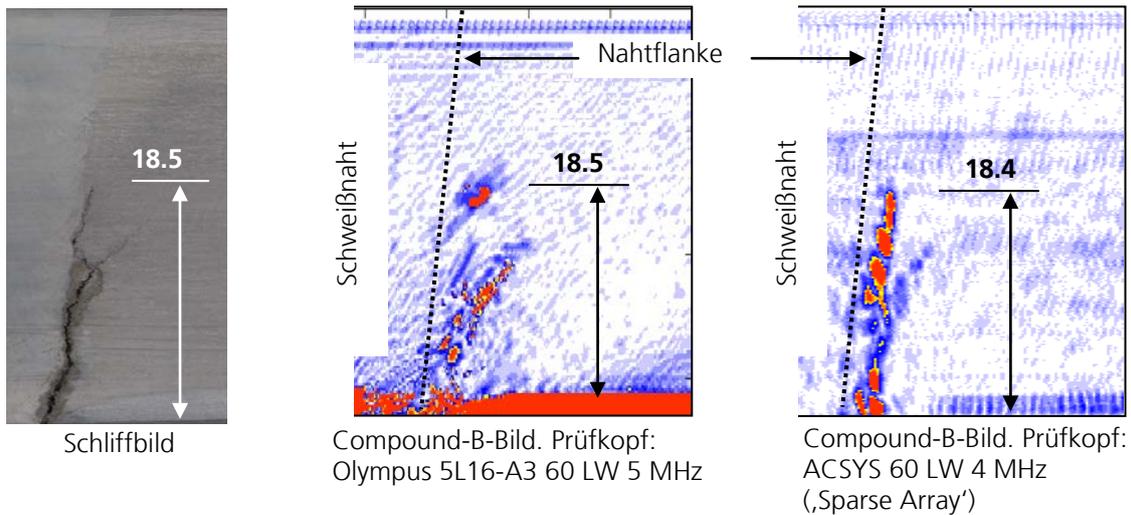


Abb. 76: Rekonstruierten SPA-Compound-B-Bilder vom Testkörper Nr. 9

Die Ergebnisse der Sampling Phased Array-Untersuchungen sind in Tabelle 10 zusammengestellt, die entsprechenden Compound-B-Bilder sind der Anlage 3 zu entnehmen.

Tabelle 10: Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen an den Testkörpern mit künstlichen Fehlern

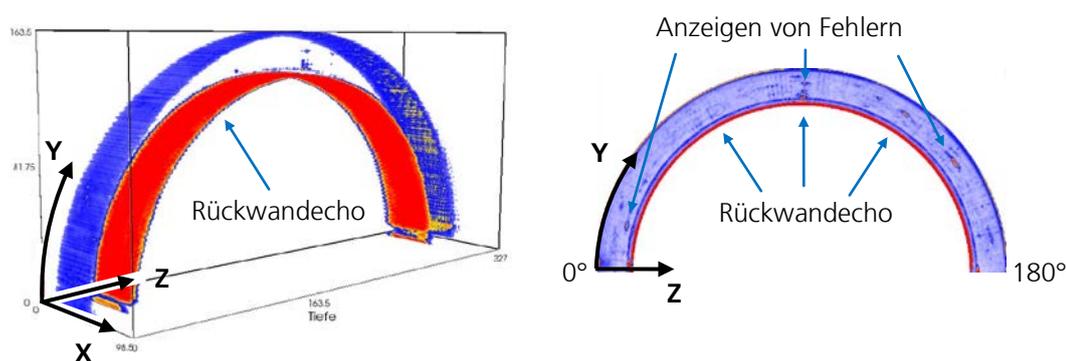
Bez.	Abmessungen, mm	Vorhandener Fehler		Ergebnisse der US-Prüfung:		
		Beschreibung	Anordnung*	ermittelte Tiefenausdehnung, mm US Schliff Farbeindringpr.		
6	400×40×32	Schwingriss in WEZ Schwingriss in Naht	obere Seite untere Seite	10.0	8,6	9,6
7	400×40×32	Schwingriss in WEZ / Naht	untere Seite	n. gefunden		
8	400×40×32	Spannungskorrosionsriss in WEZ	untere Seite	11.0	10,4	9,5
9	400×40×32	Spannungskorrosionsriss in WEZ	untere Seite	18.5	20,5	16,8
10	400×40×32	Spannungskorrosionsriss in WEZ	untere Seite	16.0	14,9	15,5
11	400×40×32	Spannungskorrosionsriss in WEZ	untere Seite	14.4	11,6	12,5
12	400×40×32	Spannungskorrosionsriss in WEZ	untere Seite	8.0	8,7	8,6
13	400×40×32	Spannungskorrosionsriss in WEZ	untere Seite	13.8	15,4	15,8
14	400×40×32	Spannungskorrosionsriss in WEZ	untere Seite	14.8	13,2	13,6

15	400×40×32	Spannungskorrosionsriss in WEZ	untere Seite	18.0	17,2	14,5
16	400×40×32	Spannungskorrosionsriss in WEZ	untere Seite	19.9	18,2	19,9
18	484×40×35	Schwingriss in Naht	obere Seite	9.2	6,6	3,7
19	484×40×35	Schwingriss in Naht	untere Seite	n. gefunden		
20	484×40×35	Spannungskorrosionsriss in Naht	obere Seite	5.7	4,1	4,6
		Spannungskorrosionsriss in Naht	untere Seite	8.5	7,4	7,8
32	400×42×32	Spannungskorrosionsriss in Naht	obere Seite	7.5	5,3	5,2
33	400×48×31	Spannungskorrosionsriss in Naht	untere Seite	7,0	5,6	----
34	400×48×31	Spannungskorrosionsriss in Naht	untere Seite	10.2	5,2	7,1 (nur durch Einschallung mit Umlenkung)

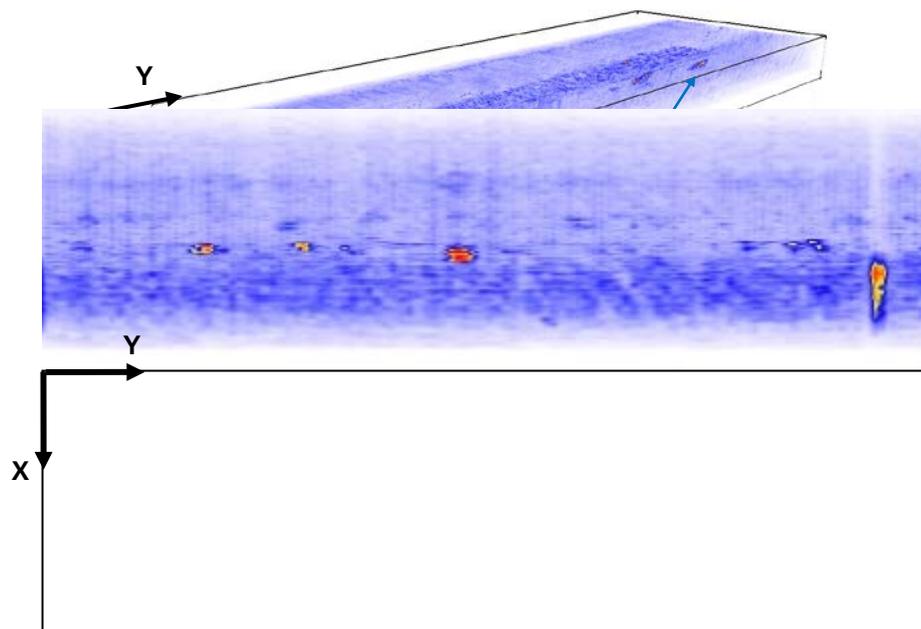
* obere Seite – an der Skanfläche, untere Seite – an der Rückwandfläche (gegenüber der Skanfläche)

10.2.4 Prüfergebnisse am Mischnaht-Testkörper

Infolge der großen Datenmenge konnten die Ultraschalldaten nicht in einem Messvorgang aufgenommen und gespeichert werden. Das Abtasten des Rohrtestkörpers erfolgte in zwei Messvorgängen: der erste Datensatz enthält die Messdaten von den Umfangspositionen von $Y=0$ bis $Y=0.5 \times Y_{\max}$ (0° - 180° in Zylinderkoordinaten) und der zweite – von den Positionen $Y=0.5 \times Y_{\max}$ bis $Y=Y_{\max}$ (180° - 360°). Hierbei ist Y die Index-Achse (Abb. 61 und Abb. 77) und Y_{\max} ist gleich dem Kreisumfang des Rohres.



Darstellung in tatsächlicher Rohrgeometrie: Volumen-Bild und Projektionsbild



C-Bild (von $Z=3$ mm bis $Z=27$ mm)

Abb. 77: Darstellung der Prüfergebnisse vom Rohrtestkörper in Form von zwei- und dreidimensionalen Bildern

Die Ergebnisse der Sampling Phased Array-Untersuchungen am Mischnaht-Rohr sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

Tabelle 11: Prüfergebnisse der SPA-Untersuchungen am Mischnahttestkörper

Anzeige-Nr.	X, mm	ΔX , mm	Y, mm	Y, °	ΔY^* , mm	Z, mm	ΔZ , mm
1	45	0	106	37	18	13	0
2	53	0	140	49	-	22	0
3	48	0	165	58	10	12	0
4	47	0	188	66	-	11	0
5	45	0	255	89	10	12.5	0
6	47	0	430	151	12	19	0
7	47	0	465	163	30	20	0
8	54	0	620	217	6	21	0
9	54	0	702	246	18	23	0
10	55	0	753	264	-	26.5	0
11	64.5	0	873	306	20	19.5	0
12	50	0	873	306	10	11.5	0
13	65	0	960	336	20	21.5	0

* „-“ bei ΔY bedeutet, dass die Anzeige nur in einem Prüfschnitt (bei einer Prüfspur) zu sehen ist.
Die Fehlerausdehnung entspricht in diesem Fall etwa dem Spurbstand (~2 mm)

10.3 Ergebnisse im Detail

10.3.1 Testkörper mit künstlichen Referenzfehlern

Die besten Ergebnisse wurden mit einem 5 MHz Array- Prüfkopf (L- Wellen, 16 Elemente, Keilwinkel 60°) erzielt. Die Testkörper aus austenitischen Grundmaterial waren alle mit 3 Nuten (Tiefe 10, 4, 2 mm; Schräglage 0°, 10°, 20° 30° 40° und 50°) versehen. Alle Nuten wurden mit dem Sampling-Phased-Array Verfahren sicher nachgewiesen und in ihrer Tiefen- und Schräglage korrekt in den B-Bildern rekonstruiert, Anlage 2 Abb. A2-1 bis A2-10; A2-13 bis A2-15. Auch die 3 Zylinderbohrungen im

Grundwerkstoff und in Schweißnahtmitte im Testkörper R 33 wurden exakt rekonstruiert.

10.3.2 Testkörper mit realitätsnahen Rissen

Die besten Ergebnisse wurden auch hier mit einem 5 MHz Array- Prüfkopf (L- Wellen, 16 Elemente, Keilwinkel 60°) erzielt.

Testkörper Nr. 6 (Abb. A3-1 – A3-3 im Anhang)

Es handelt sich um einen Schwingriss ausgehend von der Oberseite des Testkörpers (Ankoppelseite) neben der Schweißnaht in der Wärmeübergangszone. Im Schliffbild ist der Riss 8,6 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risttiefe mit 9,6 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risttiefe bei $y = 20$ mm mit 10,0 mm ermittelt. Der Riss zeigt sich als sehr glatt auf der Rissfläche, so dass nur die Rissspitze als Rekonstruktionspunkt erkennbar ist.

Testkörper Nr. 7 (Abb. A3-4 – A3-6 im Anhang)

Es handelt sich um einen Schwingriss ausgehend von der Unterseite des Testkörpers, der von der Wärmeübergangszone in das Schweißgut ragt. Im Schliffbild ist der Riss 12 mm tief. Mit der Sampling Phased Array Technik konnte dieser Riss nicht nachgewiesen werden.

Testkörper Nr. 8 (Abb. A3-7 – A3-9 im Anhang)

Es handelt sich um einen Korrosionsriss ausgehend von der Unterseite des Testkörpers: Der Riss verläuft entlang der Schweißnahtflanke und ist wenig verzweigt. Im Schliffbild ist der Riss 10,4 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risttiefe mit 9,5 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risttiefe bei $y = 20$ mm mit 11,0 mm ermittelt. Der Riss zeigt sich im Schliffbild etwas zerklüftet, so dass außer der Rissspitze auch einige Punkte auf der Fläche rekonstruiert wurden.

Testkörper Nr. 9 (Abb. A3-10 – A3-12 im Anhang)

Es handelt sich um einen Korrosionsriss ausgehend von der Unterseite des Testkörpers. Der Riss verläuft entlang der Schweißnahtflanke und zeigt an der Spitze eine y- förmige Verzweigung. Im Schliffbild ist der Riss 20,5 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risttiefe mit 16,8 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risttiefe bei $y = 20$ mm mit 18,5 mm ermittelt. Außer der Rissspitze wurden auch einige Punkte auf der Fläche rekonstruiert. Das in Richtung

Wärmeinflusszone verlaufende Ende des Risses ist in der Rekonstruktion deutlich zu erkennen.

Testkörper Nr. 10 (Abb. A3-13 – A3-15 im Anhang)

Es handelt sich um einen Korrosionsriss ausgehend von der Unterseite des Testkörpers. Der Riss verläuft entlang der Schweißnahtflanke und zeigt an der Spitze eine y- förmige Verzweigung. Im Schliffbild ist der Riss 14,9 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risstiefe mit 15,5 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risstiefe bei $y = 20$ mm mit 16,0 mm ermittelt. Außer der Risspitze werden auch einige Punkte auf der Fläche rekonstruiert. Das in Richtung Wärmeinflusszone verlaufende Ende des Risses ist in der Rekonstruktion deutlich zu erkennen.

Testkörper Nr. 11 (Abb. A3-16 – A3-18 im Anhang)

Es handelt sich um einen Korrosionsriss ausgehend von der Unterseite des Testkörpers. Der Riss verläuft entlang der Schweißnahtflanke und zeigt an der Spitze eine y- förmige Verzweigung. Im Schliffbild ist der Riss 11,6 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risstiefe mit 12,5 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risstiefe bei $y = 20$ mm mit 14,4 mm ermittelt. Außer der Risspitze wurden auch einige Punkte auf der Fläche rekonstruiert. Das in Richtung Wärmeinflusszone verlaufende Ende des Risses ist in der Rekonstruktion deutlich zu erkennen.

Testkörper Nr. 12 (Abb. A3-19 – A3-21 im Anhang)

Es handelt sich um zwei Korrosionsrisse ausgehend von der Unterseite des Testkörpers. Ein Riss verläuft entlang der Schweißnahtflanke. Der zweite Riss verläuft in der Wärmeinflusszone und ist leicht geneigt. Im Schliffbild ist der erste Riss 8,7 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risstiefe mit 8,6 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risstiefe bei $y = 20$ mm mit 8,0 mm ermittelt.

Der zweite Riss erscheint in der Sampling Phased Array Rekonstruktion auch, allerdings mit einer geringeren Amplitude der Rekonstruktionspunkte. Dieser Riss wurde jedoch durch den ersten Riss abgeschattet, so dass das Ergebnis nicht repräsentativ ist.

Testkörper Nr. 13 (Abb. A3-22 – A3-24 im Anhang)

Es handelt sich um einen Korrosionsriss ausgehend von der Unterseite des Testkörpers. Der Riss verläuft entlang der Schweißnahtflanke in der Wärmeinflusszone und zeigt an

der Spitze eine y- förmige Verzweigung. Im Schliffbild ist der Riss 15,4 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risstiefe mit 15,8 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risstiefe bei $y = 20$ mm mit 13,8 mm ermittelt. Die Rekonstruktion zeigt die Rissverzweigung sehr deutlich an.

Testkörper Nr. 14 (Abb. A3-25 – A3-27 im Anhang)

Es handelt sich um zwei Korrosionsrisse ausgehend von der Unterseite des Testkörpers. Ein Riss verläuft entlang der Schweißnahtflanke. Der zweite Riss verläuft in der Wärmeinflusszone und ist etwas tiefer. Im Schliffbild ist der größere Riss 13,2 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risstiefe mit 13,6 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risstiefe bei $y = 20$ mm mit 14,8 mm ermittelt. Die Sampling Phased Array Rekonstruktion zeigt an der Risspitze eine Verzweigung. Dass es sich um zwei Risse handelt ist jedoch nicht zu erkennen, da sich die beiden Risse für den Ultraschall gegenseitig abschatten.

Testkörper Nr. 15 (Abb. A3-28 – A3-30 im Anhang)

Es handelt sich um einen Korrosionsriss ausgehend von der Unterseite des Testkörpers. Der Riss verläuft entlang der Schweißnahtflanke und ist an der Spitze y-förmig verzweigt. Im Schliffbild ist der Riss 17,2 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risstiefe mit 14,5 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risstiefe bei $y = 20$ mm mit 18,0 mm ermittelt. Die Verzweigung ist in der Rekonstruktion deutlich zu erkennen.

Testkörper Nr. 16 (Abb. A3-31 – A3-33 im Anhang)

Es handelt sich um einen Korrosionsriss ausgehend von der Unterseite des Testkörpers. Der Riss verläuft entlang der Schweißnahtflanke in der Wärmeinflusszone und ist stark verzweigt. Im Schliffbild ist der Riss 18,2 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risstiefe mit 19,9 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risstiefe bei $y = 20$ mm mit 19,9 mm ermittelt. In der Sampling Phased Array Rekonstruktion ist die y-förmige Verzweigung deutlich zu erkennen.

Testkörper Nr. 18 (Abb. A3-34 – A3-36 im Anhang)

Es handelt sich um einen Schwingriss ausgehend von der Oberseite des Testkörpers. Der Riss verläuft senkrecht zur Oberfläche in der Mitte der Schweißnaht. Im Schliffbild ist der Riss 6,6 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risstiefe mit 3,7 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling-Phased-Array- Technik wurde die Risstiefe bei $y = 20$ mm mit 9.2 mm ermittelt.

Testkörper Nr. 19 (Abb. A3-37 – A3-39 im Anhang)

Es handelt sich um einen Schwingriss ausgehend von der Unterseite des Testkörpers. Der Riss verläuft senkrecht zur Oberfläche in der Mitte der Schweißnaht. Der Riss wurde nicht gefunden.

Testkörper Nr. 20 (Abb. A3-40 – A3-42 im Anhang)

Es handelt sich um zwei Korrosionsrisse ausgehend von der Unterseite und von der Oberseite des Testkörpers. Beide Risse verlaufen entlang der Schweißnahtflanke in der Wärmeinflusszone und sind y-förmig verzweigt. Im Schlibfbild ist der obere Riss 4,0 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risstiefe mit 4,6 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risstiefe bei $y = 20$ mm mit 5,7 mm ermittelt. Im Schlibfbild ist der untere Riss 7,4 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risstiefe mit 7,8 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risstiefe bei $y = 20$ mm mit 8,5 mm ermittelt. Die Sampling-Phased-Array Rekonstruktion zeigt für den unteren Riss an der Risspitze eine Verzweigung.

Testkörper Nr. 32 (Abb. A3-43 – A3-45 im Anhang)

Es handelt sich um einen Schwingriss ausgehend von der Oberseite des Testkörpers. Der Riss verläuft senkrecht zur Oberfläche in der Mitte der Schweißnaht. Im Schlibfbild ist der Riss 5,3 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde die Risstiefe mit 5,2 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risstiefe bei $y = 20$ mm mit 7,5 mm ermittelt.

Testkörper Nr. 33 (Abb. A3-46 – A3-48 im Anhang)

Es handelt sich um einen Schwingriss ausgehend von der Unterseite des Testkörpers. Der Riss verläuft senkrecht zur Oberfläche. Im Schlibfbild ist der Riss 7,9 mm tief. Mit der Farbeindringprüfung wurde der Riss nicht erkannt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risstiefe bei $y = 20$ mm mit 5,6 mm ermittelt. In einer Tiefe von ca. 8 mm findet man im Schlibfbild einen natürlichen Riss in der Wärmeinflusszone. Dieser Riss wurde mit der Sampling Phased Array Technik mit einer Tiefe von 7,0 mm rekonstruiert.

Testkörper Nr. 34 (Abb. A3-49 – A3-51 im Anhang)

Es handelt sich um einen Schwingriss ausgehend von der Unterseite des Testkörpers. Der Riss verläuft senkrecht zur Oberfläche. Im Schlibfbild ist der Riss 5,2 mm tief. Mit der

Farbeindringprüfung wurde die Risttiefe mit 7,1 mm ermittelt. Bei der Auswertung mit der Sampling Phased Array- Technik wurde die Risttiefe bei $y = 20$ mm mit 10,2 mm ermittelt.

10.4 Vergleich: Sampling Phased Array Technik und Standardverfahren.

Als Standardverfahren wurde zunächst bei der MPA- Stuttgart die Impulsechoprüfung mit 45° Einschallwinkel und einer üblichen Frequenz von 1 MHz T- Welle geprüft. Die Abb. 78 zeigt das Ergebnis im Vergleich zur Sampling Phased Array-Technik. Mit der Standardtechnik konnte der Riss zwar nachgewiesen werden, die Schräglage und die Verzweigung an der Risspitze sind jedoch nicht wiedergegeben.

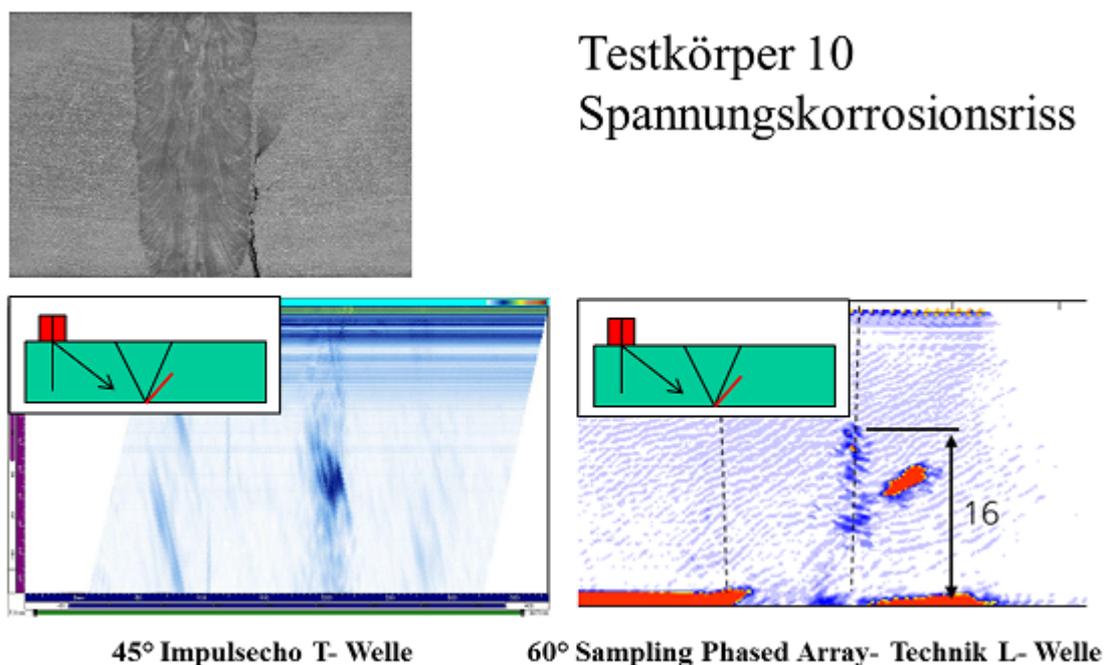


Abb. 78: Vergleich der Standardtechnik (links) mit der Sampling Phased Array- Technik (rechts)

10.5 Zusammenfassung der Einzelergebnisse:

- 1) Die Schwing- und Korrosionsrisse hatten im Schliffbild eine Tiefenausdehnung von 3- 20 mm.
- 2) Mit Ausnahme von 2 Schwingrissen die von der Unterseite ausgingen (3mm und 12 mm tief) konnten alle weiteren 16 Risse nachgewiesen und in ihrer Tiefenausdehnung bestimmt werden. Zusätzlich ist in den Rekonstruktionen die Rissorientierung und die Verzweigung zu erkennen.

- 3) Die Schliffbilder vom jeweiligen Schweißnahtende zeigten in 11 Fällen eine größere Risttiefe als die Auswertung der Farbeindringprüfung. In 4 Fällen zeigte die Farbeindringprüfung eine größere Risttiefe an. In einem Fall (Testkörper 33) zeigte die Farbeindringprüfung keinen Riss an.
- 4) Vergleicht man die Ergebnisse der Schliffbilder mit den Sampling Phased Array Rekonstruktionen werden 12 Risse um 5- 30 % überschätzt (mit Ausnahme eines Ausreißers bei dem die Überschätzung bei 48 % lag) und 4 Risse um 10-12 % unterschätzt, Abb. 79.
- 5) Ein Grund für die Überschätzung liegt vermutlich in der Tatsache, dass die max. Risttiefe beim Sampling Phased Array aus der Prüfspur über die Mitte der Testkörperbreite gewonnen wurde, die Schliffe jedoch die Tiefe an den Rändern zeigen. Da die teuer hergestellten Testkörper nicht in der jeweiligen Mitte für weitere Schliffbilder aufgeschnitten werden sollten, ist ein verbesserter Vergleich z.Z. nicht möglich.

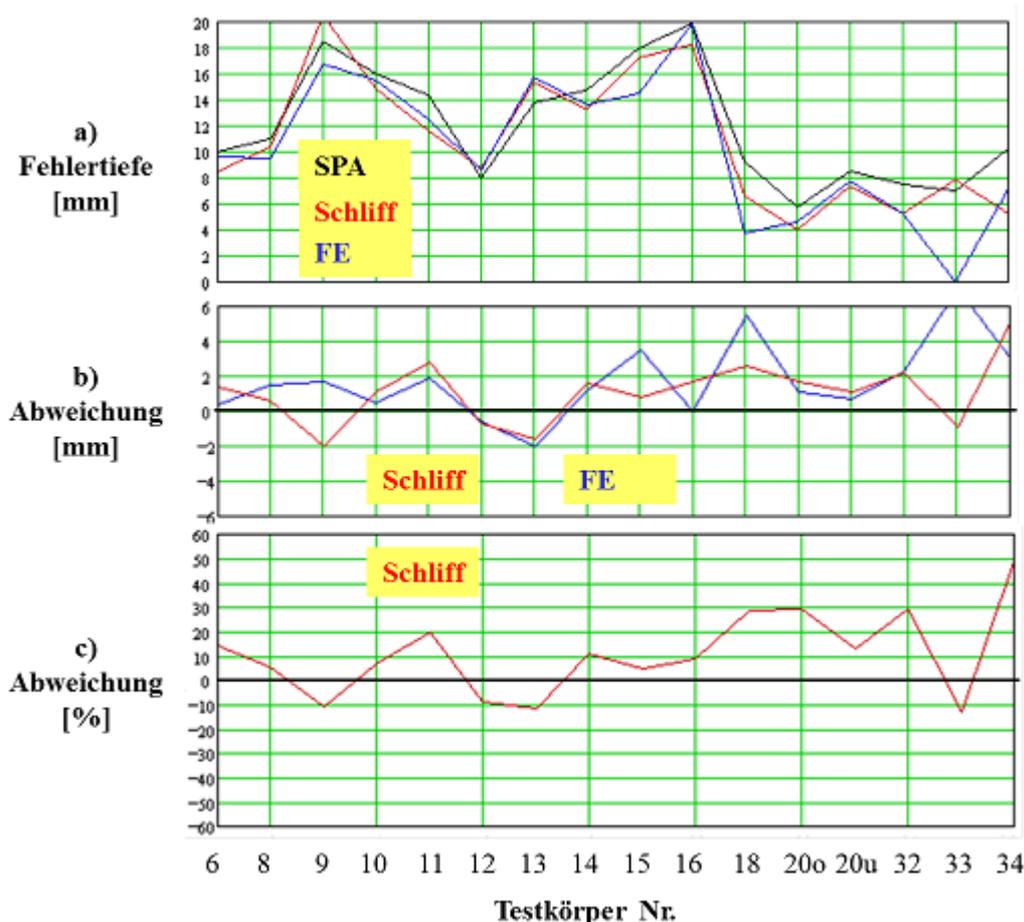


Abb. 79: a) Verteilung der Risttiefen nach der Sampling Phased Array- Technik und Werten aus Schliffbildern und der Farbeindringprüfung. b) Abweichungen in mm. c) Abweichung in %

11. Ergebnisse des Forschungsvorhabens: Zusammenfassung und Ausblick

Austenitische Werkstoffe finden ihre breite Anwendung u. a. in Primärkreis Komponenten von kerntechnischen Anlagen. Allerdings können hohe prüftechnische Anforderungen wie sie für ferritische Primärkreis Komponenten bestehen für austenitische und Mischnähte im Rahmen der qualitätssichernden Maßnahmen nur bedingt erreicht werden. Die eingeschränkte Prüfbarkeit der austenitischen Schweißnähte wird vor allem durch die Materialanisotropie verursacht. Viele nationale und internationale F&E-Projekte zu diesem Thema trugen zwar zum Verständnis der Schallausbreitungsphänomene bei, boten aber keine Ansätze für die Verbesserung der Prüftechnik in der Praxis.

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde anhand von künstlichen Testreflektoren und einer Vielzahl von quasirealen Schweißnahtfehler (Schwingrisse, Spannungskorrosionsrisse) gezeigt, dass durch den Einsatz der neuartigen Sampling Phased Array-Technik das Verständnis der Wellenausbreitung in anisotropen Medien bei der Rekonstruktion der Ultraschall-Ergebnisbilder berücksichtigt werden kann. Dies erfolgt durch den Einsatz der Technik der inversen Phasen Anpassung, die anhand der Simulationsdaten eine ortstreue Darstellung der Materialungängen im Schweißgut ermöglicht. Als Grundlage für die Simulation der Schallausbreitung dienen Angaben über die Schweißnahtstruktur und ihre elastischen Eigenschaften.

Da diese in der Regel nicht bekannt sind, wurde im Rahmen des Projektes die „Gradient Elastic Constant Descent“-Methode (GECDM) entwickelt, die anhand eines bekannten Reflektors in einer Schweißprobe die Ermittlung der elastischen Konstanten im Schweißgut, und eine Fehlerbildrekonstruktion hinsichtlich Risstiefenlage, Rissorientierung und Rissverzweigung ermöglicht.

Durch den Aufbau einer synthetischen Apertur bei der Abtastung des Prüfvolumens und Datenerfassung nach dem Sampling Phased Array-Prinzip mit inverser Phasen Anpassung gelingt eine tomografische Rekonstruktion der Schweißnaht mit zweidimensionaler Darstellung der Prüfergebnisse, die eine quantitative Auswertung der Fehler nach Lage, Größe, Orientierung und Verzweigung ermöglichen. Dies erfolgt unter dem Einsatz nur eines Sensortyps – eines linearen Phased Array Wandlers- der im Gegensatz zur Verwendung von Mehrkopfsystemen eine wesentliche Vereinfachung des Prüfvorganges

bei erhöhter Prüfsicherheit bedeutet. Entsprechende Prüfstrategien zur Anwendung des Prüfverfahrens im Rahmen der Ultraschallprüfung von kerntechnischen Anlagen wurden vorgeschlagen.

Damit können die Projektziele,

- Kombination von Fehlernachweis und Fehleranalyse bei der Ultraschall-Prüfung für Schweißnähte im Primärkreis in einem Prüfvorgang
- Quantitative Aussagen zu Fehlergröße,- Art,- Lage

als erfüllt betrachtet werden. Ob eine Reduzierung der Strahlenbelastung des Prüfpersonals durch eine schnellere Prüfung erreicht werden kann, müssen weitere Untersuchungen an realen Rohrschweißnähten zeigen.

Ausblick

Die generelle Tauglichkeit der Sampling Phased Array-Technik für eine verbesserte Ultraschall-Prüfung von austenitischen- und Mischschweißnähten, insbesondere wenn nur eine einseitige Zugänglichkeit der Schweißnähte gegeben ist, und zwingend durch das stängelige Gefüge geprüft werden muss, wurde nachgewiesen.

Zur Nutzung dieser neuen Technik sind erforderlich:

- Ein handelsüblicher Phased Array- Prüfkopf (auch mit Gruppenstrahler bezeichnet)
- Ein Phased Array- Gerät, das den Phased Array- Prüfkopf als „getakteten Gruppenstrahler“ betreiben kann
- Das Ray- Tracing Software Tool
- Die GECDM- Software
- Die Sampling Phased Array Rekonstruktions- Software
- Ein handelsüblicher Manipulator

Notwendige Weiterentwicklungen

Insbesondere für die Prüfung von Primärkreis Komponenten von KKW- Altanlagen stehen in der Regel keine Schweißproben zur Kalibrierung der Sampling Phased Array- Technik

nach dem GECDM Algorithmus zur Verfügung. Hier muss die Kalibrierung direkt an der zu prüfenden Komponente vorgenommen werden. Eine Realisierung könnte über eine Durchschallung der Schweißnaht mit zwei Phased Array- Prüfköpfen erfolgen, wobei als Zielgröße die maximale Echoamplitude am Empfangs- Array- Prüfkopf genutzt wird. Da alle Messungen im Wesentlichen an ebenen Testkörpern erfolgten ist die Technik an realen Rohrschweißnähten weiter zu erproben und zu validieren.

Literaturverzeichnis

- [1] KTA 3201.3, Fassung 11/07: Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren. Teil 3: Herstellung.
KTA 3201.4, Fassung 2010-11: Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren. Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung
- [2] ASME- BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, Section XI: Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, 1992
- [3] Schmid R.: Problemorientierte Prüfkonzepte für austenitische Schweiß- und Mischverbindungen. In: Kapitel 4, Ultraschallprüfungen von austenitischen Plattierungen, Mischnähten und austenitischen Schweißnähten. Kontakt & Studium Werkstoffe, Band 377, Expert Verlag, Düsseldorf 1995
- [4] Pellkofer D.; Engelhard G.; Förster S.: Vorteile des WIG- Engspaltschweißens. Fortschrittsberichte der Jahrestagung Kerntechnik., München 1985
- [5] Aiguire D.; Champigny F.: Bimetallic Welds Examination: A Review of French Practices. 14th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, Stockholm 1996
- [6] Ammirato F. V.; Edelmann X., Walker S. M.: Examination of Dissimilar Metal Welds in BWR Nozzle- to-safe- End Joints. 8th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, Florida 1986
- [7] Walker S. M.; Findlan S. J.; Phillips M. K.; Williams Jr, R. W.: Effects of IGSCC Remedies on NDE of Dissimilar Metal Joints. 11th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries. Albuquerque / New Mexico 1992
- [8] Pers-Anderson E. B.: Detection and repair of a crack in a BWR Feed Water Nozzle Safe end Weld. 10th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, Glasgow 1990
- [9] Bundesrepublik Deutschland: Verordnung über den kerntechnischen Sicherheitsbeauftragten und über die Meldung von Störfällen und sonstigen Ereignissen, Atomrechtliche Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung – AtSMV. 14. Oktober 1992

- [10] Reck H., Jendrich U., Schulz H.: Ausgewählte Ereignisse mit druckführenden Komponenten in Kernkraftwerken. Vorgehensweise der GRS. 29. MPA- Seminar, Stuttgart 2003
- [11] Boehm R., Hauser T., Le Gal P., Rotter B., Bleck A., Hesselmann W.: Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in austenitischen Plattierungen; Aspekte zur anisotropen Schallausbreitung. Fortschr.-Ber. der Jahrestagung 1992 der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP), Fulda, 33.2, 1992
- [12] Neumann E., Hirsekorn S., Hübschen G., Just T., Schmid R.: Ultraschallprüfung von austenitischen Plattierungen, Mischnähten und austenitischen Schweißnähten; Theorie – Praxis - Regelwerke. Expert Verlag. Renningen-Malmsheim 1995. S. 198-207.
- [13] DIN EN 1330-4, Zerstörungsfreie Prüfung - Terminologie - Teil 4: Begriffe der Ultraschallprüfung.
- [14] (ISO/DIS 10863:2009), Schweißverbindungen – Anwendung der Beugungslaufzeittechnik (TOFD) für die Prüfung von Schweißverbindungen
- [15] DIN EN 583-6:2009-03: Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Teil 6: Beugungslaufzeittechnik, eine Technik zum Auffinden und Ausmessen von Inhomogenitäten; Deutsche Fassung EN 583-6:2008
- [16] Schmitz V., Müller M., Langenberg K. J., Shlivinski A., Marklein R., Mletzko U.: Ultraschallanalyseprüfung im Bereich von Mischschweißverbindungen und Plattierungen bei komplexen Bauteilgeometrien unter spezieller Berücksichtigung der Anisotropie. Abschlussbericht Reaktorsicherheitsforschungs- Vorhaben Nr. 1501268, Berichts Nr. 050201-TW
- [17] Aiguire / Champigny: 14th Int. Conference on NDT in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, Stockholm 1996
- [18] Ammirato / Edelmann: 8th Int. Conference on NDT in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, Florida 1986
- [19] Walker / Findlan: 11th Int. Conference on NDT in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, New Mexico, 1992
- [20] Pers- Anderson: 10th Int. Conference on NDT in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, Glasgow, 1990
- [21] Reck / Jendrich / Schulz: 29. MPA- Seminar, Stuttgart 2003

- [22] Bulavinov A.: Der getaktete Gruppenstrahler. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken 2005.
- [23] Kröning M., Hentschel D., von Bernus L., Bulavinov A., Reddy K. M.: Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines Prüfkörpers mittels Ultraschall, Deutsches Patent Nr. DE 10 2004 059 856 B4 2006.09.14
- [24] Kröning M., Bulavinov A., Reddy K. M., von Bernus L.: Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines Prüfkörpers mittels Ultraschall, Deutsches Patent Nr. DE 10 2005 051 781 A1 2007.05.03
- [25] Schurig C., Walte F., Langenberg K.J. u. a.: „Untersuchungen zum Leistungsstand moderner Ultraschall-Prüfverfahren, zum Fehlernachweis und Größenbestimmung für bestehende und hinsichtlich Prüfbarkeit optimierte austenitische Schweißnähte im Primärkreis von KKW“. Abschluss Bericht. BMBF-RS 1500931, IZFP (1995), Berichts Nr. 950168-TW, Austenit I -Projekt.
- [26] Schurig C., Walte F., Köhler B. u. a.: „Modellbasierte Bewertung realer Ultraschall-Prüfsignale zur Optimierung von Prüfparametern für die Ultraschallprüfung fehlerbehafteter Schweißnähte in austenitischen Bauteilen des Primärkreislaufes von KKW“. Abschluss Bericht. BMBF-RS 1501024, IZFP (2001), Berichts Nr. 010324-TW, Austenit II -Projekt.
- [27] Köhler B., Schmitz V., Spies M., Zimmer A.: „Verifikation der in den Projekten Austenit I und Austenit II entwickelten Methoden zur Verbesserung der realen Ultraschallprüfung austenitischer Schweißnähte durch ihre Anwendung auf eine reale Schweißnaht mit einem Fehler“. Abschluss Bericht. BMBF-RS 1501231, IZFP (2004), Berichts Nr. 040118-TW, Austenit III- Projekt.
- [28] Brast G., Britz A., Feil H., Maier H.-J., Knoch P., Mletzko U.: Zwischenbericht über einen ZfP- Ringversuch an austenitischen Rohrleitungs-Rundschweißnähten. Berichtsband, 22. MPA- Seminar. Stuttgart, 1996
- [29] Brast G., Maier H.-J., Knoch P., Mletzko U.: Fortschrittsbericht über einen ZfP- Ringversuch an austenitischen Rohrleitungs-Rundschweißnähten. Berichtsband, 23. MPA- Seminar. Stuttgart, 1997
- [30] Hesselmann W., Maier H.-J., Knoch P., Mletzko U.: ZfP- Ringversuch an austenitischen Rohrleitungs-Rundschweißnähten (Statusbericht). Berichtsband, 21. MPA- Seminar. Stuttgart, 1995

- [31] Hesselmann W., Maier H.-J., Knoch P., Mletzko U.: Statusbericht zu einem ZfP-Ringversuch an austenitischen Rohrleitungs-Rundschweißnähten. Berichtsband, VGB-Konferenz "Werkstoffe und Schweißtechnik im Kraftwerk 1996". Cottbus, 1996
- [32] Mc Hugh J., Döring J., Stark W., Erhard A.: Characterization of epoxy materials used in the development of ultrasound arrays. Tagungsband: 16th World Conference on Nondestructive Testing, August 30 - September 3, 2004, Montreal, Canada (Proceedings-CD-ROM), 2004, 8 pages
- [33] Hübschen G., Salzburger H.-J.: Erweiterung der prüftechnischen Grundlagen der Ultraschallprüfung mit EMUS- SH- Wellen für den praxisingerechten Einsatz an Misch- und austenitischen Schweißnähten. VGB- IZFP, 1996, Berichts Nr. 960157-TW
- [34] Müller W.: Ultrasonic Testing of Austenitic Welds. Where do we actually stand? Modelling of the Wave propagation: Task 23, 24, 27, 28. IZFP Saarbrücken Nr. 990338- E, 1999
- [35] Müller W., Paul H.: Ultraschallanalyseprüfungen an einer Mischschweißnaht und einer austenitischen Schweißnaht am Großbehälter der MPA. Ergebnisbericht, BMWA-Vorhaben 150 1268. IZFP Saarbrücken, 2004
- [36] Müller W., Schmitz V., Mletzko U.: Interpretation von Messdaten mit SAFT an Austenit- und Mischnähten. Berichtsband, 30. MPA- Seminar / 9. Deutsch-Japanisches Seminar. Stuttgart, 2004
- [37] Munikoti V., Brekow G., Tessaro U., Erhard A.: Ultrasonic testing for transverse discontinuities in dissimilar welds: theoretical and experimental results. Materials Evaluation, Vol.62, 2004, Nr.11, S.1148-1152
- [38] Neundorf B., Maier H.-J., Mletzko U., Just T.: Results of a Round Robin Test on NDT Methods for Austenitic Pipe Welds in Nuclear Power Plants. Proceedings, Second International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. New Orleans, Louisiana, USA, 2002
- [39] Neundorf B., Maier H.-J., Mletzko U., Just T.: Results of a Round Robin Test on NDT Methods for Austenitic Pipe Welds. VGB PowerTech / VGB Kraftwerkstechnik 82 (2002), Nr. 2, S. 78-80. Essen, 2002
- [40] Rockstroh B., Jager W., Weiss R.: Ergebnisse der Ultraschallprüfung an den HUL- Proben B2, B3 und B4 bei der Basisprüfung. BMFT/GRS 1500931, IZFP Saarbrücken Nr. QS9558, 1995

- [41] Waidele H.: Zerstörungsfreie Prüfung von Plattierungen., 5. Technischer Bericht zum BMU Vorhaben SR 2024 „Erarbeitung von Unterlagen im Hinblick auf die Ergänzung und Weiterentwicklung des kerntechnischen Regelwerkes“, MPA Stuttgart, 1994
- [42] Waidele H.: Orientierende Untersuchungen an einer austenitischen Engspaltschweißnaht. Technischer Bericht 1.4 zum BMU Vorhaben SR 2065 „Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken“, MPA Stuttgart, 1995
- [43] Waidele H.: Zerstörungsfreie Prüfung von austenitischen Schweißnähten und Plattierungen. 3. Technischer Bericht zum BMU Vorhaben SR 2228 „Erarbeitung von Unterlagen im Hinblick auf die Ergänzung und Weiterentwicklung des kerntechnischen Regelwerkes“, MPA Stuttgart, 1997
- [44] Waidele H.: Zerstörungsfreie Prüfung von Kerneinbauten, austenitischen Schweißnähten und Plattierungen. 4. Technischer Bericht zum BMU Vorhaben SR 2291 „Erarbeitung von Unterlagen im Hinblick auf die Ergänzung und Weiterentwicklung des kerntechnischen Regelwerkes“, MPA Stuttgart, 2000
- [45] Waidele H., Knoch P.: Bewertung der Aussagefähigkeit von Ultraschall- und Wirbelstromprüfung austenitischer Plattierungen von Reaktordruckbehältern. BMU-Vorhaben SR 2318, 1. Technischer Bericht MPA Stuttgart (2000), 2. Technischer Bericht MPA Stuttgart, 2003
- [46] Waidele H.: Zerstörungsfreie Prüfung von Mischnähten, austenitischen Schweißnähten, Plattierungen und Kerneinbauten. 4. Technischer Bericht zum BMU Vorhaben SR 2426 „Auswertung des nationalen und internationalen Kenntnisstandes zu sicherheitsrelevanten Aspekten im Hinblick auf die Weiterentwicklung des kerntechnische Regelwerks für mechanische Komponenten“, MPA Stuttgart, 2004
- [47] Waidele H., Knoch P., Gersinska R., Brenner W., Seidenkranz T., Csapo G., Just T., Weiß R., Rathgeb W.: Nachweis von Plattierungsfehlern mit Ultraschall- und Wirbelstromverfahren. 30. MPA- Seminar, Stuttgart, 2004
- [48] Boehm R., Hauser T., Le Gal P., Rotter B., Bleck A., Hesselmann W.: Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in austenitischen Plattierungen; Aspekte zur anisotropen Schallausbreitung. DGZfP Jahrestagung 1992, Berichtsband 33.2, S. 627-637

- [49] Müller W., Walte F.: Ultraschallprüfung an Schweißnähten austenitischer Rohrleitungssysteme, Fortbildungsseminar: Weiterbildung für Praktiker, IZFP Saarbrücken, 1993
- [50] Müller W.: Ultrasonic Testing of Austenitic Welds. Where do we actually stand? Modelling of the Wave propagation: Task 23, 24, 27, 28. IZFP Saarbrücken Nr. 990338- E, 1999
- [51] Munikoti V., Brekow G., Tessaro U., Erhard A.: Ultrasonic testing for transverse discontinuities in dissimilar welds: theoretical and experimental results. Materials Evaluation, Vol.62, 2004, Nr.11, S.1148-1152
- [52] Vijayendra M., Neumann E., Boehm R.: Über die Polarisierung der Ultraschallwellen bei der Ultraschallprüfung von akustisch anisotropen Werkstoffen mit Textur. DGZfP Jahrestagung 1993, Berichtsband 37.1, S. 225-240
- [53] Vijayendra M., Schmid R., Matthies K., Neumann E.: Über die Veränderung der Ultraschallwellen in akustisch anisotropen Werkstoffen und über Konsequenzen für die Prüfung, dargestellt am Beispiel der austenitisch-ferritischen Mischverbindungen. 3. Kolloquium der DGZfP ‚Qualitätssicherung durch Werkstoffprüfung‘, 1993, Berichtsband 39, S.137-150
- [54] Vijayendra M., Neumann E.: Ultraschall-Polarisation in Werkstoffen mit Textur; Physikalische Grundlagen der Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißverbindungen. Materialprüfung, Bd.35, 1993, S.260-264
- [55] Vijayendra M., Neumann E.: Reflection and transmission energy coefficients at the interface between austenitic base and weld metal. Journal of Physics D: Applied Physics, Vol.25, 1992, S.1504-1512
- [56] Walte F.: Studie zum Stand der Technik für die Austenitprüfung. IZFP Saarbrücken Nr. 940102-TW, 1994
- [57] Boehm R., Erhard A., Wüstenberg H., Rehfeldt T.: Dreidimensionale Berechnung von Schallfeldern unter dem Einfluss zylindrischer Bauteilkrümmungen für fokussierende Prüfköpfe und Gruppenstrahler. DGZfP Jahrestagung 2002, Berichtsband 80
- [58] Boehm R., Erhard A., Möhrle W.: Beeinflussung des Gruppenstrahlerschallfeldes durch Anisotropie. DGZfP Jahrestagung 1993, Berichtsband 37.2, S.638-647
- [59] Erhard A., Schenk G., Hauser T., Völz U.: New applications using phased array techniques. Nuclear Engineering and Design, 206, 2001, S.325-335

- [60] Erhard A., Schenk G., Möhrle W., Montag H.-J.: Ultrasonic Phased Array technique for Austenitic Weld Inspection. 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Rome, 2000
- [61] Tessaro U., Erhard A., Brekow G., Mletzko U.: Charakterisierung oberflächennaher Fehler an plattierten Komponenten mittels Gruppenstrahlertechnik. DGZfP Jahrestagung 2002
- [62] Wüstenberg H., Boehm R., Tschardt D.: Practical application of modeling at ultrasonic probe and inspection design. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 21, 2001, S.118-122
- [63] Schmitz V., Müller V., Schäfer G.: Synthetic aperture focussing technique- state of the art. Acoustic Imaging 19, 1991
- [64] Spies M., Jager W.: Synthetic aperture focusing for defect reconstruction in anisotropic media. Ultrasonics 41, 2003, pp. 125- 131
- [65] Langenberg K.-J., Shlivinski A., Marklein R., Schmitz V., Müller W., Mletzko U.: Fehlerabbildung in Mischschweißnähten mit einem angepassten SAFT- Algorithmus. DGZfP- Jahrestagung 2005, Rostock, Berichtsband 94- CD
- [66] Shlivinski A., Langenberg K.-J., Marklein R.: Ultraschall-Modellierung und -abbildung in Misch-Schweißnähten. Berichtsband, 30. MPA- Seminar / 9. Deutsch-Japanisches Seminar. Stuttgart, 2004
- [67] Shlivinski A., Langenberg K.-J., Marklein R., Schmitz V., Müller W., Mletzko U.: Modelling of Elastic Wave Propagation and Imaging of Defects in Dissimilar Welds. Proceedings, Fourth International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components. London, 2004
- [68] Helbig K.: Foundations of anisotropy for exploration seismics. Pergamon Press. 1994
- [69] Langenberg K.-J.: Theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Materialprüfung mit Ultraschall, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2009
- [70] Rose J.L.: Ultrasonic waves in solid media, Cambridge University Press, 1999. p. 278.
- [71] Berryman J.G.: Long-wave elastic anisotropy in transversely isotropic media, Geophysics, 44, 1979. pp. 896-917.
- [72] Shearer P. M.: Introduction to seismology. Cambridge University Press 2006.
- [73] Stopin A.: Détermination de modèle de vitesse anisotrope par tomographie de réflexion des modes de compression et de cisaillement. Ph.D thesis, University of Strasbourg I, France 2001

- [74] Erstarrungsgefüge und Textur von Schmelzschweißplattierungen aus Chrom- Nickel-Stählen für Kernreaktorkomponenten. *Schweißen und Schneiden*, 26 (1974) Heft 2
- [75] Daley P.F., Hron F.: Reflection and transmission coefficients for transversely isotropic media. *Bull., Seis. Soc. Am.*, 67, 1977. S. 661-675.
- [76] Fedorov F. I.: *Theory of elastic waves in crystals*. Plenum Press, New York. 1968
- [77] Holmes C. ; Drinkwater B. ; Wilcox P. ; The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method, *Insight* 2004, vol. 46, No. 11, pp. 677-680
- [78] Pörtzgen N., Dijkstra F.H.D., Gisolf A., Blacquièrre G.; *ADVANCES IN IMAGING OF NDT RESULTS*, 16th WCNDT 2004
- [79] Langenberg, K.: *Applied Inverse Problems for Acoustic, Electromagnetic and Elastic Wave Scattering*. In: Sabatier, P.C. (Hrsg.): *Basic Methods of Tomography and Inverse Problems*. Adam Hilger, 1987, S. 125-467
- [80] Langenberg K., Berger M., Kreutter T., Mayer K., Schmitz V.: Synthetic aperture focusing technique signal processing. In: *NDT International* 19 (1986), June, Nr. 3
- [81] Zimmer A.: *Abbildende zerstörungsfreie Prüfverfahren mit elastischen und elektromagnetischen Wellen*. Dissertation. Universität Kassel, Kassel, 2007
- [82] Pudovikov S., Bulavinov A., Kröning M.: Ultrasonic inspectability of austenitic stainless steel and dissimilar metal weld joints. 34. MPA-Seminar "Werkstoff- & Bauteilverhalten in der Energie- & Anlagentechnik" 9 -10. Oktober 2008, Stuttgart
- [83] Spies M.: *Transducer Field Modeling in Anisotropic Media by Superposition of Gaussian Base Functions*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 105, 633-638 (1999)
- [84] Fellingner P., Marklein R.: *EFIT – Elastodynamische Finite Integrationstechnik zur Modellierung der Abstrahlung, Ausbreitung und Beugung elastischer Wellen*. DGZfP e.V., Berlin, 1990
- [85] Chinta P. K., Mayer K., Langenberg K.-J.: *3D-EFIT-Modellierung elastischer Wellen in anisotropen Medien*. DGZFP Jarestagung, 2011
- [86] Sadri M., Riahi M. A.: Ray tracing and amplitude calculation in anisotropic layered media. *Geophys. J. Int.* 180, pp.1170-1180, 2010
- [87] Woo S.-C., Shi Y.: Influence of phased array element size on beam steering behavior. *Ultrasonics* 36 (1998), pp. 737 – 749.
- [88] Nyquist H.: Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. In: *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. Vol. 47, April 1928, [ISSN 0096-3860](https://doi.org/10.1109/AIEE.1928.1191111), S. 617–

- 644 (Wiederabdruck in: Proceedings of the IEEE. Vol. 90, No. 2, 2002, [ISSN 0018-9219](#), S. 617–644)
- [89] DIN EN 1330-4, Zerstörungsfreie Prüfung - Terminologie - Teil 4: Begriffe der Ultraschallprüfung.
- [90] Nelder J.A., Mead R.: A Simplex Method for Function Minimization. Computer Journal, 7; 308-313, 1965..
- [91] Oberle H. J.: Simplexmethode nach Nelder, Mead. Vorlesungsskript, Universität Hamburg, 2012, S. 20- 23
- [92] Dugan S., Wagner S., Zickler S.: Herstellung von Testkörpern mit realistischen Fehlern für die Ultraschallprüfung. DGZFP-Jarestagung 2010, Erfurt.
- [93] Acoustic Control Systems: <http://acsys.ru/eng/>
- [94] EN-12668-1 „Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung - Teil 1: Prüfgeräte“

Anlagen

- Anlage 1** Technische Daten der OPTUS-Elektronik
- Anlage 2** Prüfergebnisse an austenitischen Testkörpern mit künstlichen Fehlern
- Anlage 3** Prüfergebnisse an austenitischen Testkörper mit realen Fehlern
- Anlage 4** Ergebnisse der Voruntersuchungen der MPA- Stuttgart

Anlage 1

Technische Daten der OPTUS-Elektronik

Sender

- Anzahl Sender 64
- Sendespannung -50 bis -180 Volt an 50 Ohm
- Sendeimpulsform Rechteck, negativ
- Sendeimpulsbreite 12,5 ns bis 800 ns einstellbar in Schritten von 2 ns
- Anstiegszeit Sendeimpuls $9 \text{ ns} \pm 3 \text{ ns}$ (10% bis 90% Amplitude)
- Abfallzeit Sendeimpuls $20 \text{ ns} \pm 5 \text{ ns}$ (90% bis 10% Amplitude)
- Sender-Ausgangsimpedanz 50 Ohm
- Impulsfolgefrequenz bis 10 KHz, abhängig von Sendeimpulsbreite, Sendespannung, Abtastrate und Prüfbereich
- Sendesignalverschiebung je Kanal 0 ns bis $12,8 \mu\text{s}$ in Schritten von 0.25 ns

Empfänger / Signalverarbeitung

- Anzahl Empfänger 64 (16 parallele Kanäle gemultiplext je auf 4)
- Empfänger-Eingangsimpedanz 50 Ohm, andere Werte bei Bedarf
- min. Eingangsempfindlichkeit $100 \mu\text{V}_{\text{SS}}$
- max. Eingangsspannung 10 V_{SS}
- Eingangsdynamik $> 100 \text{ dB}$
- Verstärkungseinstellung Verstärkungseinstellung je Kanal $> 100 \text{ dB}$
einstellbar in 0.1 dB Schritten
- Kennlinie des Empfangsverstärkers linear
- Vertikallinearität $< \pm 2\% \text{ BSH}$

- Tiefenausgleichskurve 0 – 80 dB Einstellbereich, 0.1 dB Schrittweite, 256 Stützstellen, min. Stützstellenabstand 1 μ s, der Einstellbereich wird um den Wert der Grundverstärkung reduziert, Steilheit max. 40 dB/ μ s
- Frequenzbereich 500 KHz bis 20 MHz (- 3 dB Grenzen)
- Empfangsfilter 2 analoge Filter (Bandpässe)
- Betriebsarten IE, SE
- Empfangssignalverschieb. je Kanal 3.2 ns bis 14.8 ns Feineinstellung in Schritten von 10 ps, 12.5 ns bis 819 μ s Grobeinstellung in Schritten von 12.5 ns

Digitalteil

- A/D-Wandler 14 bit (13 bit + Vorzeichen), 80 MHz
- Dynamik A/D-Wandler > 72 dB bei 80 MHz Wandelrate
- A/D-Wandlerrate 80, 40, 20, 10 MHz einstellbar je Takt
- Laufzeitauflösung 12.5, 25, 50, 100 ns je nach Wandlerrate
- Datenaufnahmetiefe max. 64 KSamples pro Kanal

Anlage 2

Prüfergebnisse an austenitischen Testkörpern mit künstlichen Fehlern

Testkörper P1/50

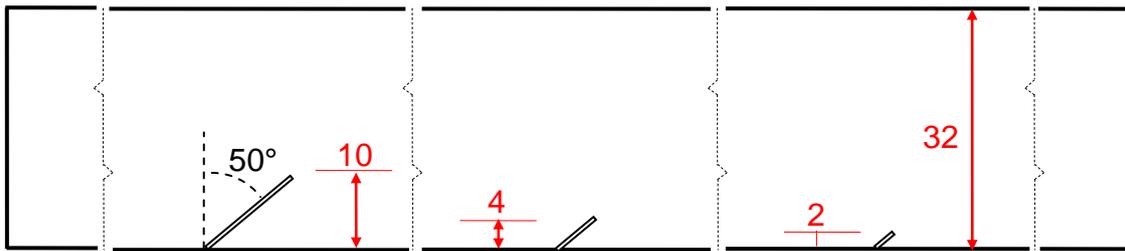


Abb. A2-1. Skizze des Testkörpers

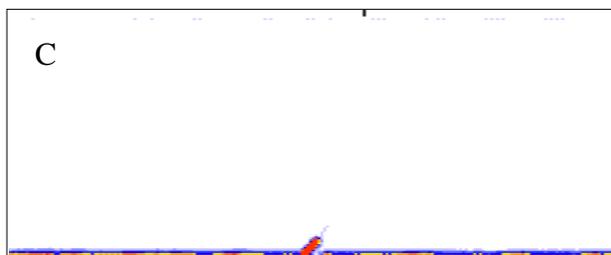
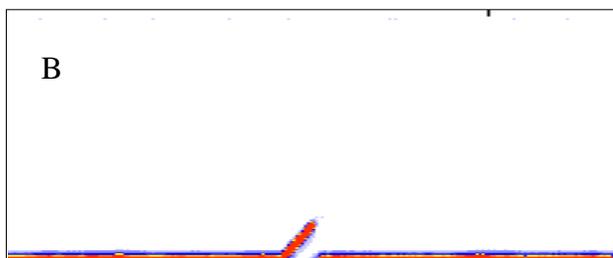
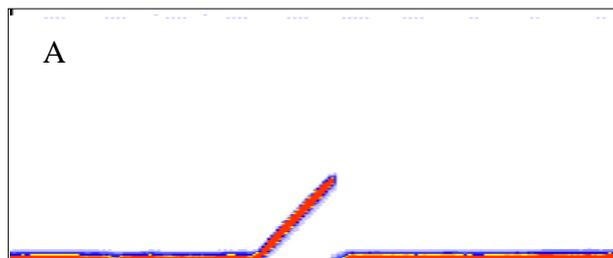


Abb. A2-2. Compound-B-Bild vom Testkörper P1/50

Testkörper P2/40

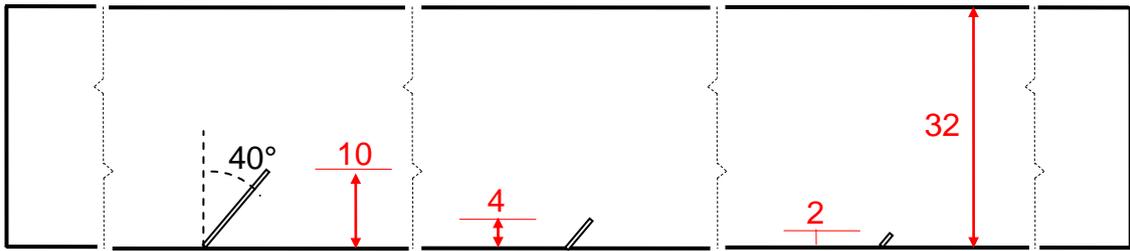


Abb. A2-3. Skizze des Testkörpers

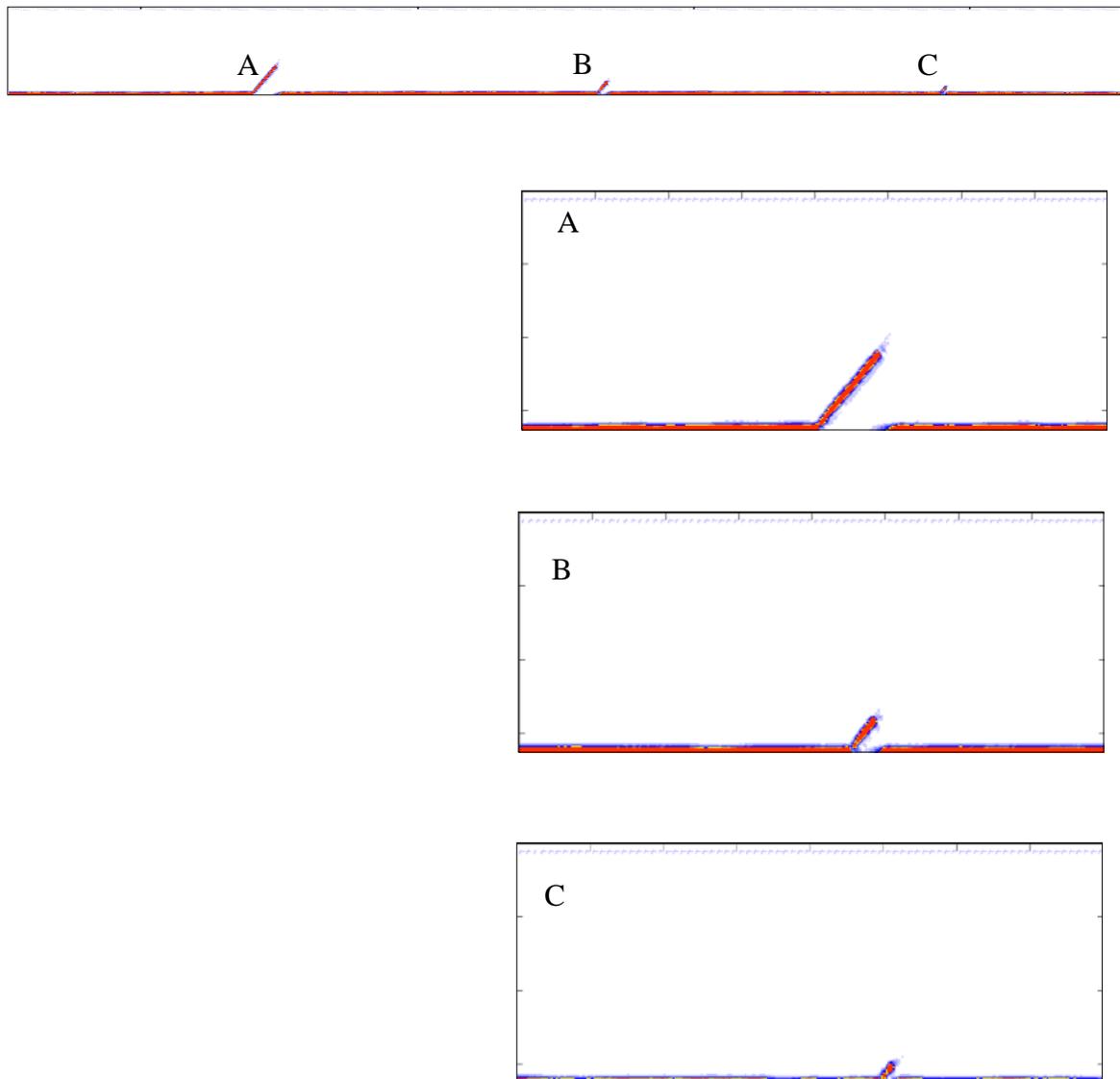


Abb. A2-4. Compound-B-Bild vom Testkörper P2/40

Testkörper P3/30

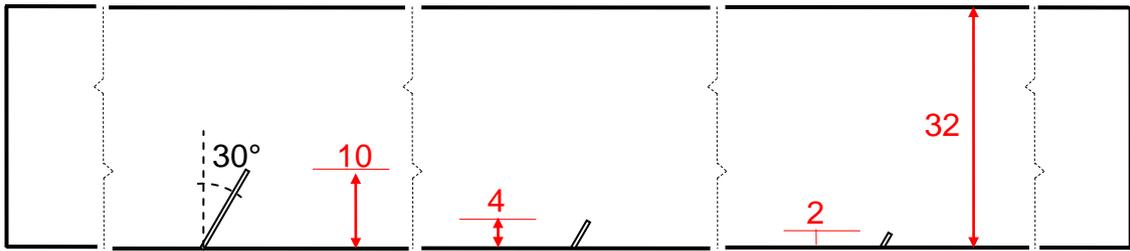


Abb. A2-5. Skizze des Testkörpers

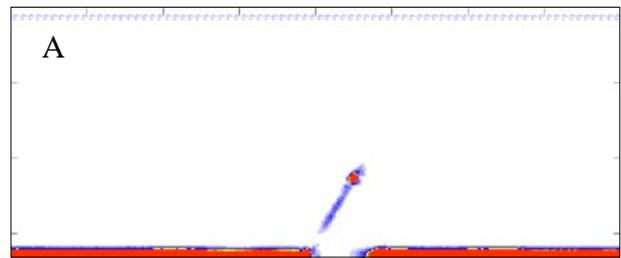


Abb. A2-6. Compound-B-Bild vom Testkörper P3/30

Testkörper P4/20

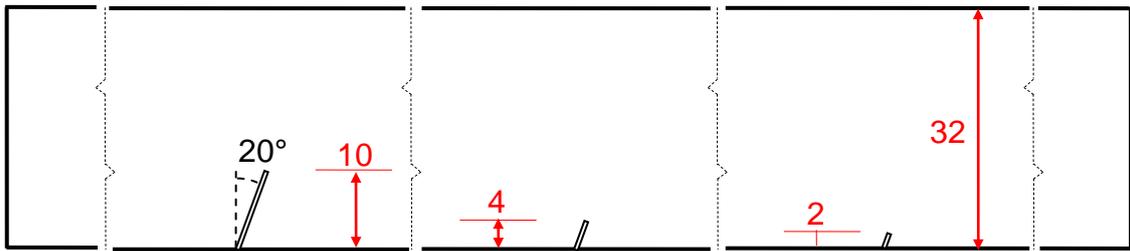


Abb. A2-7. Skizze des Testkörpers

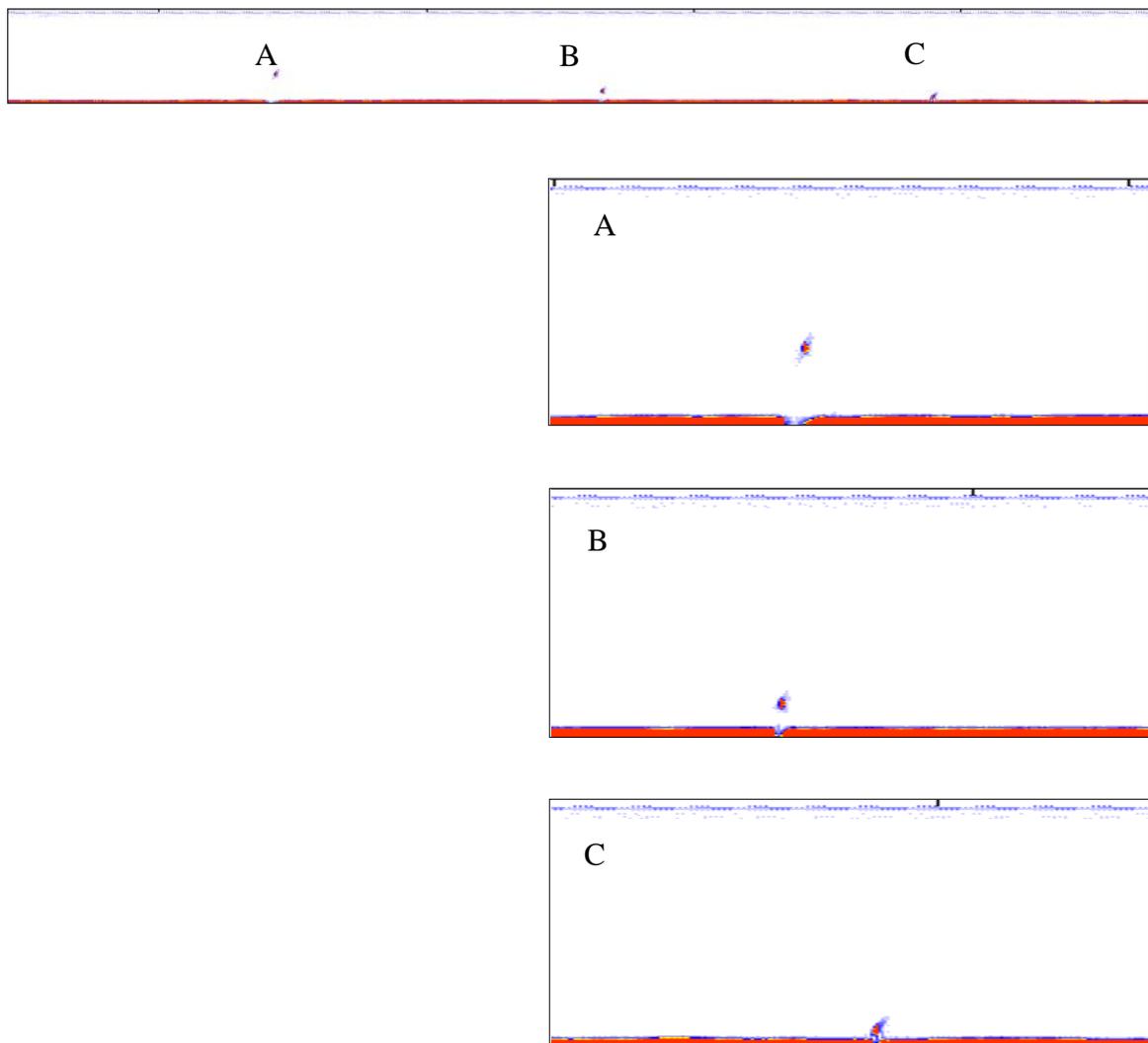


Abb. A2-8. Compound-B-Bild vom Testkörper P4/20

Testkörper P5/10

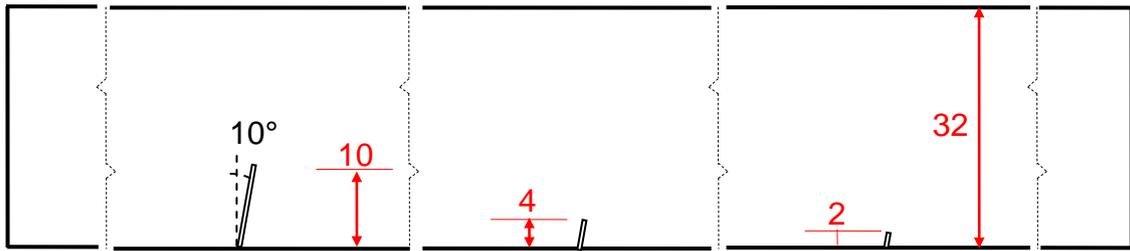


Abb. A2-9. Skizze des Testkörpers

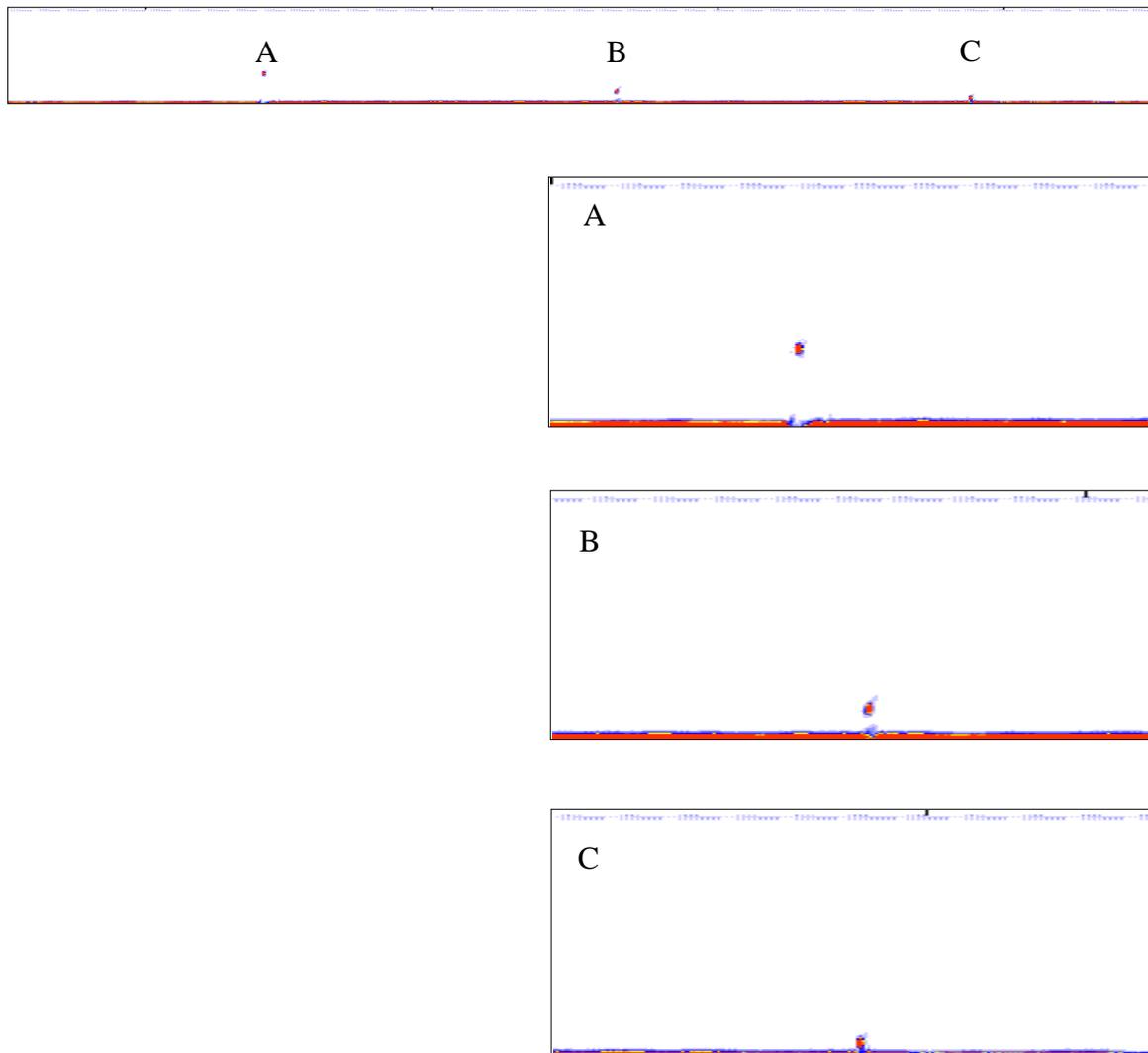


Abb. A2-10. Compound-B-Bild vom Testkörper P5/10

Testkörper R33

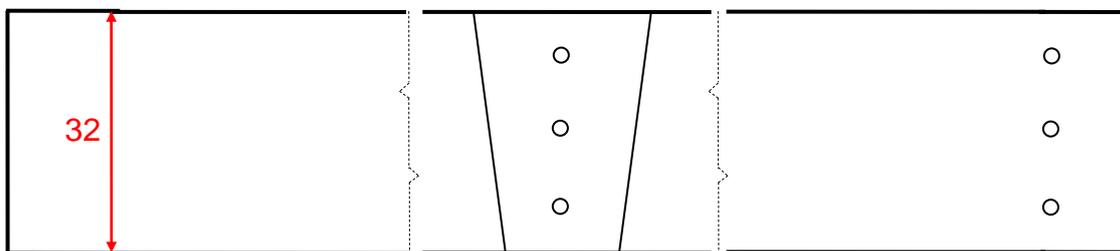


Abb. A2-11. Skizze des Testkörpers

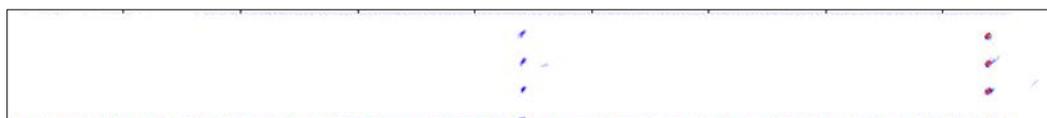


Abb. A2-12. Compound-B-Bild vom Testkörper R33

Testkörper Nr. 17/31

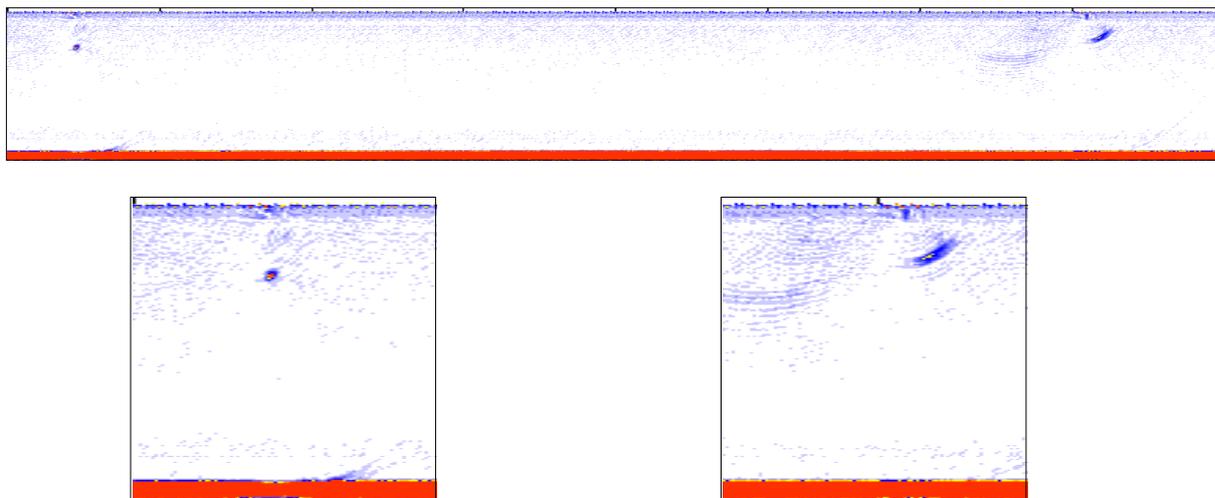


Abb. A2-13. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 17/31

Testkörper Nr. 5



Abb. A2-14. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 5

Testkörper Nr. 23

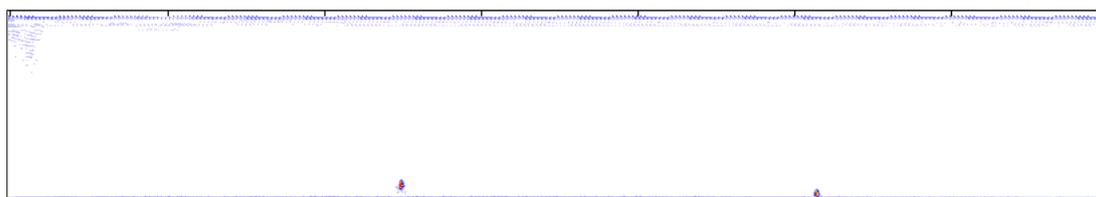


Abb. A2-15. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 23

Anlage 3

Prüfergebnisse an austenitischen Testkörpern mit realen Fehlern

Anmerkung:

Dargestellt sind nur die besten Ergebnisse, erzielt mit einem 5 MHz Array- Prüfkopf (L- Wellen, 16 Elemente, Keilwinkel 60°). In allen Fällen wurden die Risse bei einer Einschallung durch das stängelige Schweißnahtgefüge nachgewiesen und rekonstruiert.

Testkörper Nr. 6

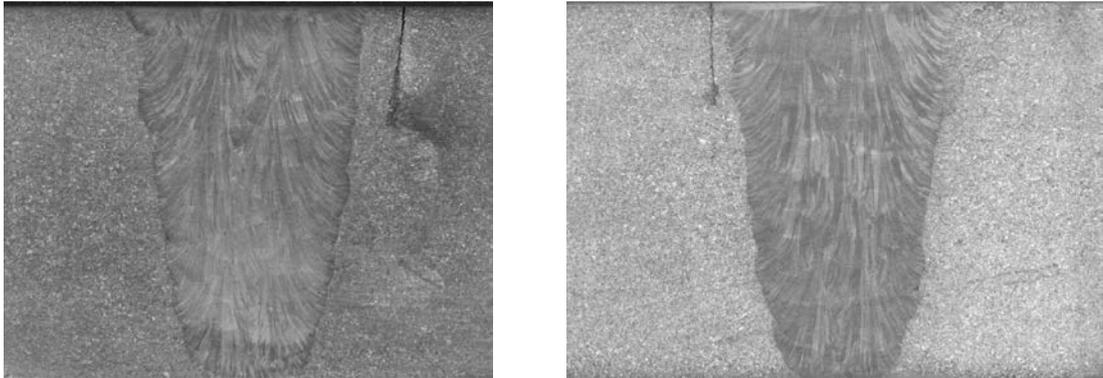
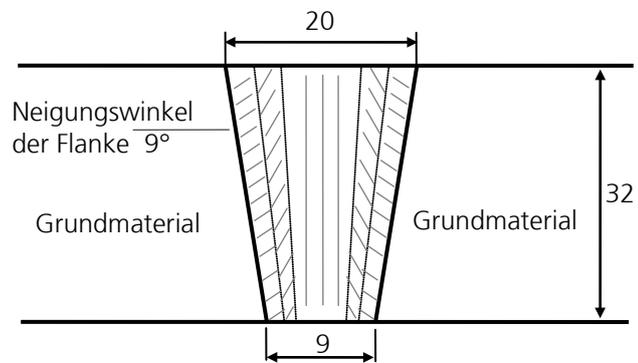


Abb. A3-1. Schliffbilder von dem Testkörper Nr. 6



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): 72°, 31°, 0°, -31°, -72°

Abb. A3-2. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 6

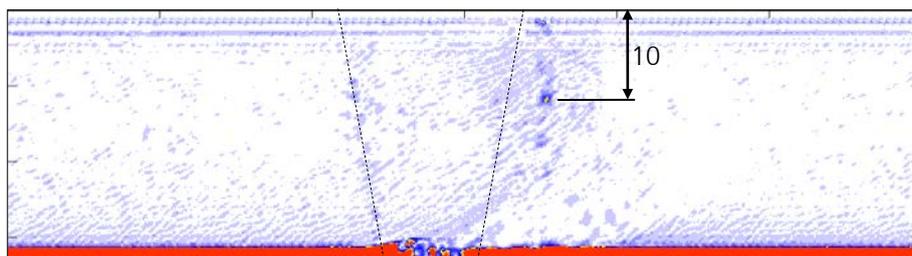


Abb. A3-3. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 6

Testkörper Nr. 7

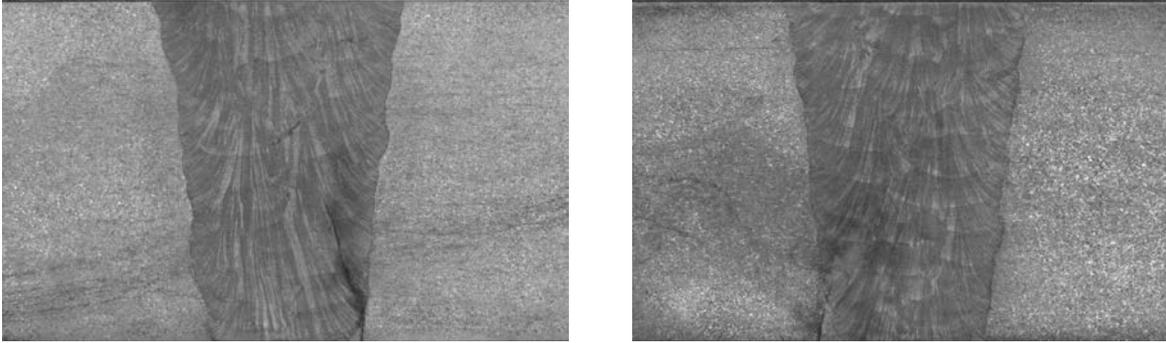
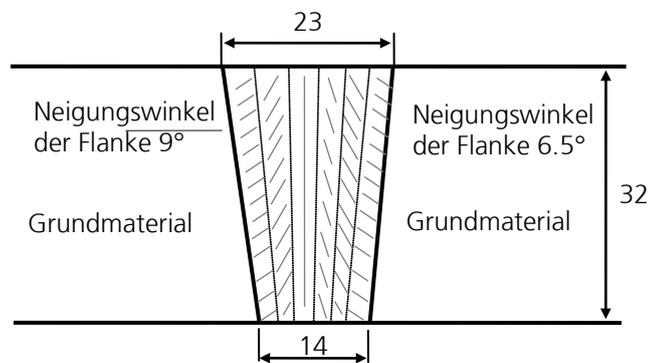


Abb. A3-4. Schliffbilder von dem Testkörper Nr. 7



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): 60° , 35° , 0° , -12° , -42° , -60°

Abb. A3-5. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 7

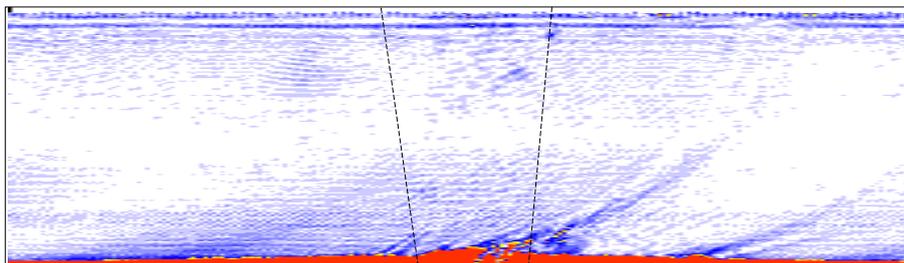


Abb. A3-6. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 7

Testkörper Nr. 8

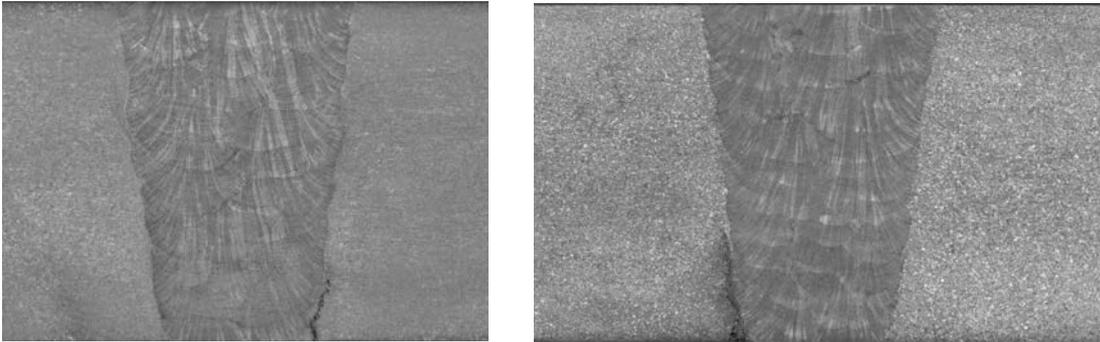
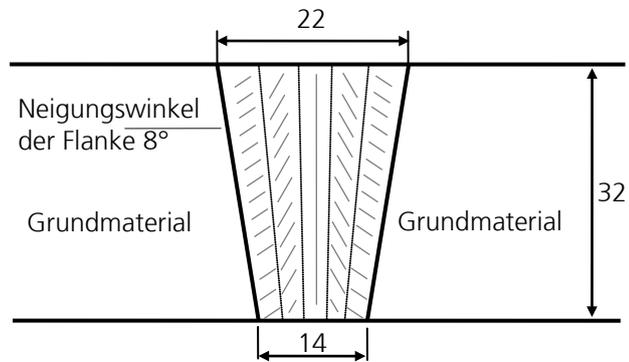


Abb. A3-7. Schliffbilder von dem Testkörper Nr. 8



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): 57°, 23°, 0°, -23°, -57°

Abb. A3-8. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 8

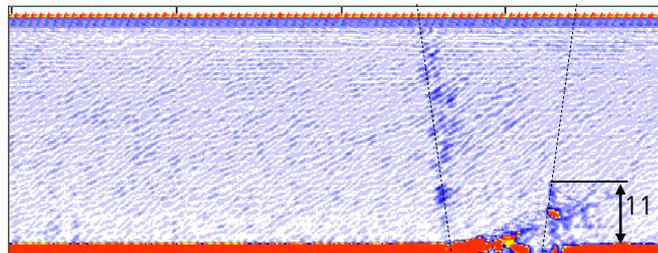


Abb. A3-9. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 8

Testkörper Nr. 9

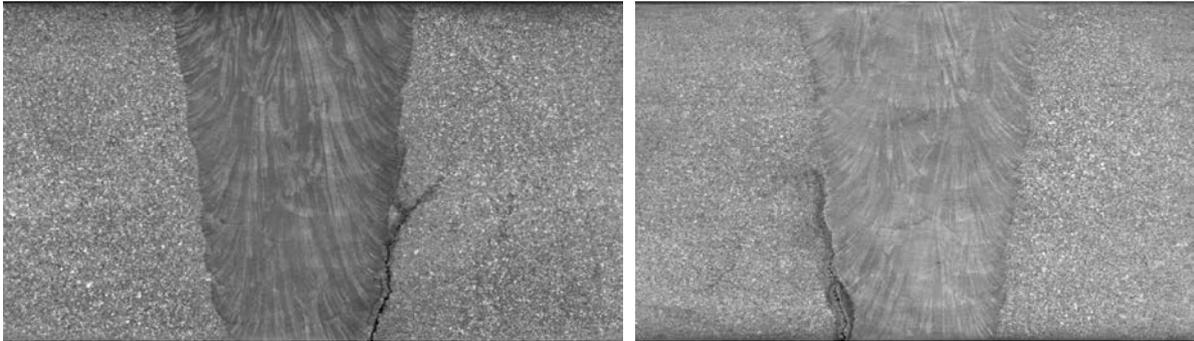
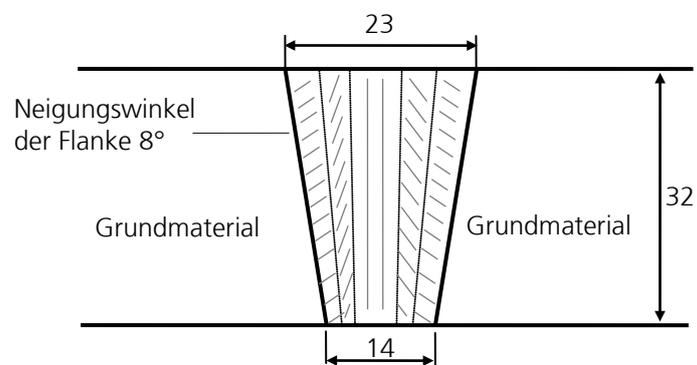


Abb. A3-10. Schliffbilder von dem Testkörper Nr. 9



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): 60° , 15° , 0° , -19° , -58°

Abb. A3-11. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 9

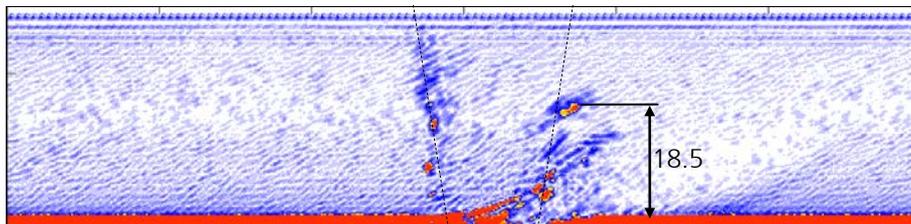


Abb. A3-12. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 9

Testkörper Nr. 10

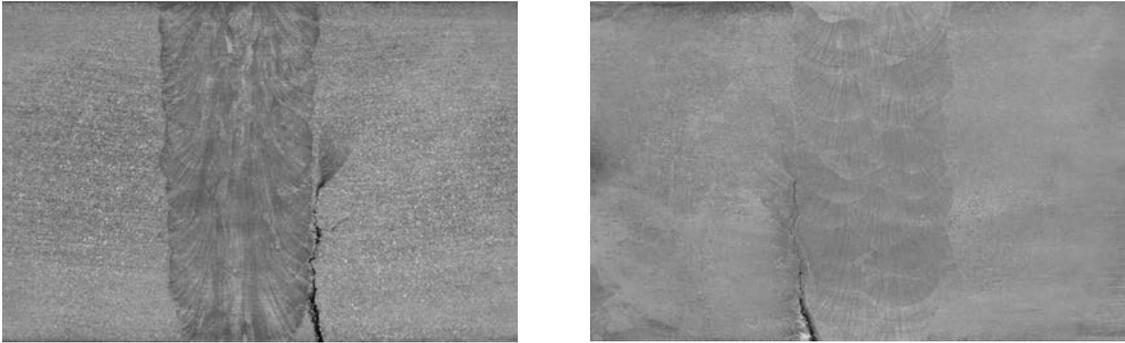
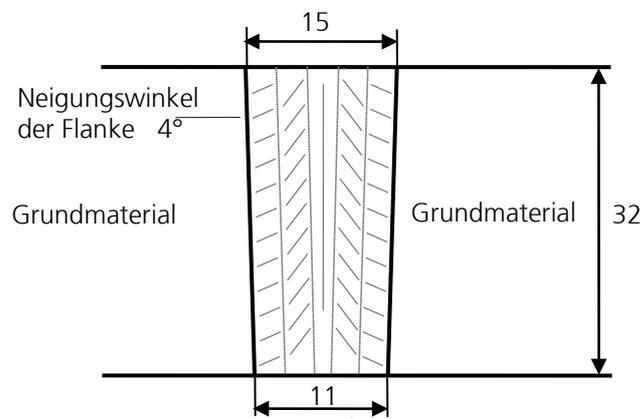


Abb. A3-13. Schlibfbilder von dem Testkörper Nr. 10



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): 80°, 45°, 0°, -45°, -80°

Abb. A3-14. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 10

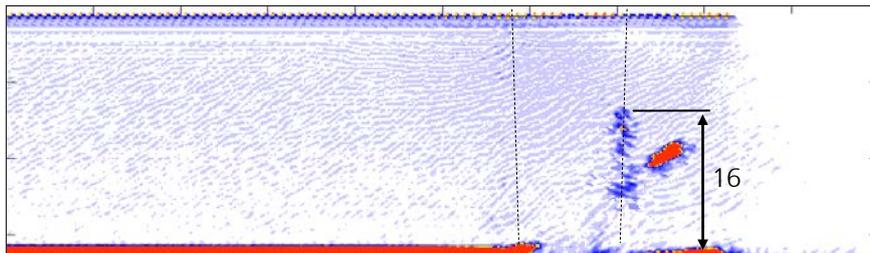


Abb. A3-15. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 10

Testkörper Nr. 11

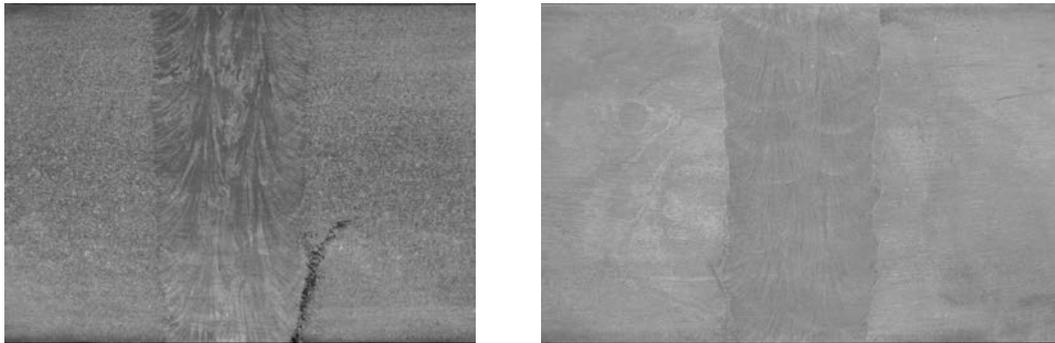
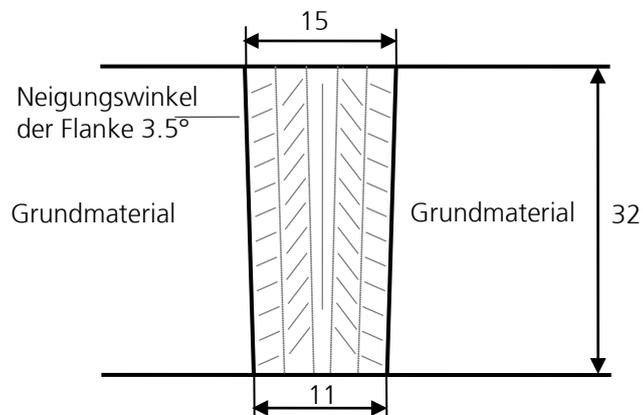


Abb. A3-16. Schliffbilder von dem Testkörper Nr. 11



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): 80°, 45°, 0°, -45°, -80°

Abb. A3-17. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 11

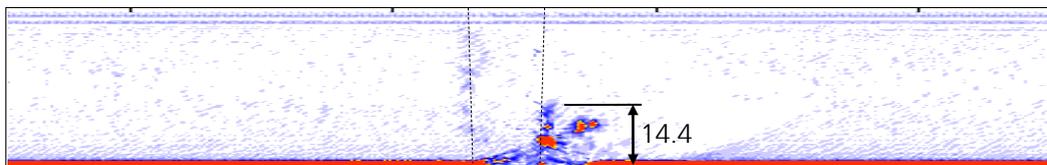


Abb. A3-18. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 11

Testkörper Nr. 12

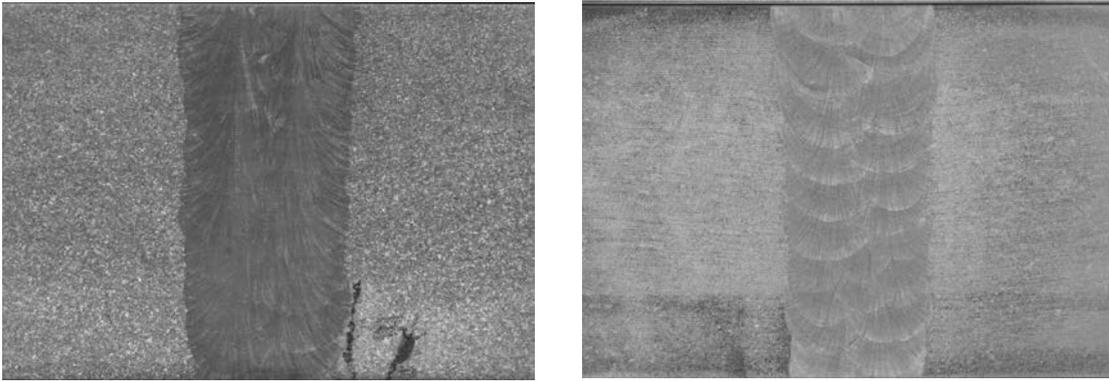
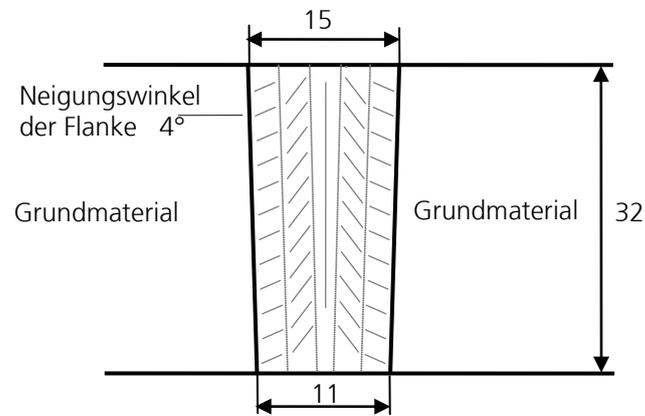


Abb. A3-19. Schliffbilder von dem Testkörper Nr. 12



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): 80°, 45°, 0°, -45°, -80°

Abb. A3-20. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 12

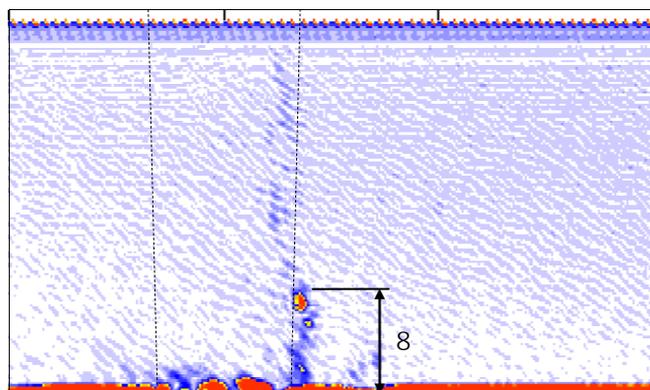


Abb. A3-21. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 12

Testkörper Nr. 13

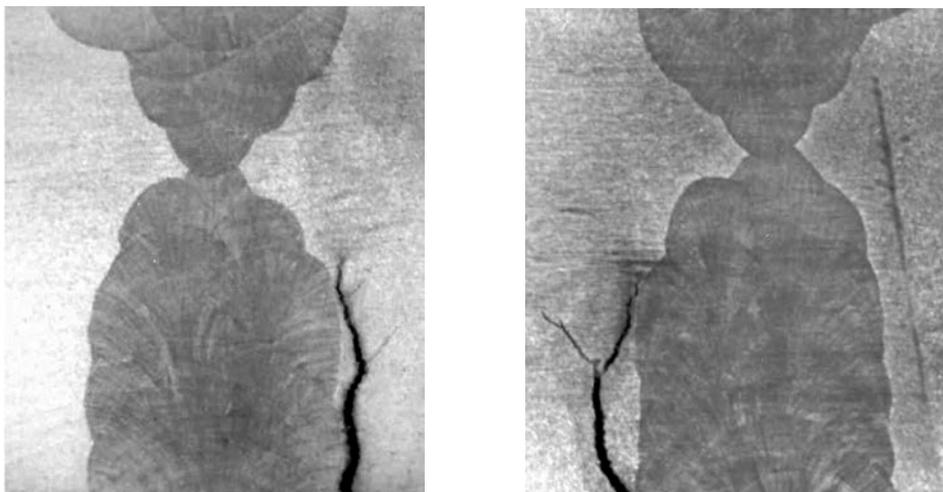
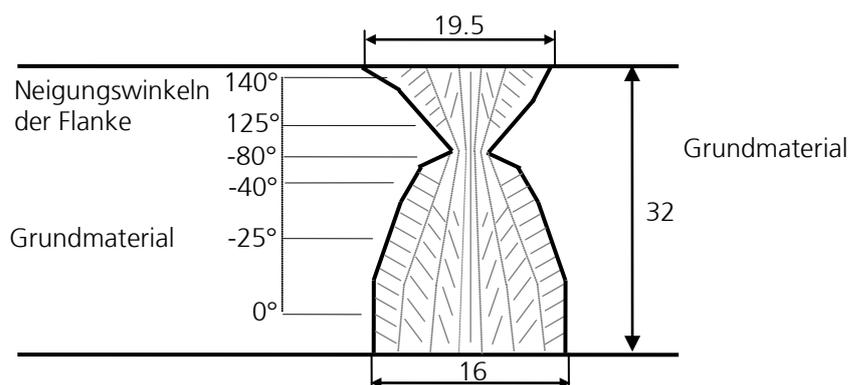


Abb. A3-22. Schlibfbilder von dem Testkörper Nr. 13



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): oberes Segment $-60^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ, 60^\circ$
unteres Segment $60^\circ, 45^\circ, 20^\circ, 0^\circ, -20^\circ, -45^\circ, -60^\circ$

Abb. A3-23. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 13

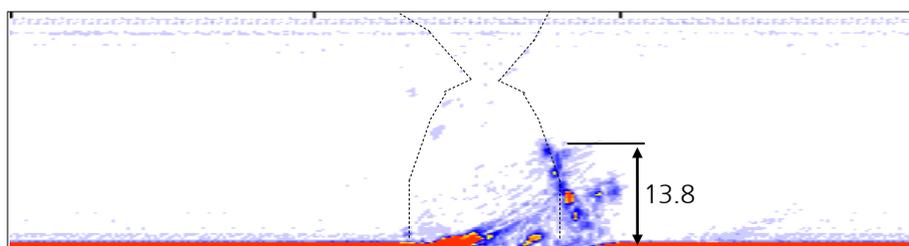


Abb. A3-24. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 13

Testkörper Nr. 14

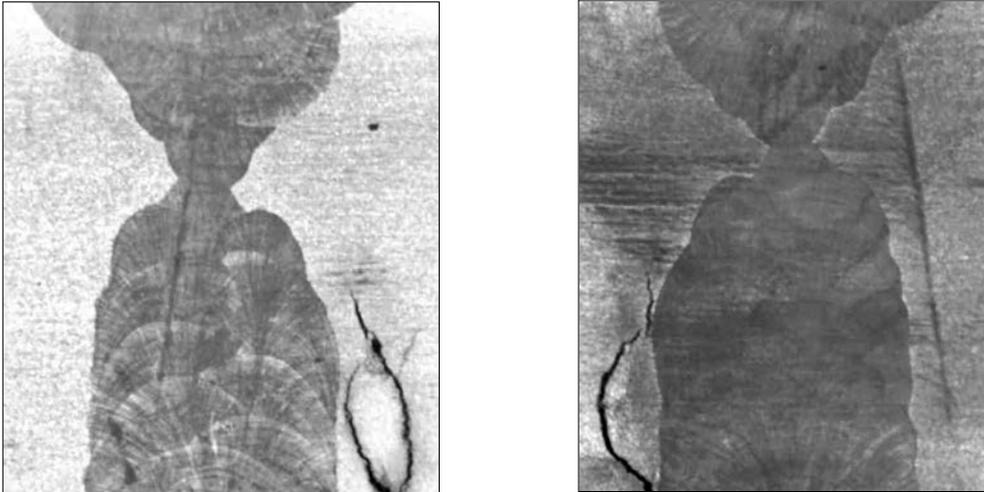
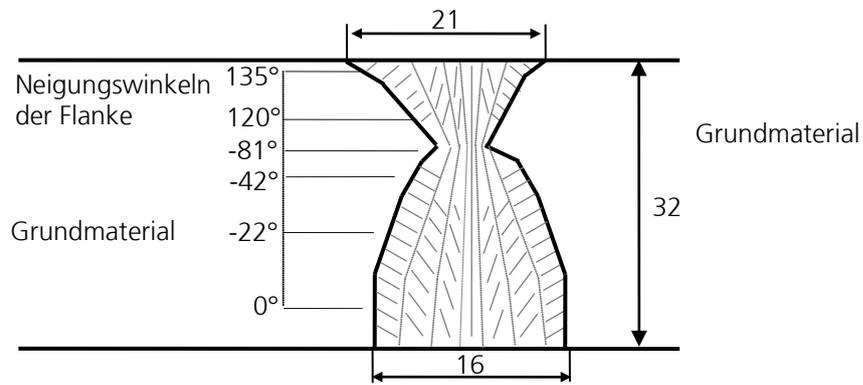


Abb. A3-25. Schliffbilder von dem Testkörper Nr. 14



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): oberes Segment -60°, -50°, -17°, 0°, 20°, 60°
unteres Segment 60°, 42°, 20°, 0°, -20°, -42°, -60°

Abb. A3-26. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 14

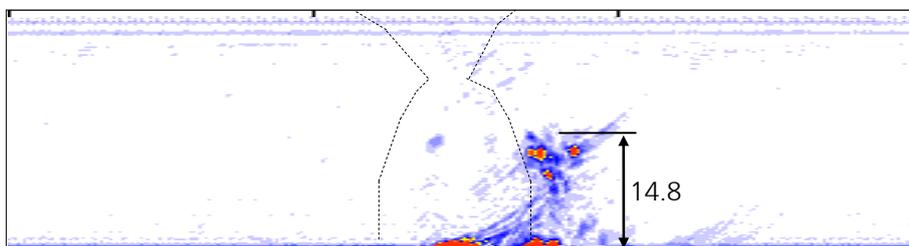


Abb. A3-27. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 14

Testkörper Nr. 15

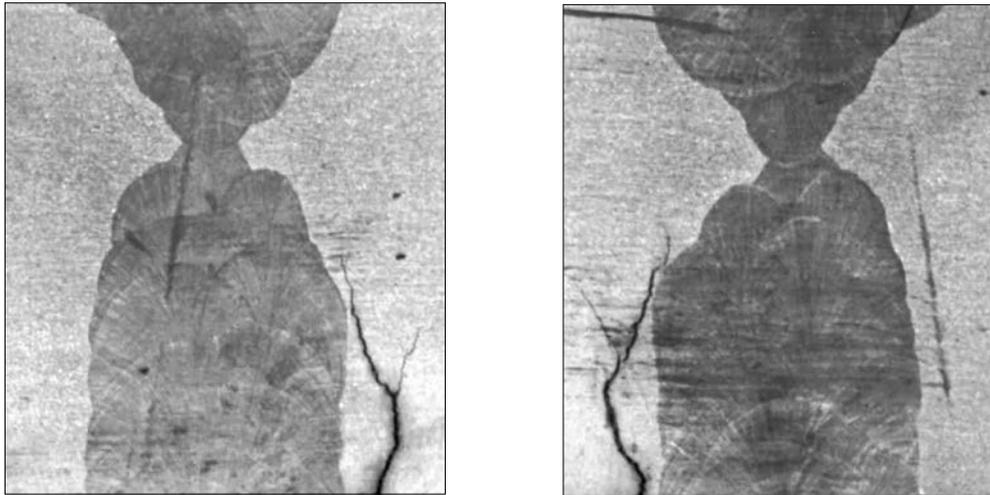
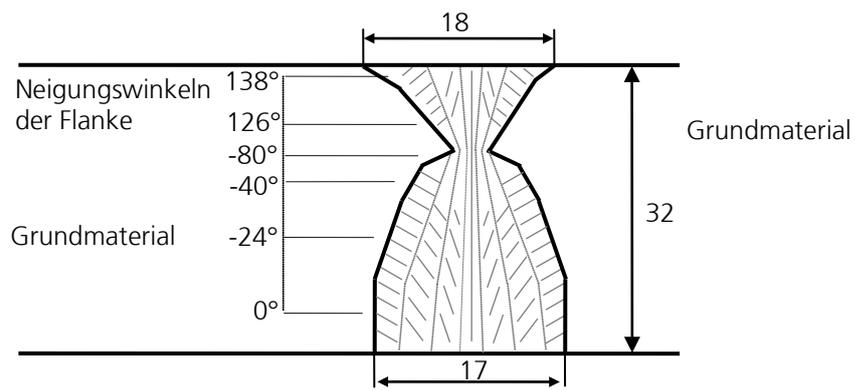


Abb. A3-28. Schlibfbilder von dem Testkörper Nr. 15



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): oberes Segment $-60^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ, 60^\circ$
unteres Segment $60^\circ, 45^\circ, 20^\circ, 0^\circ, -20^\circ, -45^\circ, -60^\circ$

Abb. A3-29. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 15

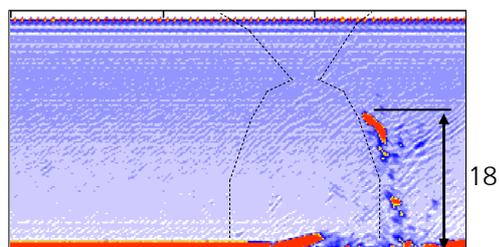


Abb. A3-30. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 15

Testkörper Nr. 16

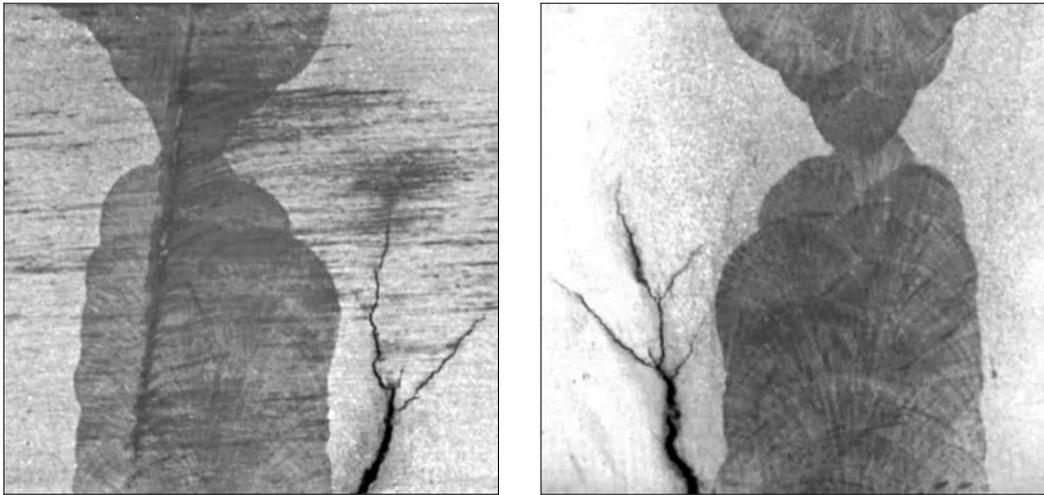
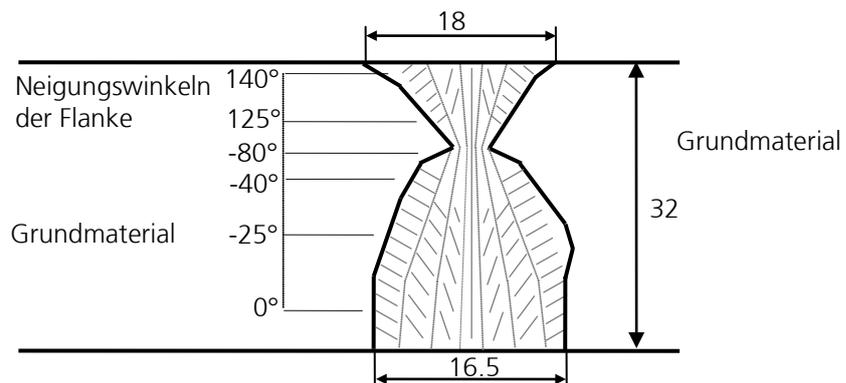


Abb. A3-31. Schlifffbilder von dem Testkörper Nr. 16



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.):
oberes Segment -63°, -20°, 0°, 20°, 63°
unteres Segment 60°, 43°, 18°, 0°, -21°, -45°, -60°

Abb. A3-32. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 16

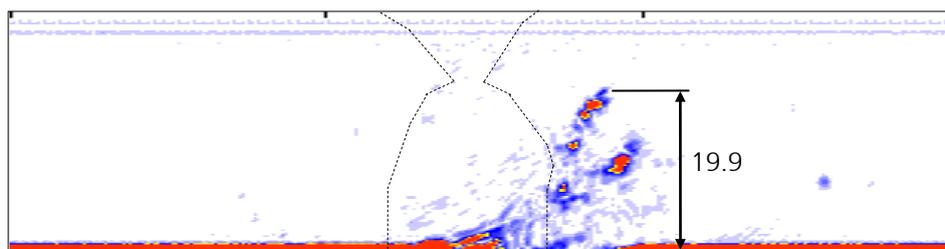
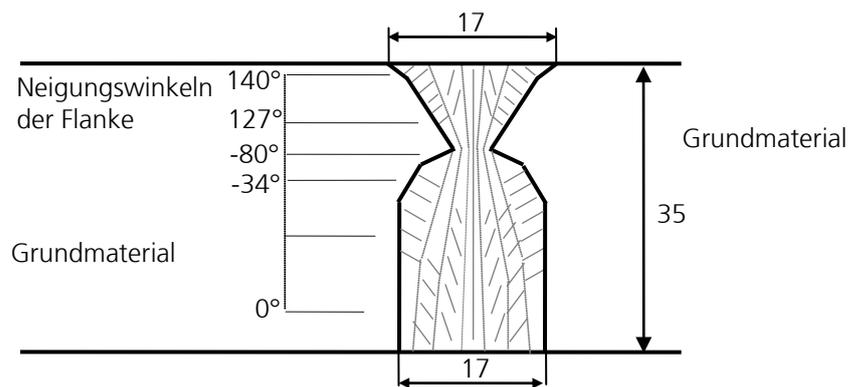


Abb. A3-33. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 16

Testkörper Nr. 18



Abb. A3-34. Schlibfbilder von dem Testkörper Nr. 18



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.):
oberes Segment 60°, 20°, 0°, -20°, -60°
unteres Segment 60°, 45°, 20°, 0°, -20°, -45°, -60°

Abb. A3-35. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 18

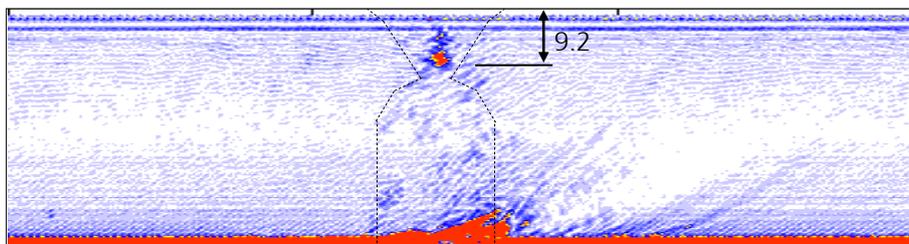


Abb. A3-36. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 18

Testkörper Nr. 19

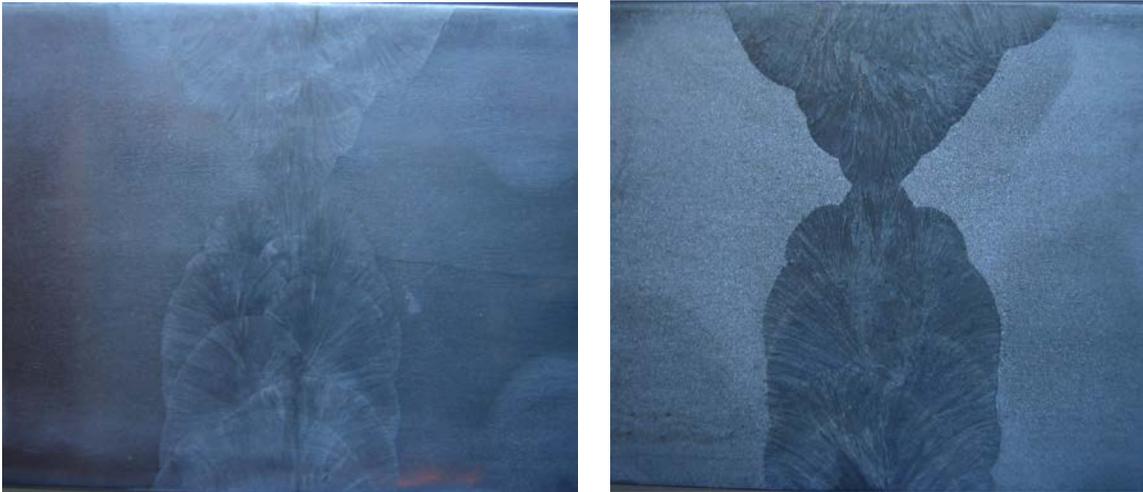
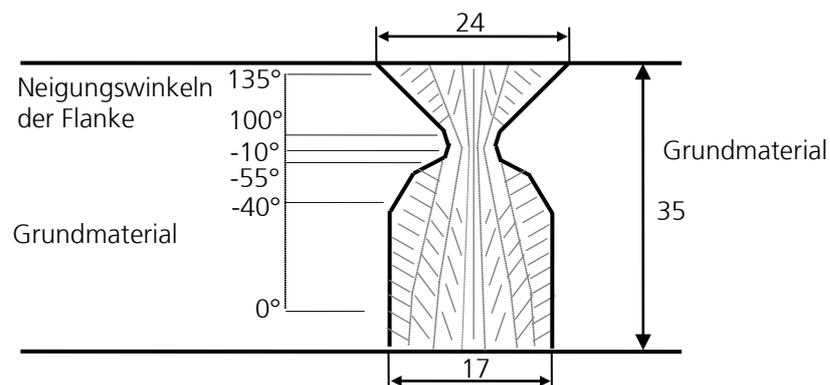


Abb. A3-37. Schliffbilder von dem Testkörper Nr. 19



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): oberes Segment $-60^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ, 60^\circ$
unteres Segment $60^\circ, 45^\circ, 20^\circ, 0^\circ, -20^\circ, -45^\circ, -60^\circ$

Abb. A3-38. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 19

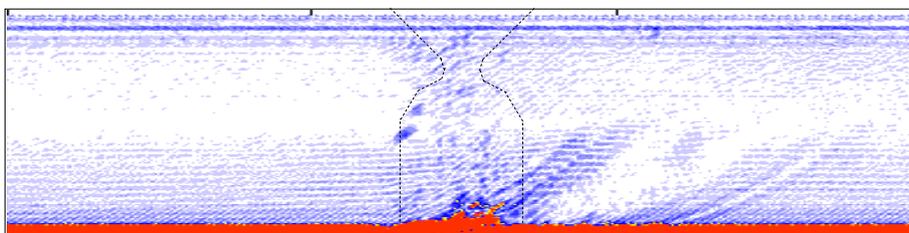


Abb. A3-39. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 19

Testkörper Nr. 20

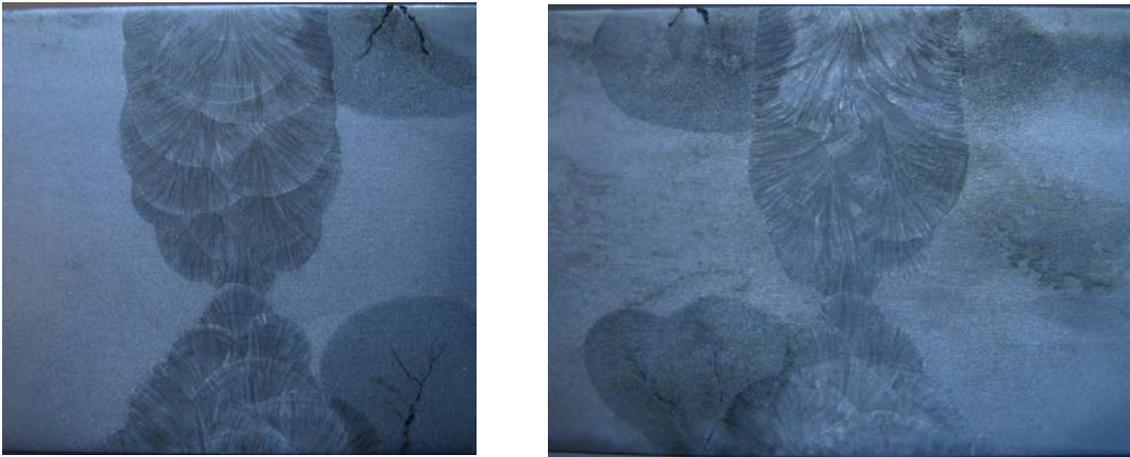
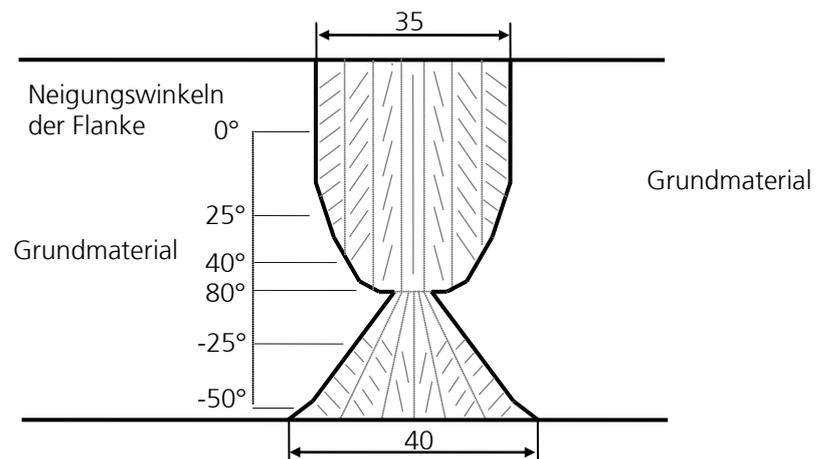


Abb. A3-40. Schlibfbilder von dem Testkörper Nr. 20



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): oberes Segment 60°, 45°, 20°, 0°, -20°, -45°, -60°
unteres Segment -50°, -20°, -10°, 10°, 20°, 50°

Abb. A3-41. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 20

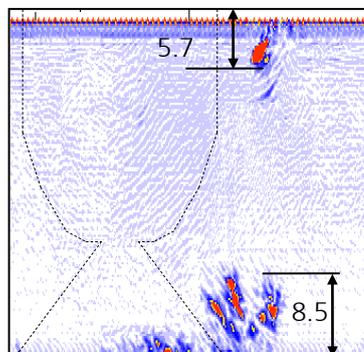


Abb. A3-42. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 20

Testkörper Nr. 32

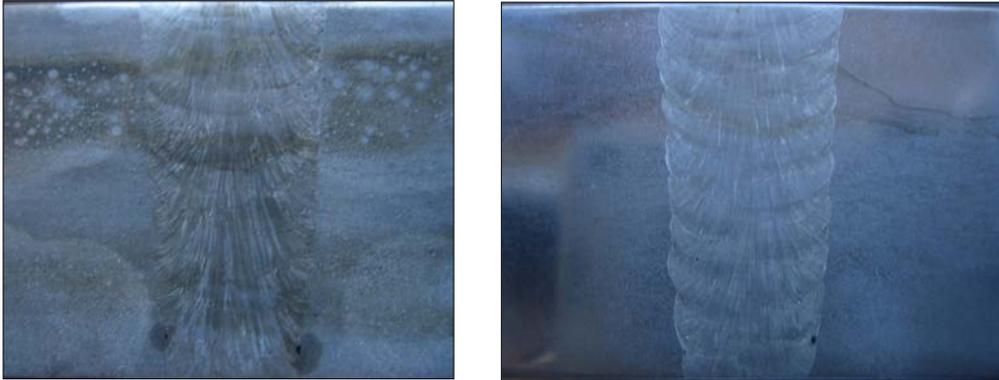
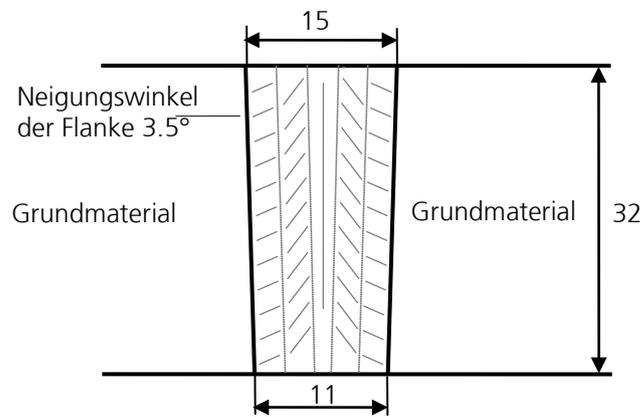


Abb. A3-43. Schliffbilder von dem Testkörper Nr. 32



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): 80° , 45° , 0° , -45° , -80°

Abb. A3-44. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 32

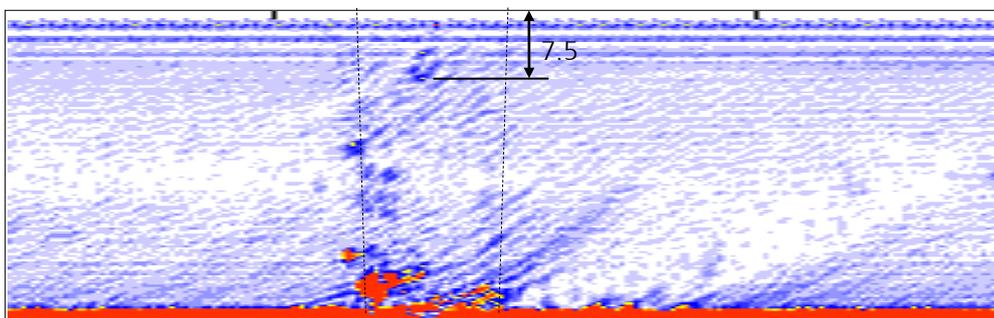
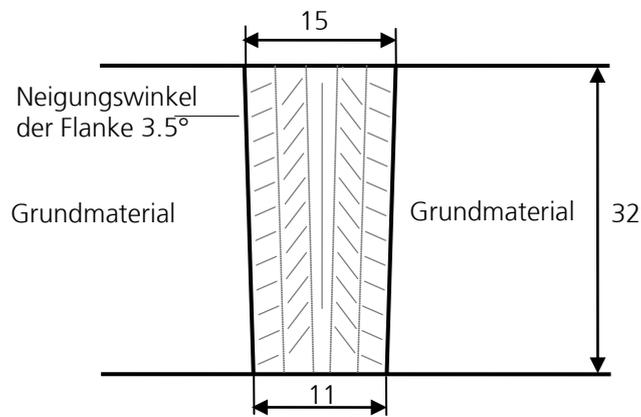


Abb. A3-45. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 32

Testkörper Nr. 33



Abb. A3-46. Schliffbilder von dem Testkörper Nr. 33



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): 80°, 45°, 0°, -45°, -80°

Abb. A3-47. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 33

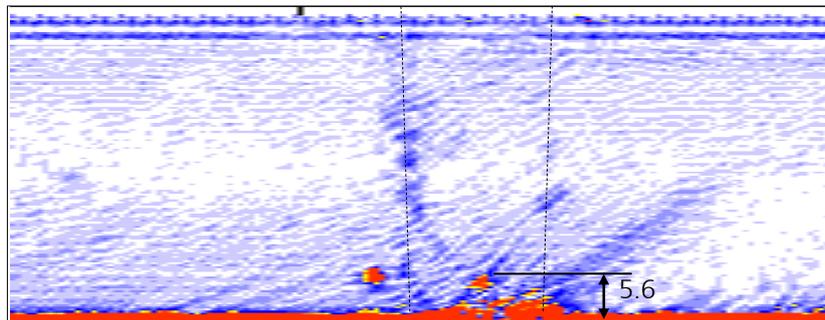
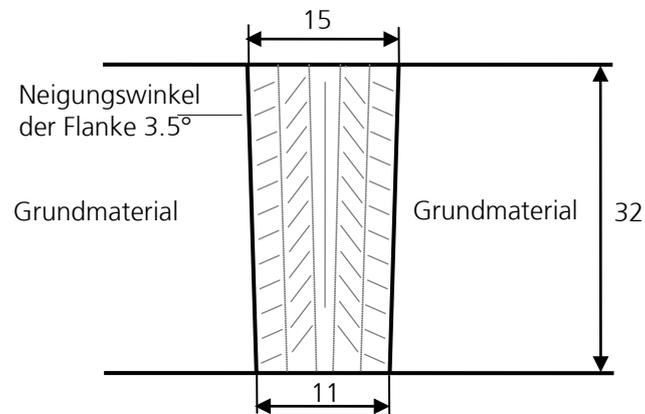


Abb. A3-48. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 33

Testkörper Nr. 34



Abb. A3-49. Schliffbilder von dem Testkörper Nr. 34



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.): 80° , 45° , 0° , -45° , -80°

Abb. A3-50. Das Nahtmodell im Testkörper Nr. 34

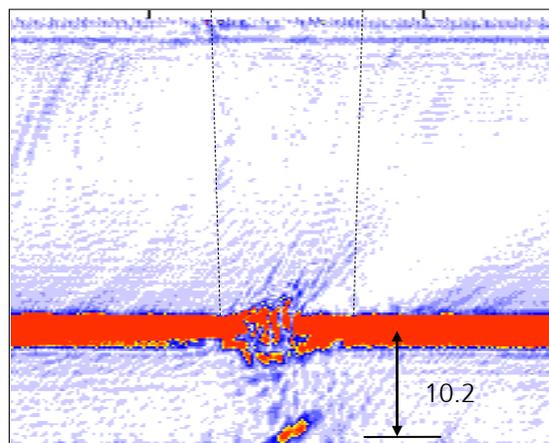
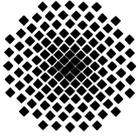


Abb. A3-51. Compound-B-Bild vom Testkörper Nr. 34

Anlage 4

Ergebnisse der Voruntersuchungen der MPA- Stuttgart



Abschlussbericht

über die von der MPA Universität Stuttgart im Unterauftrag des Fraunhofer-IZFP Saarbrücken durchgeführten Arbeiten zum Vorhaben

Entwicklung einer innovativen Ultraschall-Prüftechnik für den Fehlernachweis und die Größenbestimmung an austenitischen Schweißnähten und Mischschweißnähten im Primärkreis von KKW – vorwiegend Längsfehler (Kurztitel „Austenit IV“)

Reaktorsicherheitsforschung – Kennzeichen: 1501370

MPA-Auftrags-Nr.: 8404 000 000

Verfasser: Dr.-Ing. Sandra Dugan
Dipl.-Ing. Sabine Wagner

Projektleiterin: Dr.-Ing. Sandra Dugan

Stuttgart, Januar 2013

Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA)

Inhalt

1	Aufgabenstellung	5
2	Testkörperauswahl und -herstellung	6
2.1	Werkstoffe und Testkörpergeometrie.....	6
2.2	Auswahl und Einbringen von Testfehlern.....	6
2.2.1	Austenit-Testkörper	6
2.2.2	Mischnaht-Testkörper	8
3	Dokumentation der Testkörper	8
3.1	Metallografie.....	8
3.2	Zerstörungsfreie Prüfung.....	8
3.2.1	Eindringprüfung	8
3.2.2	Durchstrahlungsprüfung.....	9
3.2.3	Ultraschallprüfung.....	9
4	Zusammenfassung.....	10
5	Literatur.....	12
6	Abbildungen und Tabellen.....	13

1 Aufgabenstellung

Die hier dargestellten Arbeiten wurden durchgeführt im Unterauftrag des Fraunhofer-Instituts für zerstörungsfreie Prüfverfahren in Saarbrücken im Rahmen des GRS-Vorhabens „Entwicklung einer innovativen Ultraschall-Prüftechnik für den Fehlernachweis und die Größenbestimmung an austenitischen Schweißnähten und Mischschweißnähten im Primärkreis von KKW – vorwiegend Längsfehler“, Kurztitel „Austenit IV“, Reaktorsicherheitsforschung Förderkennzeichen 1501370. Die Arbeiten erfolgten in enger Kooperation mit dem parallel an der TU Berlin und der BAM Berlin durchgeführten Forschungsvorhaben zur Ultraschall-Querfehlerprüfung „Entwicklung einer innovativen Ultraschall-Prüftechnik für den Fehlernachweis und die Größenbestimmung an austenitischen Schweißnähten und Mischschweißnähten im Primärkreis von KKW – vorwiegend Querfehler“.

Ziel dieses Vorhabens war es, Verbesserungen bei der Aussagefähigkeit von Ultraschallprüfungen an austenitischen Schweißnähten und Mischschweißnähten zu erreichen. Die besonderen Herausforderungen bei der Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißnähten ergeben sich aufgrund der akustischen Anisotropie in Kombination mit der Kornstruktur in der Schweißnaht: *im Vergleich zur Schallwellenlänge große Körner, die in Abhängigkeit von den Abkühlbedingungen in Vorzugsrichtung orientiert sind - so genannte Stängelkristalle*. Durch dieses inhomogene, anisotrope Gefüge in der Schweißnaht wird die Schallausbreitung stark beeinflusst und erfolgt im Allgemeinen nicht geradlinig wie im homogenen isotropen Medium. An den Korngrenzen und auch im Bereich der Schmelzlinie bei Schweißungen kommt es zu Schall-Rückstreuungen sowie Reflexionen, Brechungen und Wellenabspaltungen. Die hieraus entstehenden Schwierigkeiten bei der Ultraschallprüfung sind: Vermindertes Fehlernachweisvermögen durch ein ungünstigeres Signal-Rauschverhältnis, Schwierigkeiten bei der Interpretation der Ultraschallsignale, Auftreten von "Scheinfehleranzeigen", Abweichungen bei der Lagebestimmung von Anzeigen. Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Forschungsvorhaben „Austenit I“ , „Austenit II“ und „Austenit III“, [1] bis [3], sowie weiterer Arbeiten zur Ultraschallprüfung an Austenit- und Mischnähten, sollten fortschrittliche Ultraschallprüf- und Analysetechniken, insbesondere die am Fraunhofer-IZFP entwickelte Sampling-Phased-Array Technik, in Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit beim Fehlernachweis und Fehlercharakterisierung in Austenit- und Mischnähten untersucht werden. Dabei wurde der Schwerpunkt auf realistische Fehler (Risse) gelegt.

Die Aufgaben der MPA Universität Stuttgart in diesem Vorhaben bestanden in der Herstellung und Bereitstellung von Ultraschall-Testkörpern mit künstlichen und realisti-

schen Testfehlern sowie der Charakterisierung dieser Testfehler mit verschiedenen zerstörungsfreien Prüfverfahren.

2 Testkörperauswahl und -herstellung

2.1 Werkstoffe und Testkörpergeometrie

Die bereit zu stellenden Testkörper wurden hinsichtlich Werkstoff und Geometrie der im Vorgängervorhaben verwendeten Quaderform aus austenitischem Werkstoff angepasst. Die Schweißverbindung erfolgte mit artgleichem Schweißzusatzwerkstoff. So wurde die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus früheren Untersuchungen gewährleistet. Für die Testkörper mit interkristallinen Spannungskorrosionsrissen war die Auswahl von korrosionssensiblen Werkstoff erforderlich. Austenitische Cr-Ni-Stähle sind anfällig für Spannungsrissskorrosion, wenn sie einen relativ hohen Anteil an Kohlenstoff und wenig stabilisierende Elemente wie Niob oder Titan aufweisen. Entsprechend dieser Kriterien wurden für die an der MPA hergestellten Testkörper der Grundwerkstoff und der Schweißzusatzwerkstoff ausgewählt. Die Schweißung aller Austenit-Testkörper erfolgte als Verbindungsschweißung zwischen zwei ebenen Platten (Stumpfstoß, Schweißverfahren: MMA (Manual Metal Arc = E-Hand)) mit jeweils unterschiedlicher Nahtgeometrie. Als Nahtformen wurden Breitspalt-Tulpen = U-Nähte, Engspalt-Tulpen sowie asymmetrische X-Nähte realisiert. Die geschweißten Platten wurden nach der Schweißung quer zur Schweißfortschrittsrichtung gesägt, um einzelne Quader mit einer Breite von je ca. 40 mm zu erhalten, Abbildung 1 .

Zusätzlich zu den austenitischen Testkörpern wurde ein Mischnaht-Testkörper aus MPA-Beständen ausgewählt. Ursprünglich sollte die im DWR-Segment am MPA-Großbehälter enthaltene Rohrrundnaht verwendet werden (DN 700 x 57,5 mm Wanddicke, Schweißzusatzwerkstoff: Inconel). Nachdem die vorhandene Manipulatortechnik des IZFP im Rahmen des Vorhabens nicht für den mobilen Einsatz am Großbehälter angepasst werden konnte, wurde alternativ ein transportabler Mischnaht-Testkörper ausgewählt. Dieser Mischnaht-Testkörper ist als Rohrtestkörper ausgeführt (Wanddicke 29,5 mm, Außendurchmesser 327 mm) mit einer austenitischen Rohrrundnaht und austenitischer Pufferung, die Ferrit-Seite ist im rohrinneren Prüfbereich austenitisch plattiert, Abbildung 2.

2.2 Auswahl und Einbringen von Testfehlern

2.2.1 Austenit-Testkörper

Für den Leistungsnachweis von ZfP-Verfahren und Prüftechniken ist eine Verwendung von Testkörpern mit realistischen Testfehlern von großer Bedeutung. Sollen bei der

Herstellung oder im Betrieb entstandene Risse mittels Ultraschallprüfung aufgefunden und bewertet werden, ist die Erprobung der zum Einsatz kommenden Prüftechnik an Testfehlern mit Risscharakter sinnvoll. Den Schwerpunkt der Untersuchungen zur Ultraschallprüfung an austenitischen Schweißnähten in diesem Vorhaben bildeten daher die realistischen Testfehler, d.h. Fehler, welche möglichst gut einem in der Praxis entstehenden Riss entsprechen. Dazu wurden vorrangig interkristalline Spannungskorrosionsrisse sowie Schwingrisse verschiedener Tiefe im Bereich der Schweißnaht realisiert, teilweise auf der Wurzelseite, teilweise auf der Decklagenseite, bei einigen Proben auch beidseitig. Zusätzlich wurden als künstliche Referenzfehler einige funkenerodierte Nuten im Grundwerkstoff eingebracht.

Um für die Schwingrisse und interkristallinen Spannungskorrosionsrisse die Position für den Rissstart definiert festzulegen, wurde zunächst in den Testkörper eine Starterkerbe in Form einer erodierten Nut oder eines Sägeschnittes über die gesamte Probenbreite eingebracht – in Abhängigkeit von der Fehler-Lage jeweils im Bereich der Schweißnahtwurzel oder/und in der Decklage. Schwingrissinitiierung und -wachstum wurden durch zyklische 3-Punkt-Biege-Beanspruchung realisiert. Für die Entstehung von Spannungskorrosionsrissen sind neben dem korrosionssensiblen Werkstoff weitere notwendige Voraussetzungen: Das Vorhandensein eines korrosiven Mediums sowie Spannungen im Material, wobei hier Eigenspannungen durchaus ausreichend sein können. Für die Herstellung der Spannungskorrosionsrisse im Labor sind üblicherweise deutlich höhere Spannungen erforderlich, um ein Risswachstum innerhalb relativ kurzer Zeit zu erreichen. Die Versuchsanordnung zur Einbringung der Spannungskorrosionsrisse ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt, am Beispiel eines Austenit-Testkörpers unter 4-Punkt-Biegebelastung. Über der Starterkerbe wurde ein Bad mit einer geeigneten Chemikalie platziert und eine statische 3-Punkt- oder 4-Punkt-Biegebelastung aufgebracht. Zur Erkennung des Rissstarts und zur Überwachung des Risswachstums wurden jeweils Schallemissionssensoren appliziert sowie Ultraschallprüfköpfe für eine Durchschallung so angeordnet, dass bei Risswachstum ein Teil des Schalls an der Rissfläche reflektiert wird und so der Nachweis eines Risswachstums möglich wird. Nach erfolgtem Anriss und ausreichendem Risswachstum wurde die Starterkerbe abgearbeitet, so dass im endgültigen Testkörper nur der Riss als Testreflektor zurückblieb.

Eine Übersicht über die Fehlertypen und Fehlerlagen in den verschiedenen quaderförmigen Austenit-Testkörpern ist in Abbildung 4 dargestellt.

2.2.2 Mischnaht-Testkörper

Der verwendete Mischnaht-Testkörper war an der MPA im Rahmen eines anderen Untersuchungsvorhabens gefertigt worden und war bereits mit geeigneten Testfehlern versehen [4]. Im Fall der Mischnaht wurden ausschließlich künstliche Testfehler (erodierte Nuten) untersucht. Der Testkörper enthält verschiedene Längsfehler (Fehlerlängsachse parallel zur Schweißfortschrittsrichtung) im Grundwerkstoff und im Schweißgut in der Pufferung sowie im Übergang Pufferung-Verbindungsnaht. Die Lage der Nuten im Bereich der Schweißnaht ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt.

3 Dokumentation der Testkörper

3.1 Metallografie

Da die Korngrößen und -orientierungen in der Schweißnaht einen wesentlichen Einfluss auf die Ultraschallausbreitung in der Naht und damit auf das Fehlernachweisvermögen haben, wurde zunächst an jedem der Austenit-Testkörper der Bereich der Schweißnaht auf jeder Seitenfläche poliert und geätzt. Die so erkennbare Kornstruktur in der Schweißnaht wurde fotografisch dokumentiert. Aufgrund der jeweils unterschiedlichen Schweißnahtgeometrien war davon auszugehen, dass sich die verschiedenen austenitischen Testkörper in Bezug auf die Kornstruktur unterscheiden. Diese Annahme wurde anhand der Ergebnisse bestätigt. Eine Übersicht zur Metallografie an den Austenit-Testkörpern findet sich in Tabelle 1.

Das Schlibfbild der Mischnaht ist mit der Angabe der Fehlerlagen in Abbildung 5 dargestellt.

3.2 Zerstörungsfreie Prüfung

Zur Einschätzung der Risstiefen und der Rissorientierungen wurden die Austenit-Testkörper mit den realistischen Testfehlern zerstörungsfrei geprüft. Diese Prüfung zur Dokumentation der Risse erfolgte mittels Eindringprüfung und Durchstrahlungsprüfung. Zusätzlich wurden an diesen Testkörpern Ultraschallprüfungen mit Beugungslaufzeittechnik (Time-of-Flight-Diffraction TOFD) durchgeführt, um Unterschiede in der Durchschallbarkeit der verschiedenen Schweißnähte zu dokumentieren und erste Hinweise auf die Erkennbarkeit von Rissspitzensignalen mit dieser Technik zu erhalten.

3.2.1 Eindringprüfung

An den Austenit-Testkörpern mit eingebrachten Rissen wurde eine Eindringprüfung mit fluoreszierendem Farbeindringmittel vorgenommen. Auf jeder der Seitenflächen wurde anhand des Anzeigenbildes die maximale Risstiefe bestimmt und die Schräglage sowie

der Grad der Verzweigung für die interkristallinen Spannungskorrosionsrisse dokumentiert. Die Schwingrisse verlaufen erwartungsgemäß senkrecht zur Probenoberfläche, eine Verzweigung ist nicht zu erkennen. Die Abbildungen zur Eindringprüfung an den Austenit-Testkörpern sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

3.2.2 Durchstrahlungsprüfung

Um eine bessere Aussage zum Grad der Verzweigung der interkristallinen Spannungskorrosionsrisse sowie der Risstiefe im Inneren der Testkörper zu erhalten, wurden Durchstrahlungsaufnahmen der Austenit-Testkörper angefertigt. Die Durchstrahlungsprüfung erfolgte mittels Röntgenröhre in zwei Durchstrahlungsrichtungen (in Dickenrichtung sowie quer zur Testkörper-Längsachse, also parallel zur Schweißfortschrittsrichtung). In den Durchstrahlungsbildern ist die Verzweigung der interkristallinen Spannungskorrosionsrisse gut abgebildet. Weiterhin ist zu erkennen, dass sich die Verzweigung über die Testkörperbreite hinweg ändert, also verschiedene Orientierungen der Rissflächen vorliegen. Eine Übersicht mit Durchstrahlungsbildern ist in Tabelle 3 gezeigt.

3.2.3 Ultraschallprüfung

Die Ultraschallprüfungen mittels TOFD-Technik erfolgten mit Longitudinalwellen-Prüfköpfen mit einer Frequenz von 2 MHz und einem Einschallwinkel von 60°. Es wurden Scans in verschiedene Richtungen durchgeführt: Zwei Scans mit Scanrichtung parallel zur Schweißfortschrittsrichtung, Einschallung in Richtung +x bzw. in Richtung -x, sowie zwei Scans mit Scanrichtung senkrecht zur Schweißfortschrittsrichtung, Einschallung in Richtung +y bzw. in Richtung -y, siehe Abbildung 6. Die Ultraschalldaten für die verschiedenen Testkörper und Scanrichtungen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Die Ergebnisse bestätigen die bisherigen Erfahrungen, dass die Technik als Methode zum Auffinden von Fehlern im Allgemeinen nicht geeignet ist, insbesondere bei anisotropen, inhomogenen Austenit-Schweißnähten. Die Trennung zwischen Anzeigen aufgrund von Streuung am Interface oder Schweißnahtgefüge sind nur schwer von den Signalen der Beugung an der Rissspitze zu unterscheiden. Da die Längsrisse sich über die gesamte Probenbreite erstrecken, fehlt auch der Vergleich zwischen fehlerbehaftetem und fehlerfreiem Nahtbereich. Nur bei einem Teil der Testkörper lassen sich Ultraschallsignale eindeutig dem Riss zuordnen.

An ausgewählten Testkörpern wurden zusätzlich mechanisierte Ultraschallprüfungen mittels Impuls-Echo-Technik durchgeführt, mit Transversalwellen unter 45° Einschallwinkel bei einer Frequenz von 1 MHz, Abbildung 7. Hier konnten bei Einschallung von der dem Riss zugewandten Seite der Schweißnaht, also bei

Anschallung des Risses durch den Grundwerkstoff alle Fehler nachgewiesen werden. Bei Einschallung durch die Schweißnaht konnten nur die größeren bzw. stark verzweigten Risse eindeutig nachgewiesen werden, d.h. ohne Nutzung der Vorab-Kennntnis über die vorhandenen Fehler war nicht klar zwischen Reflexionen und Rückstreuung von Korngrenzen bzw. Interface einerseits und Reflexionen und Beugung am Fehler andererseits zu unterscheiden. Diese Schwierigkeiten bei der Interpretation der Ultraschallsignale im Bereich der Schweißnaht sind deutlich erkennbar beim Vergleich der Ultraschallprüfung an einer fehlerfreien Schweißnaht mit der Prüfung an rissbehafteten Testkörpern. Die Ultraschall-B-Bilder für die Prüfungen an den Testkörpern TK 5, TK 8 und TK 10 sind in Abbildung 8 bis Abbildung 12 dargestellt. Beim Testkörper TK 5 handelt es sich um einen Testkörper mit fehlerfreiem Schweißnahtbereich und zwei künstlichen Testfehler (Nuten) von 2 mm bzw. 10 mm Tiefe im Grundwerkstoff.

4 Zusammenfassung

Für die Untersuchungen zur Verbesserung der Aussagefähigkeit von Ultraschallprüfungen an austenitischen Schweißnähten und Mischschweißnähten wurden an der MPA Stuttgart verschiedene Ultraschalltestkörper gefertigt bzw. aus MPA-Beständen ausgewählt. Insbesondere wurden in austenitischen Schweißnaht-Testkörpern zahlreiche realistische Ultraschalltestfehler mit unterschiedlicher Fehlertiefe und unterschiedlichem Grad der Verzweigung eingebracht.

Zur Dokumentation der Kornstruktur in der Schweißnaht wurden die Seitenflächen der Austenit-Proben poliert und geätzt. Die eingebrachten realistischen Testfehler – Schwingrisse und interkristalline Spannungskorrosionsrisse – wurden mittels Farbeindringprüfung und Durchstrahlungsprüfung dokumentiert. Um erste Aussagen zur unterschiedlichen Durchschallbarkeit mit Ultraschall und zur Erkennbarkeit von Risspitzen-signalen zu erhalten, wurden Ultraschallprüfungen mit TOFD-Technik durchgeführt, sowie zusätzlich einige Prüfungen mit Impuls-Echo-Technik.

Mittels Metallografie, Eindringprüfung und Röntgendurchstrahlungsprüfung ließen sich die Unterschiede in der Kornstruktur der verschiedenen Schweißnähte sowie die unterschiedlichen Orientierungen und Tiefen der eingebrachten Risse sehr gut darstellen.

Die Ultraschallprüfung in Impuls-Echo-Technik lieferte ein sehr gutes Nachweisvermögen für Fehler in der Wärmeeinflusszone bei Einschallung von der dem Fehler zugewandten Seite (durch den Grundwerkstoff); bei Prüfung durch die Schweißnaht erwies sich vor allem bei kleinen Fehlern die Unterscheidung zwischen den Signalen von Interface-Reflexion und Riss als problematisch. Bei der TOFD-Technik bestätigte sich,

dass diese lediglich als Analysetechnik zur Ermittlung der Fehlertiefe von bereits detektierten Rissen eingesetzt werden sollte. Für die untersuchten austenitischen Schweißnähte bestand auch bei bekannter Rissposition die Herausforderung darin, Signale der Beugung an der Rissspitze von Signalen aus der Streuung im Schweißnahtgefüge zu trennen.

5 Literatur

- [1] F. Walte, C. Schurig. Untersuchungen zum Leistungsstand moderner Ultraschallverfahren, zum Fehlernachweis und zur Größenbestimmung für bestehende und hinsichtlich Prüfbarkeit optimierte austenitische Schweißnähte im Primärkreis von KKW's. BMBF- RS 1500931, IZFP (1995), Berichts Nr. 950168-TW, Austenit I- Projekt.
- [2] B. Köhler, C. Schurig, F. Walte. Modellbasierte Bewertung von Ultraschall- Prüfungssignalen zur Optimierung von Prüfparametern für die Ultraschallprüfung fehlerbehafteter Schweißnähte in austenitischen Bauteilen des Primärkreises von KKW's. BMBF- RS 1501024, IZFP (2001), Berichts Nr. 010324- TW, Austenit II- Projekt.
- [3] B. Köhler, V. Schmitz, M. Spies. Modellbasierte Verifikation der in den Projekten Austenit I und II entwickelten Methoden zur Verbesserung der realen Ultraschallprüfung austenitischer Schweißnähte durch ihre Anwendung auf eine reale Schweißnaht mit einem Fehler. BMBF- RS 1501231, IZFP (2004), Berichts Nr. 040118- TW, Austenit III- Projekt.
- [4] U. Mletzko, S. Zickler: „Erste Bewertung der Aussagesicherheit von zerstörungsfreien Prüfungen an Mischschweißverbindungen auf Querrisse“, BMU Vorhaben SR 2501, Technischer Bericht 1.1, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA), 2007

6 Abbildungen und Tabellen

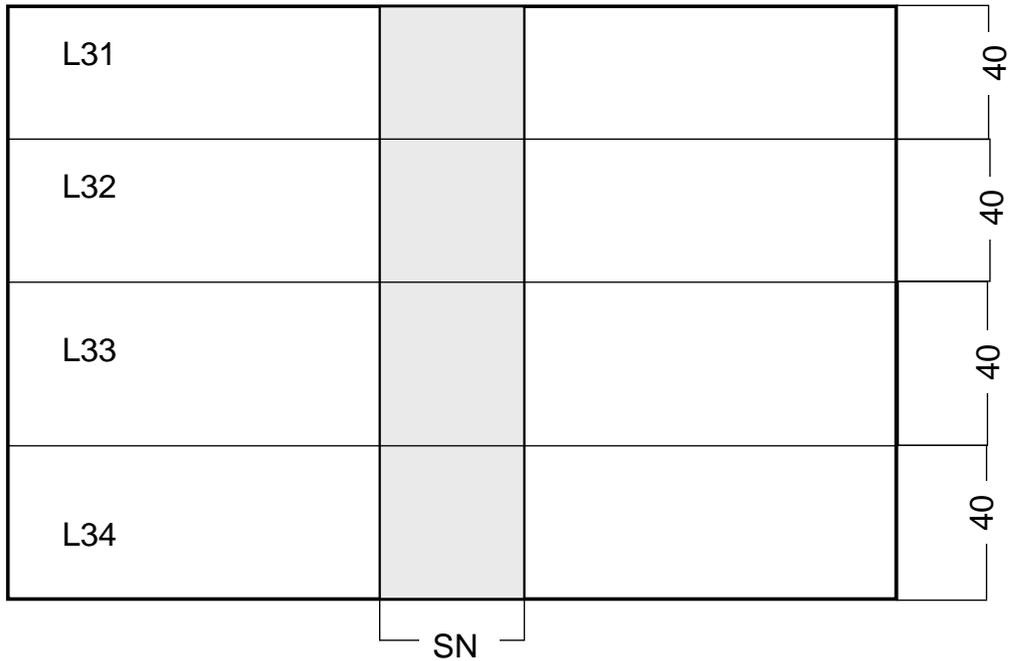


Abbildung 1: Schematische Skizze einer geschweißten Austenit-Platte (Ansicht von oben) und Sägeschnitte für die quaderförmigen Austenit-Testkörper 31 bis 34.

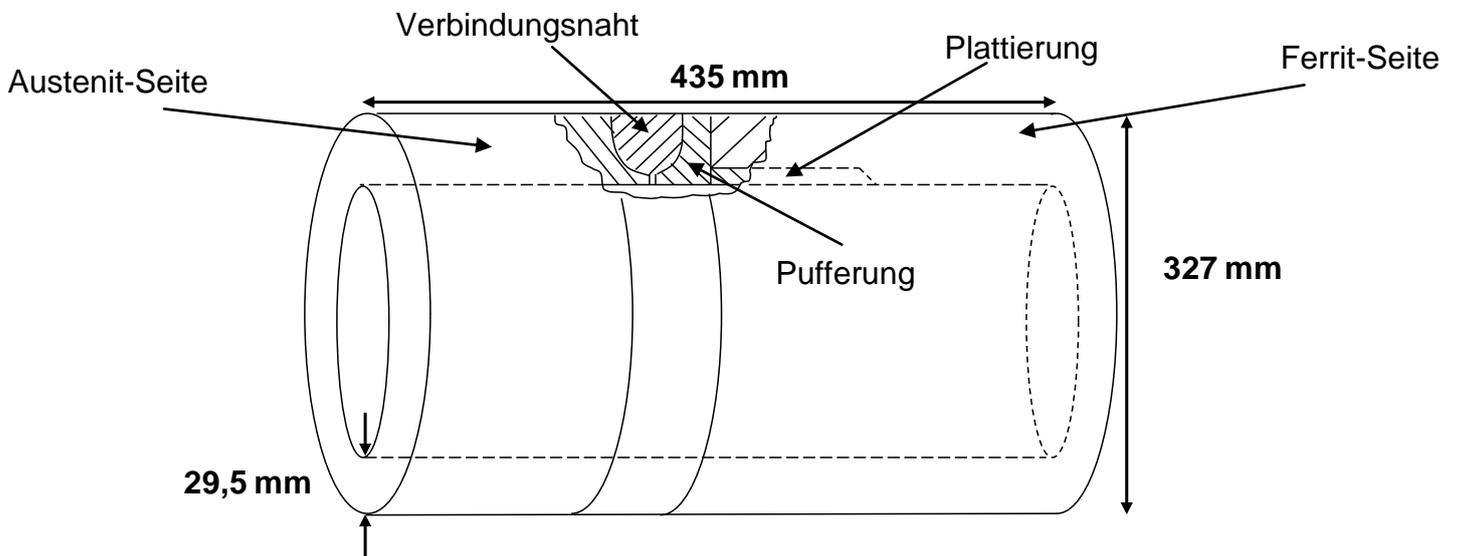


Abbildung 2: Skizze Mischnaht-Testkörper – Abmessungen, Schweißnaht

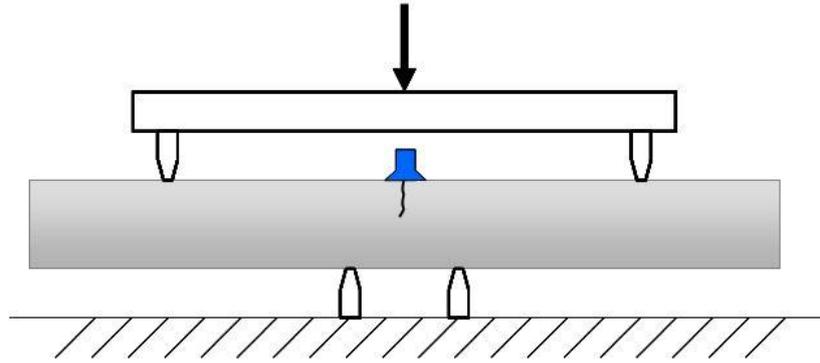


Abbildung 3: Anordnung zur Fehlereinbringung interkristalliner Spannungskorrosionsrisse (4-Punkt-Biegung mit korrosivem Medium)

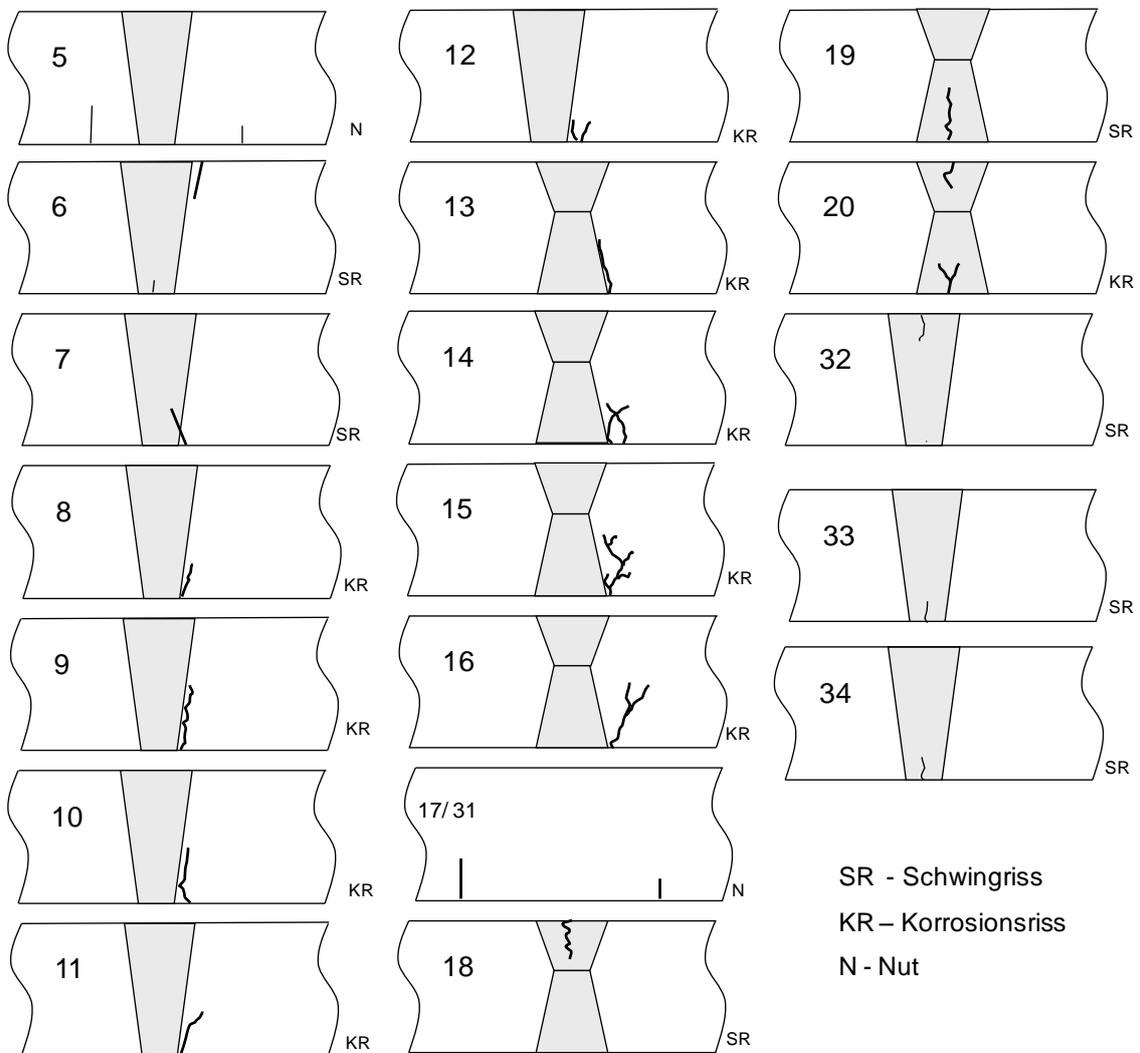


Abbildung 4: Übersicht Testfehler in den Austenit-Testkörpern

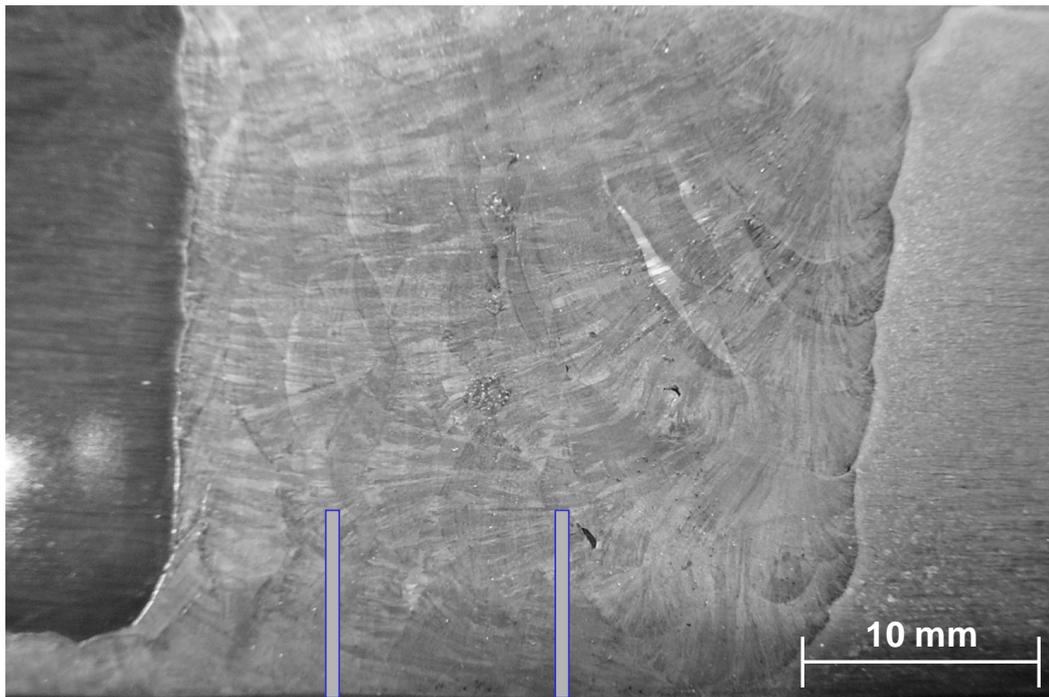


Abbildung 5: Schliffbild Mischnaht [4] mit Positionen der Testfehler (Nuten im Schweißgut, Rohrinenseite)

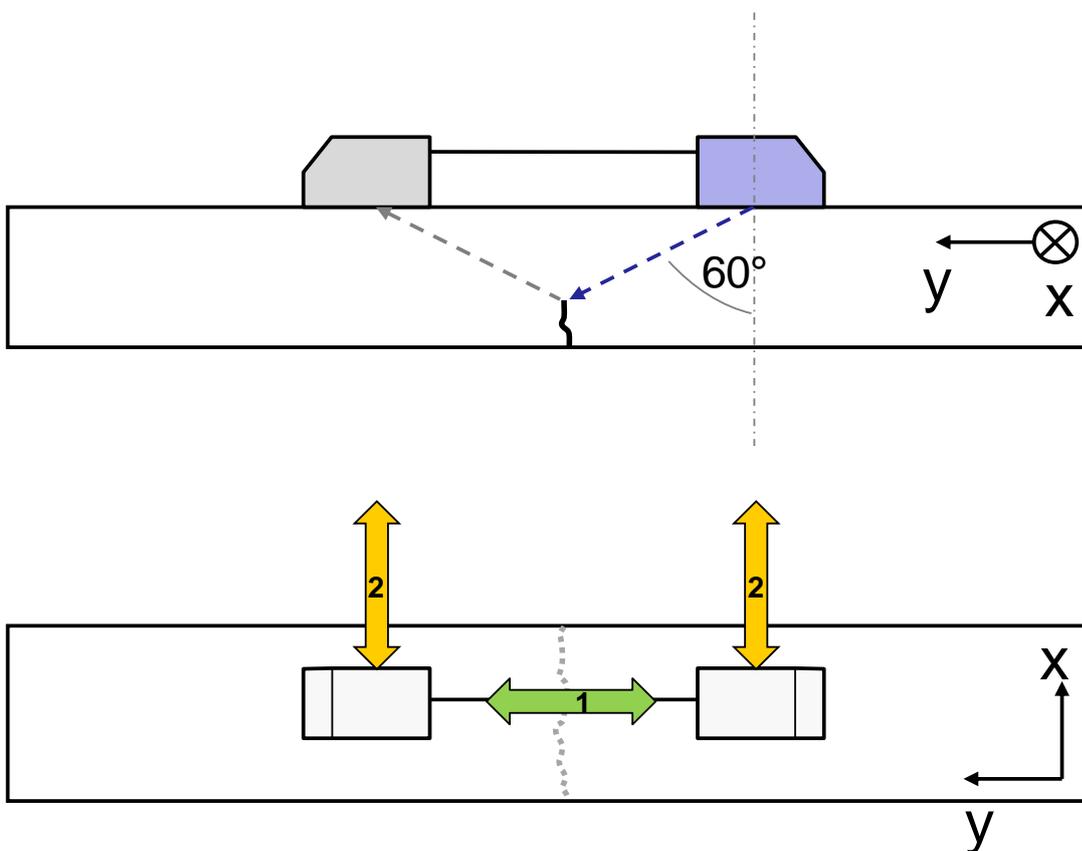


Abbildung 6: Prüfanordnung Ultraschall-TOFD Prüfungen; Seitenansicht (oben) und Ansicht von oben (unten) mit Angabe der Scanrichtungen 1(senkrecht zur Schweißnaht) und 2 (parallel zur Schweißnaht)

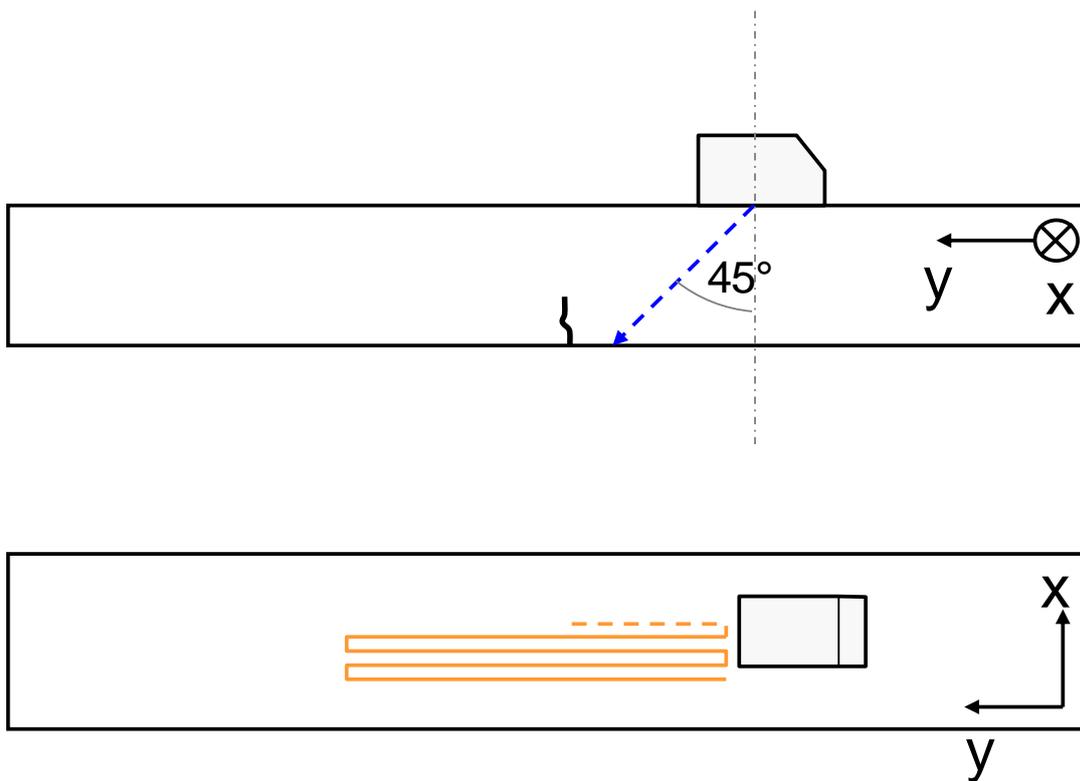


Abbildung 7: Prüfanordnung Ultraschall-Impuls-Echo Prüfungen; Seitenansicht (oben) und Ansicht von oben (unten) mit schematischer Darstellung des Mäander-Scans

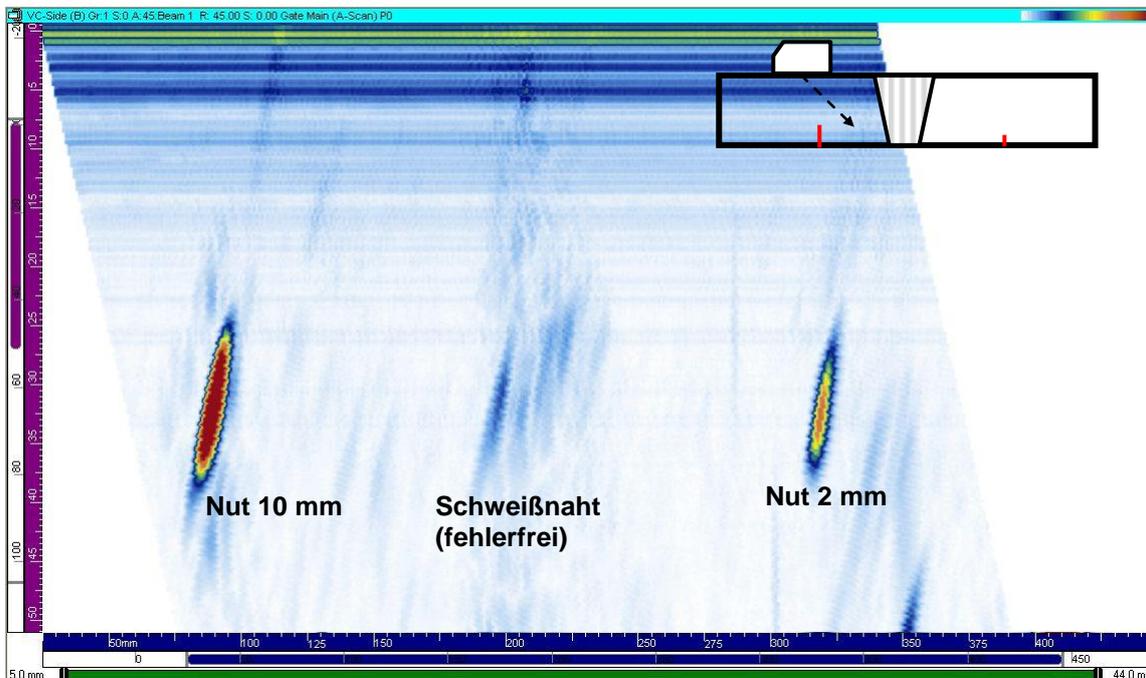


Abbildung 8: Austenit Testkörper TK 5, Ultraschall-Impuls-Echo mit 45° Transversalwelle, B-Bild (Seitenansicht)

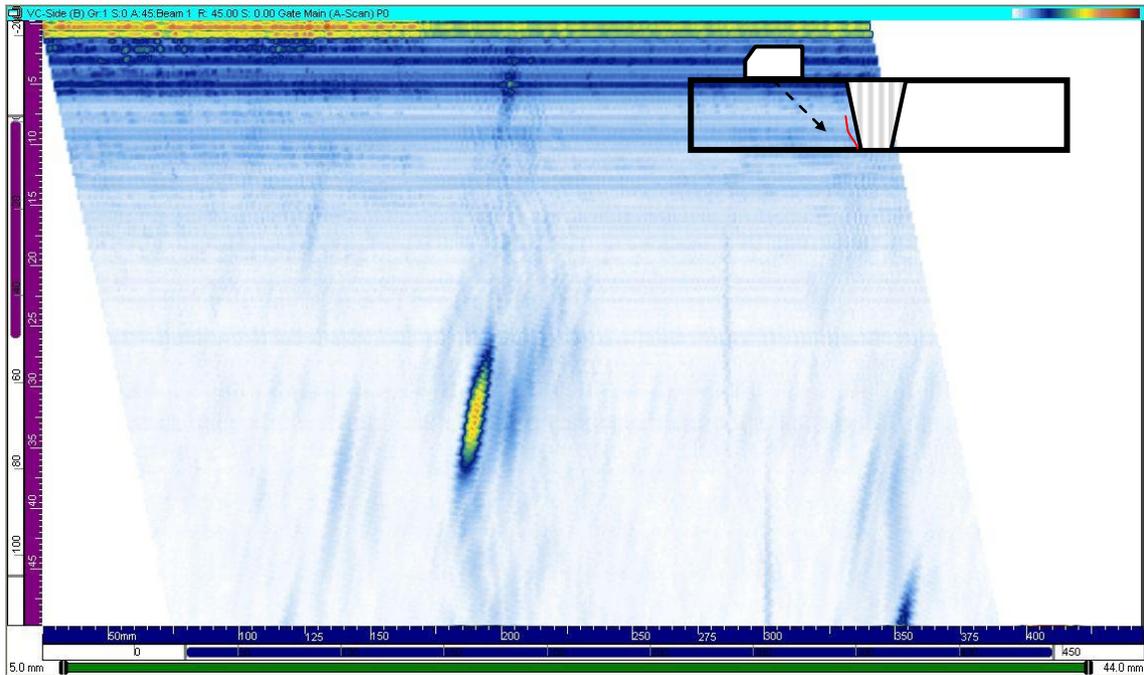


Abbildung 9: Austenit-Testkörper TK 8, Ultraschall-Impuls-Echo mit 45° Transversalwelle, B-Bild (Seitenansicht), Riss-Anschallung durch den Grundwerkstoff

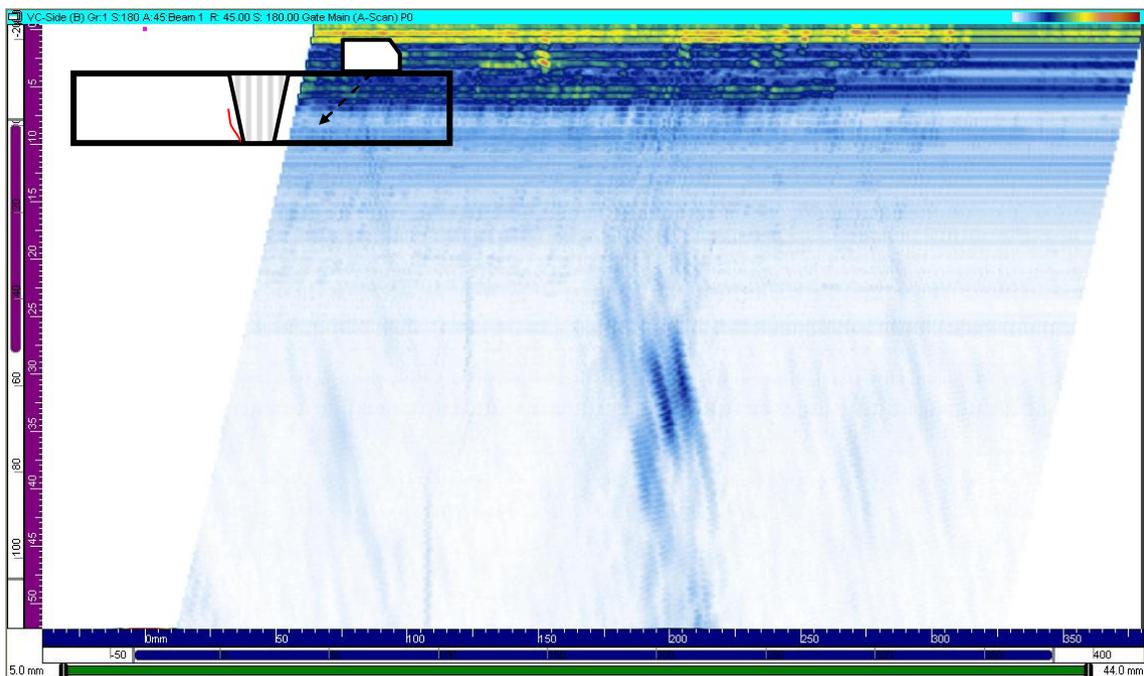


Abbildung 10: Austenit-Testkörper TK 8, Ultraschall-Impuls-Echo mit 45° Transversalwelle, B-Bild (Seitenansicht), Riss-Anschallung durch die Schweißnaht

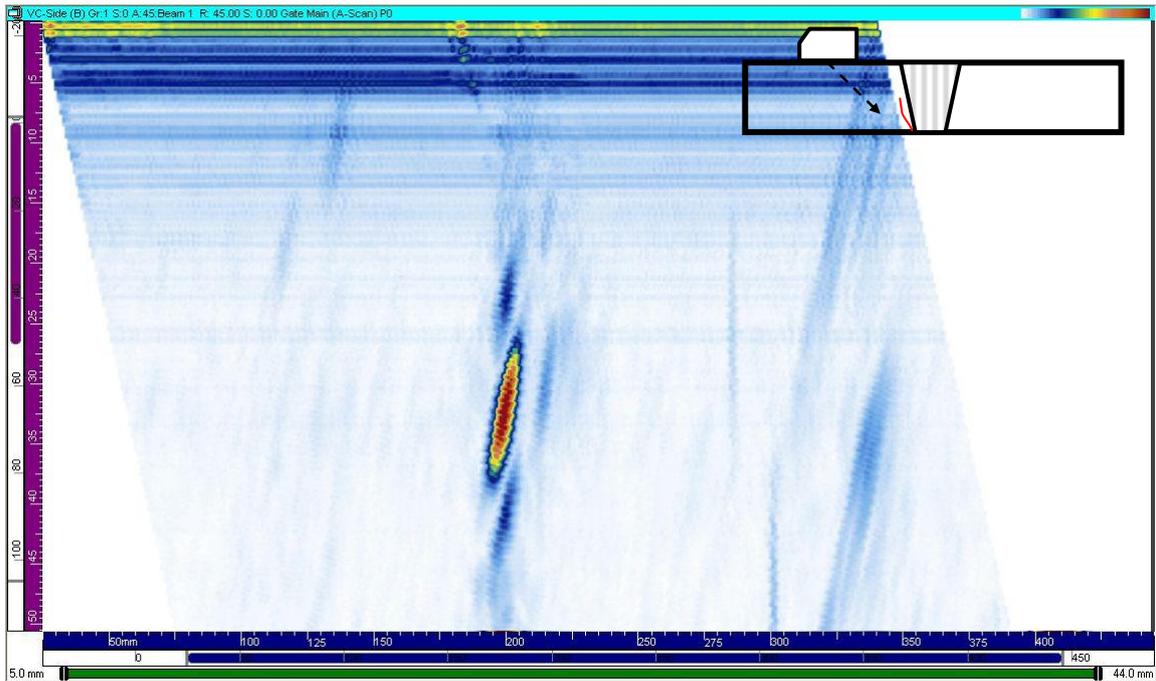


Abbildung 11: Austenit-Testkörper TK 10, Ultraschall-Impuls-Echo mit 45° Transversalwelle, B-Bild (Seitenansicht), Riss-Anschallung durch den Grundwerkstoff

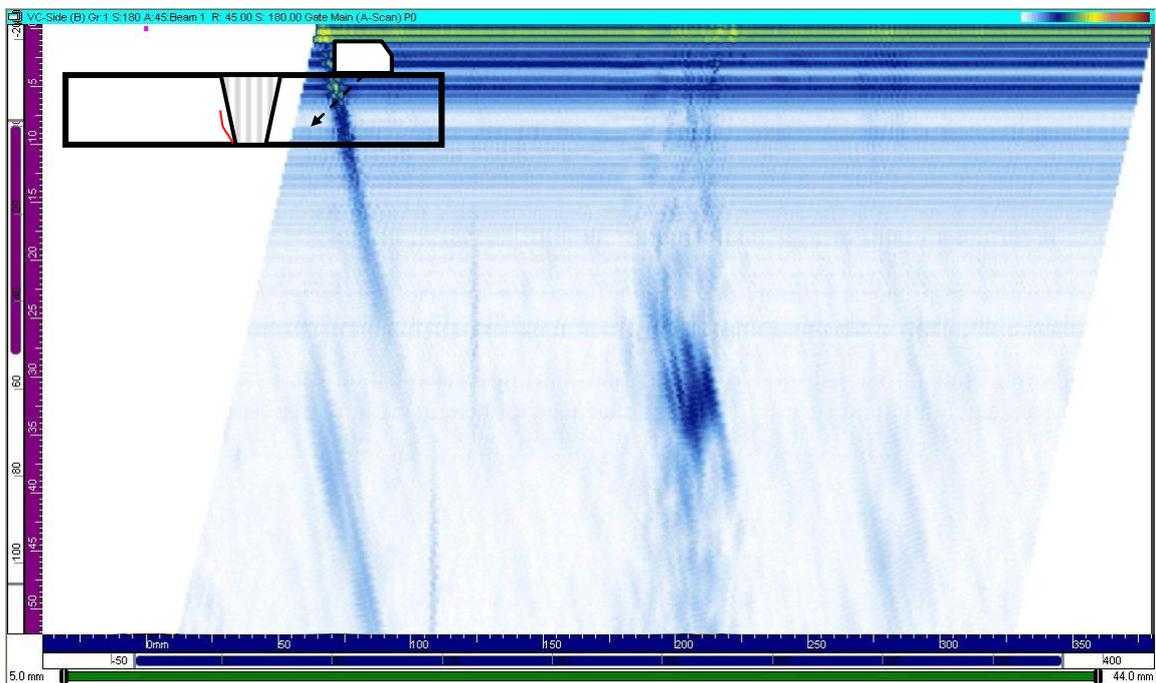
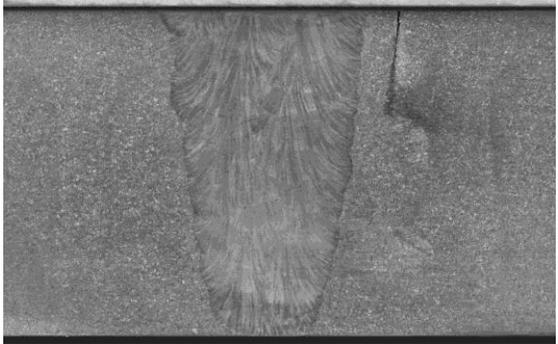
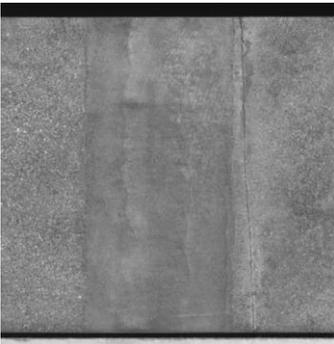
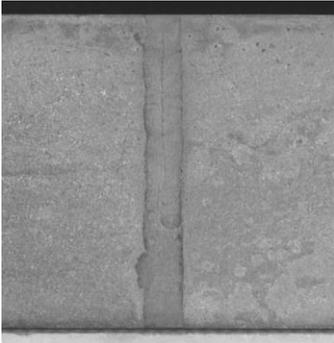
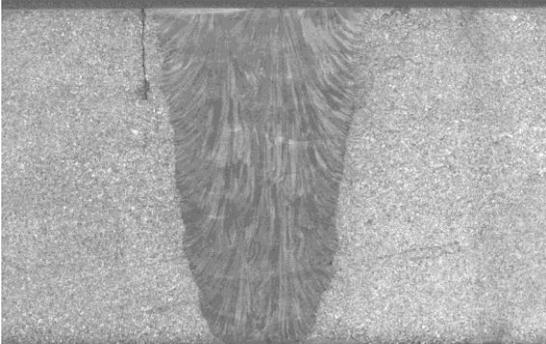
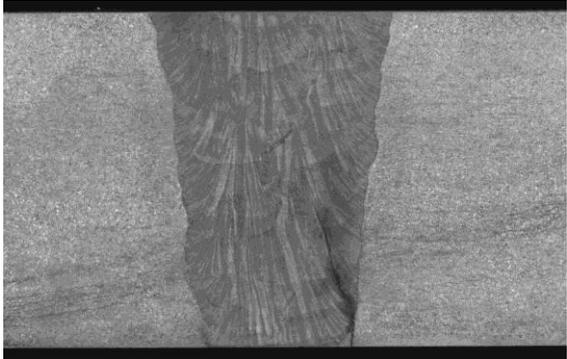
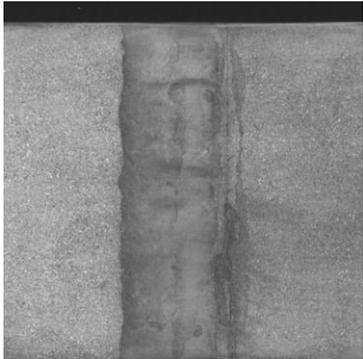
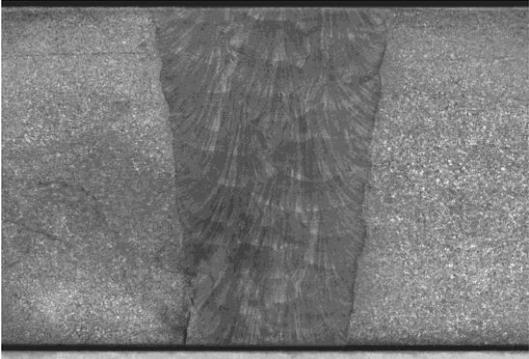
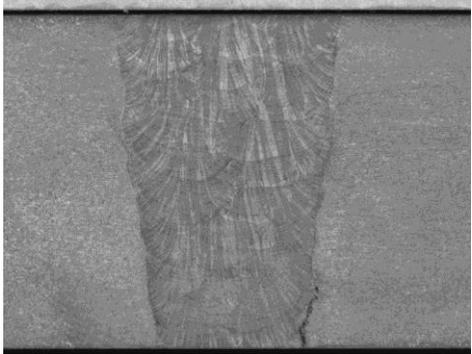
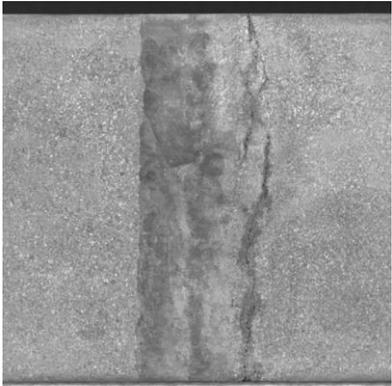
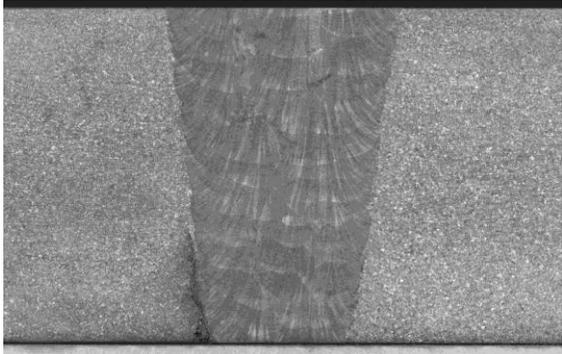
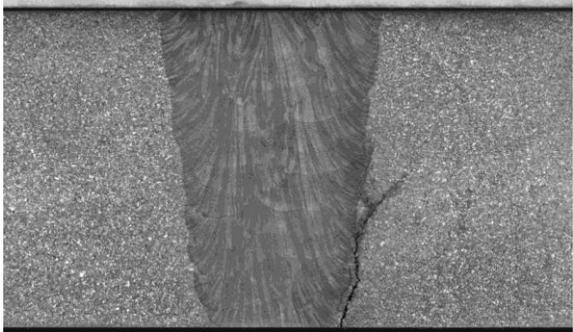
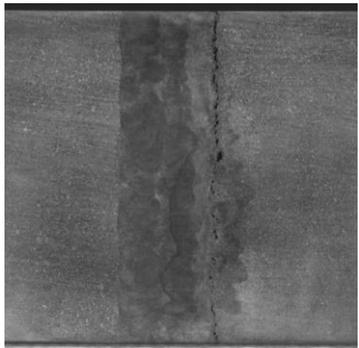
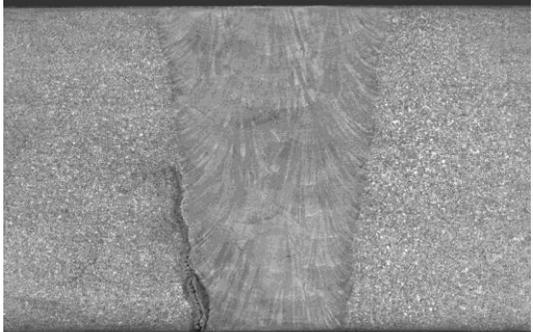
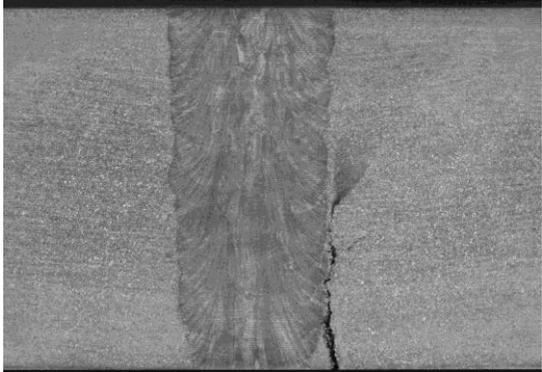
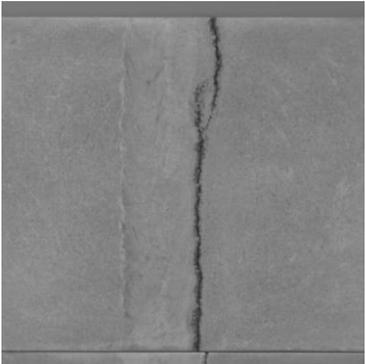
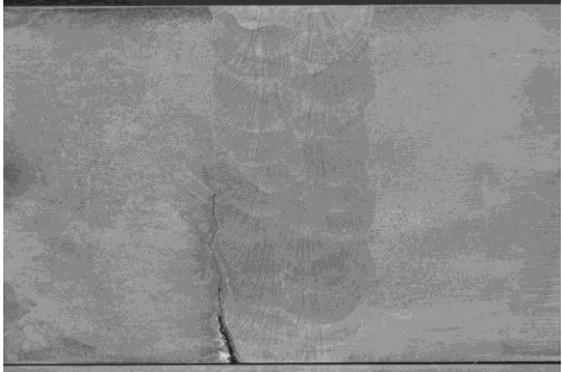
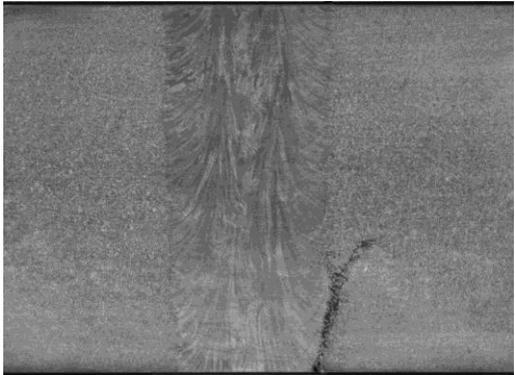
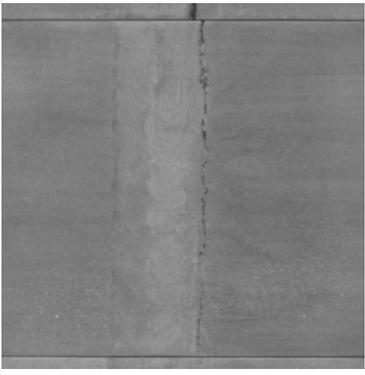
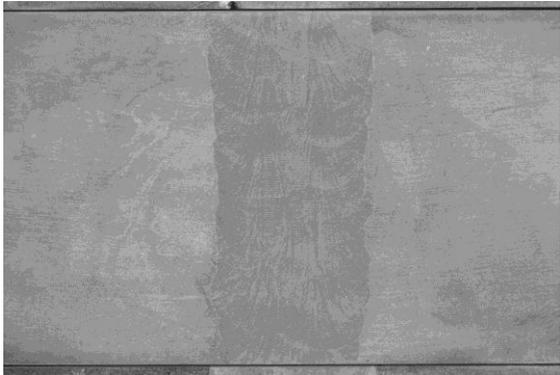
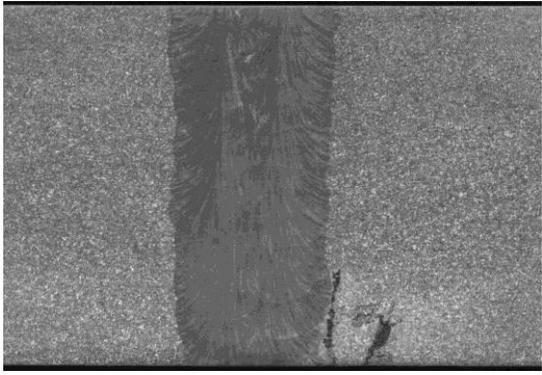
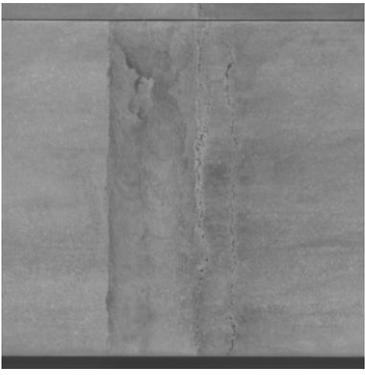
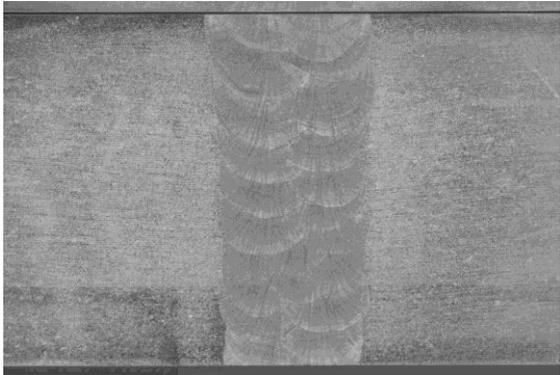
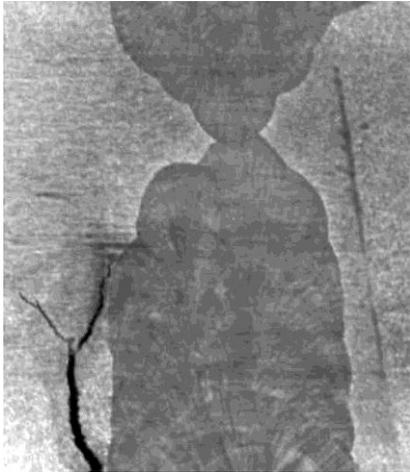


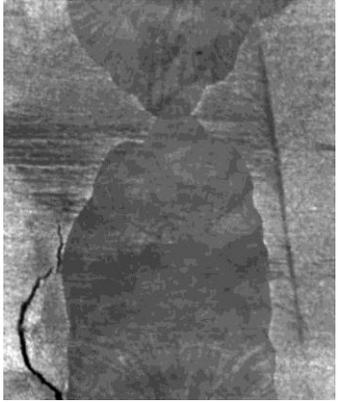
Abbildung 12: Austenit-Testkörper TK 10, Ultraschall-Impuls-Echo mit 45° Transversalwelle, B-Bild (Seitenansicht), Riss-Anschallung durch die Schweißnaht

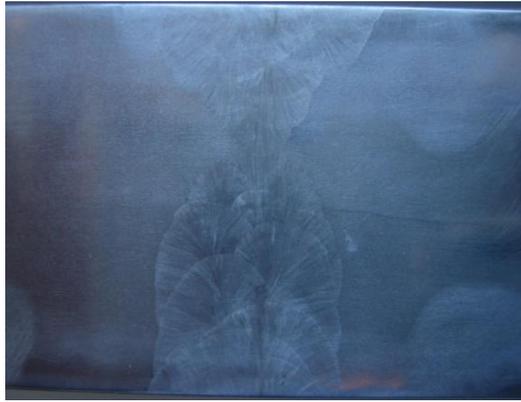
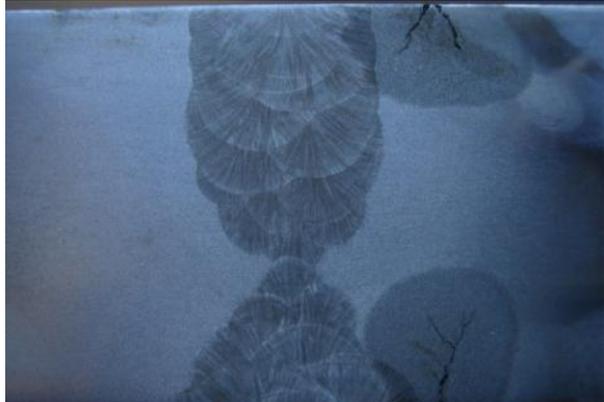
Tabelle 1: Übersicht Metallografie an Austenit-Testkörpern mit realistischen Fehlern

Testkörper-Nr.	Linke Seite	Decklagenseite (D) Wurzelseite (W)	Rechte Seite
TK 6		  <p>D</p> <p>W</p>	
TK 7		 <p>W</p>	

TK 8	 Micrograph showing a central vertical crack in a metal specimen. The crack is surrounded by a fan-shaped region of fine, parallel lines, likely representing slip bands or dislocations. The background has a fine, granular texture.	 Micrograph showing a vertical crack in a metal specimen. The crack is surrounded by a fan-shaped region of fine, parallel lines. The background has a fine, granular texture. A small 'W' is visible at the bottom right corner.	 Micrograph showing a central vertical crack in a metal specimen. The crack is surrounded by a fan-shaped region of fine, parallel lines. The background has a fine, granular texture.
TK 9	 Micrograph showing a central vertical crack in a metal specimen. The crack is surrounded by a fan-shaped region of fine, parallel lines. The background has a fine, granular texture.	 Micrograph showing a vertical crack in a metal specimen. The crack is surrounded by a fan-shaped region of fine, parallel lines. The background has a fine, granular texture. A small 'W' is visible at the bottom right corner.	 Micrograph showing a central vertical crack in a metal specimen. The crack is surrounded by a fan-shaped region of fine, parallel lines. The background has a fine, granular texture.
TK 10	 Micrograph showing a central vertical crack in a metal specimen. The crack is surrounded by a fan-shaped region of fine, parallel lines. The background has a fine, granular texture.	 Micrograph showing a vertical crack in a metal specimen. The crack is surrounded by a fan-shaped region of fine, parallel lines. The background has a fine, granular texture. A small 'W' is visible at the bottom right corner.	 Micrograph showing a central vertical crack in a metal specimen. The crack is surrounded by a fan-shaped region of fine, parallel lines. The background has a fine, granular texture.

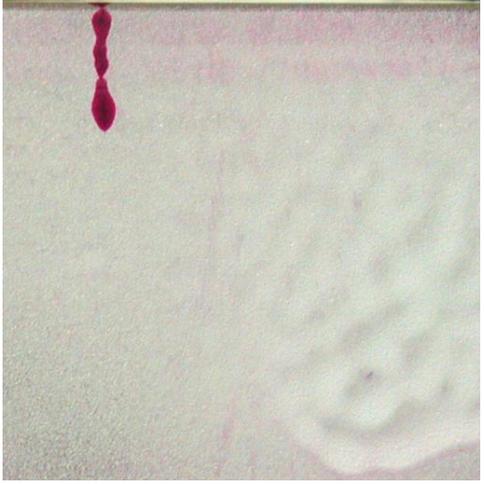
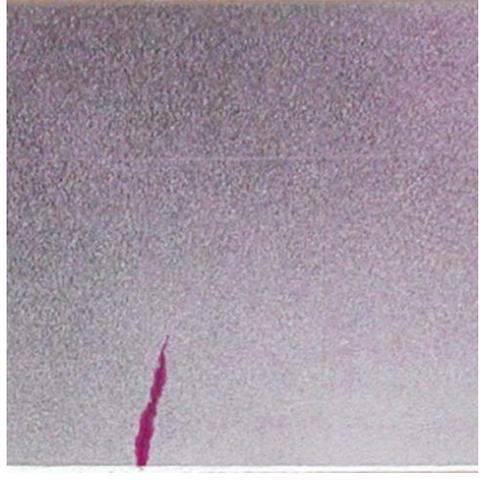
TK 11		 W	
TK 12		 W	
TK 13		<p>-</p>	

TK 14		-	
TK 15		-	
TK 16		-	

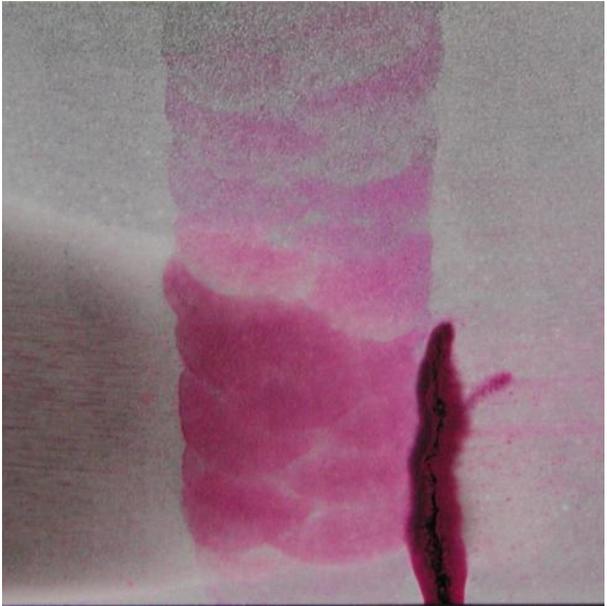
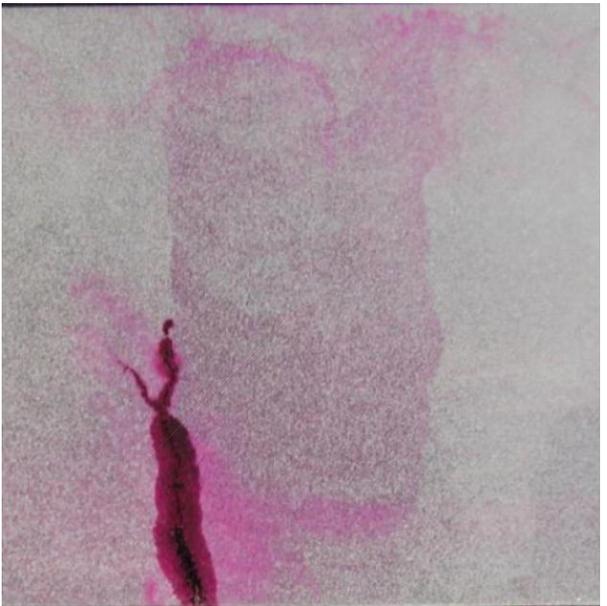
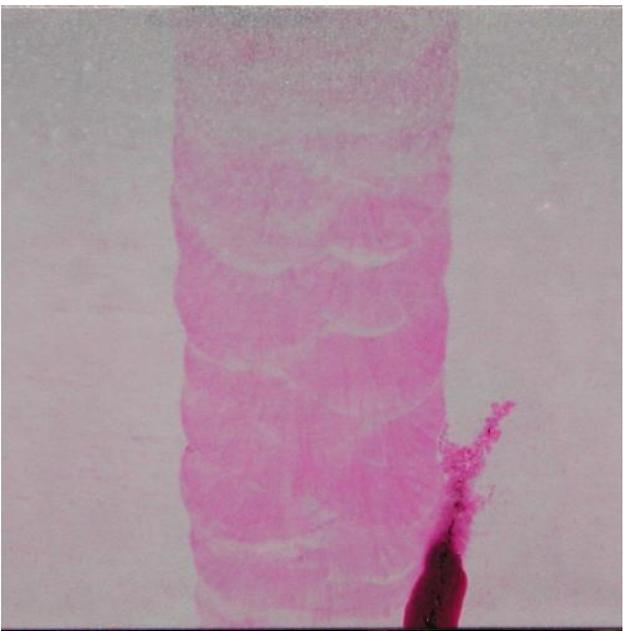
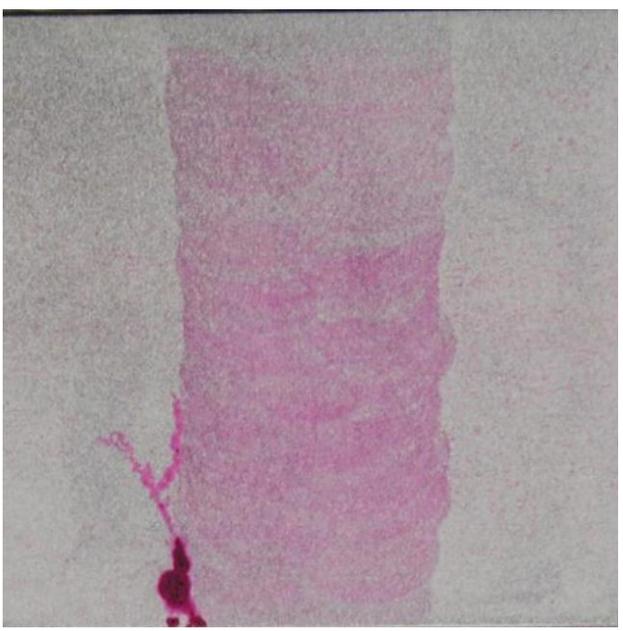
TK 18		-	
TK 19		-	
TK 20		-	

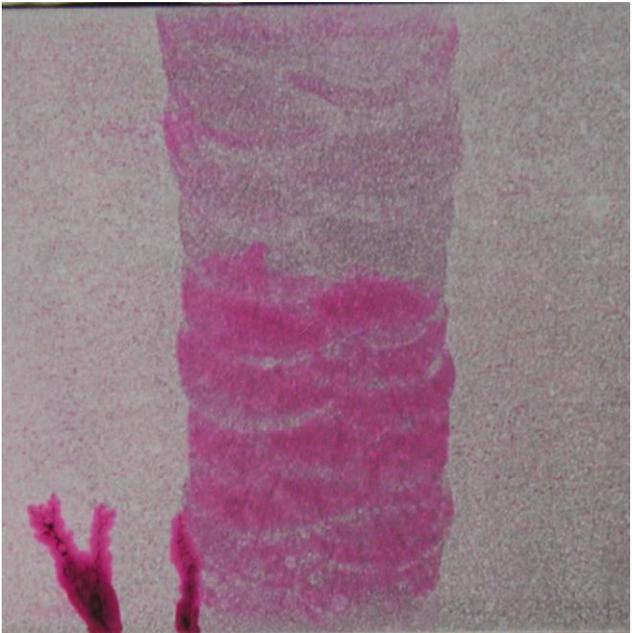
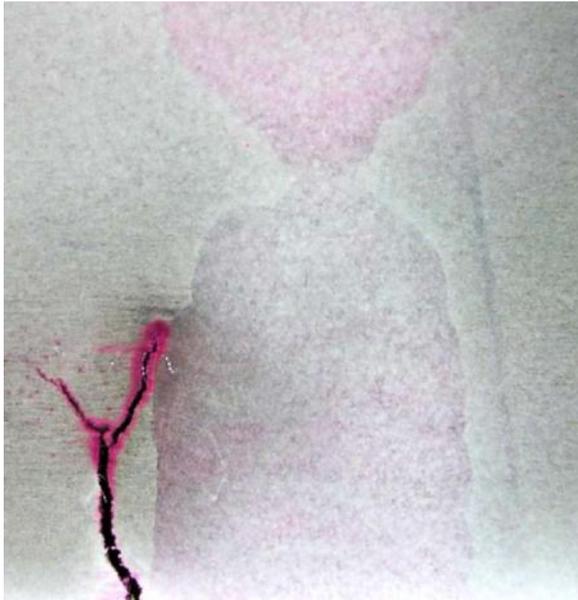
TK 32		-	
TK 33		-	
TK34		-	

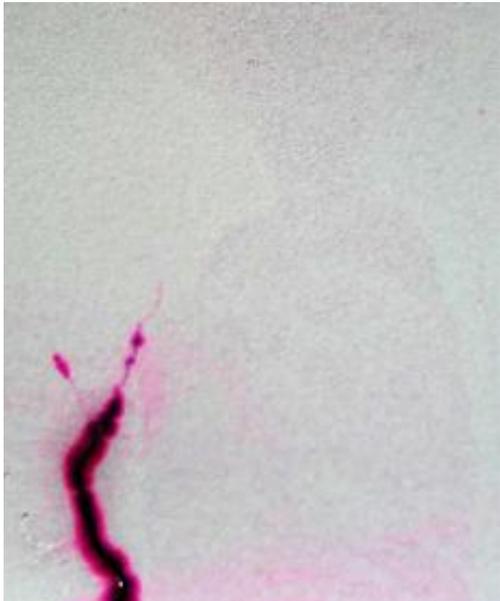
Tabelle 2: Eindringprüfung an Austenit-Testkörpern mit realistischen Fehlern: Dargestellt ist die jeweilige Seitenfläche über die gesamte Probendicke (32 mm)

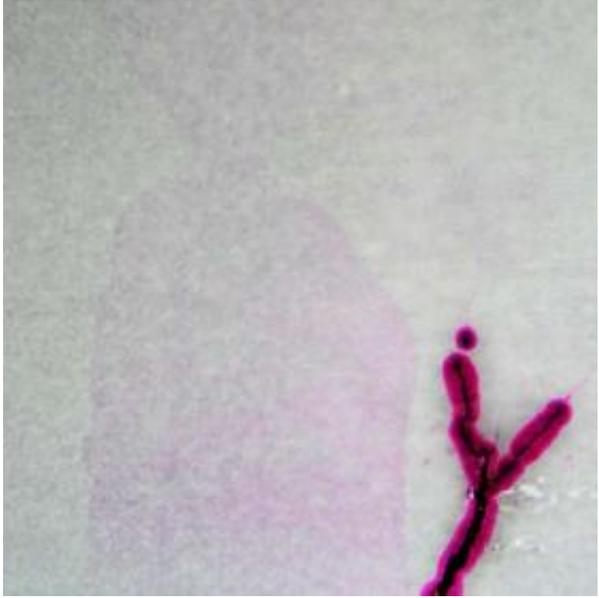
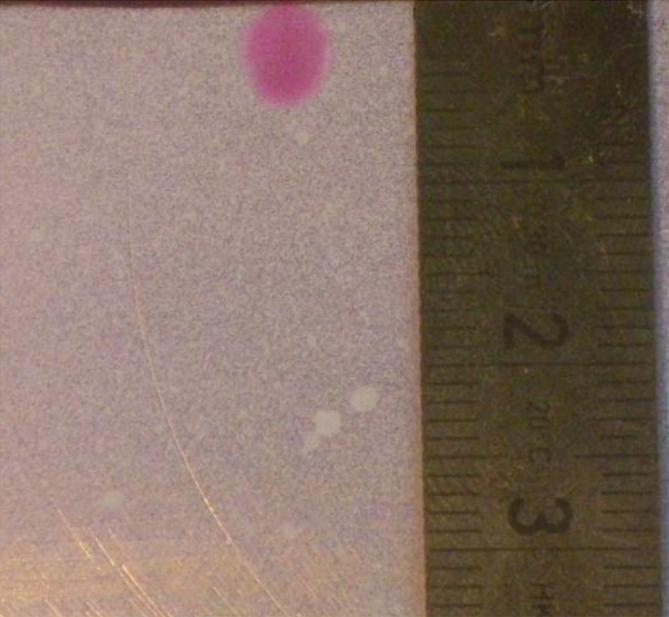
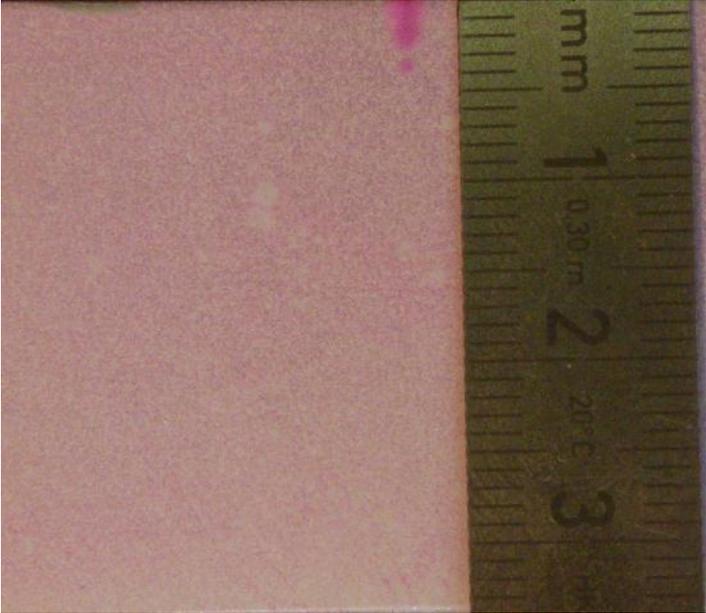
Testkörper-Nr.	Linke Seite	Rechte Seite
TK 6		
TK 7		

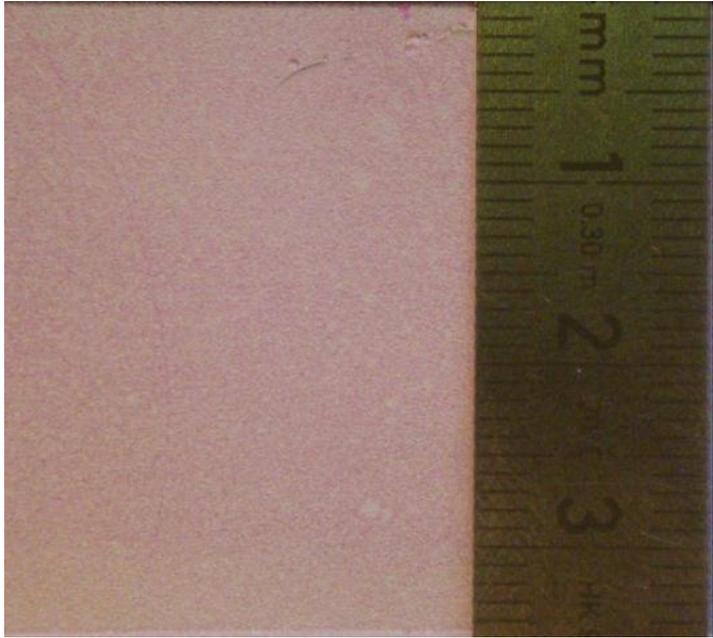
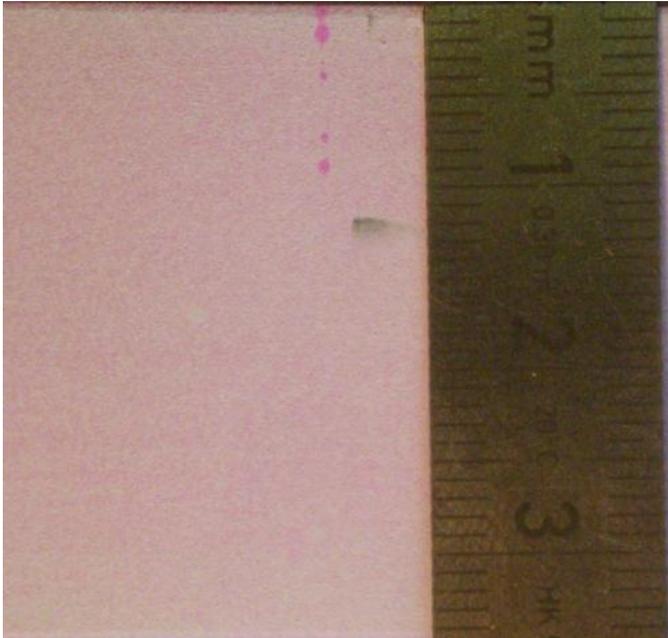
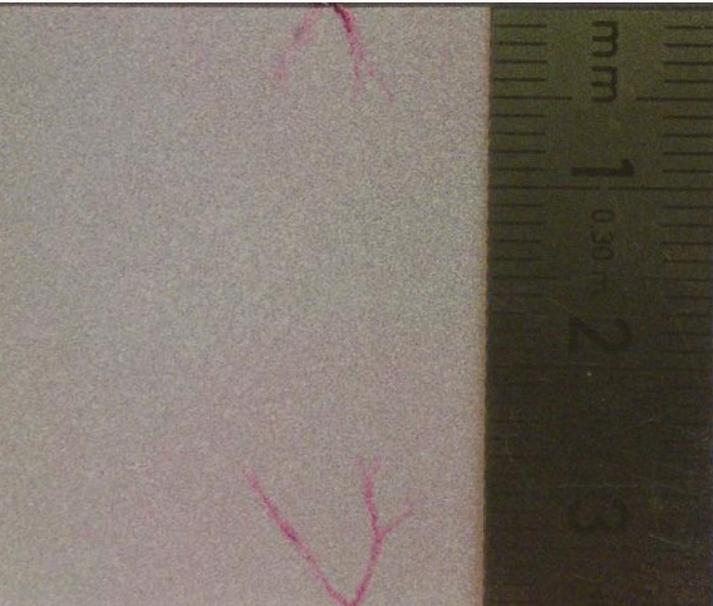
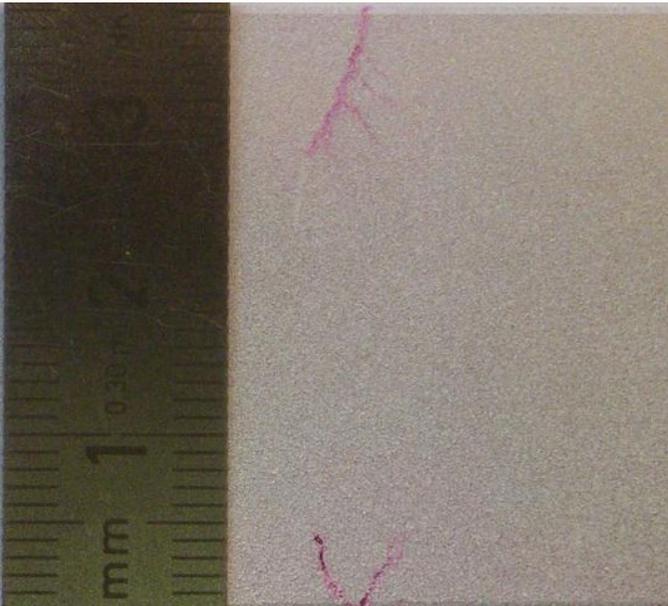
TK 8		
TK 9		

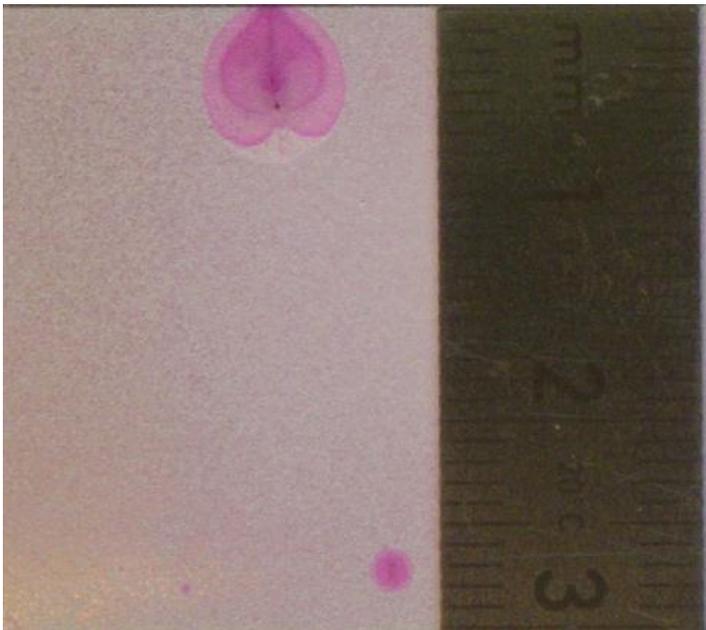
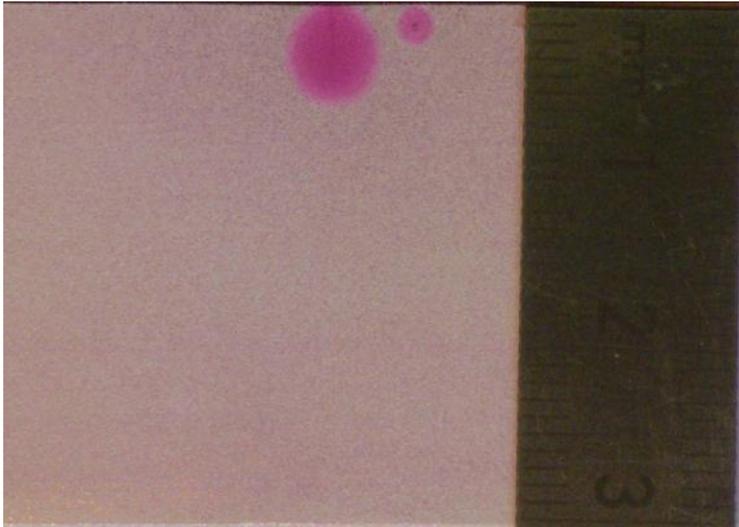
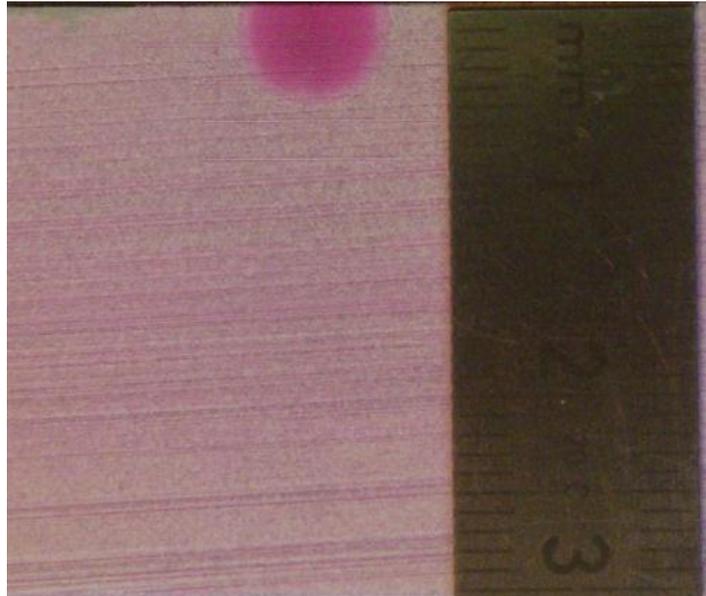
TK 10	 Micrograph showing a metal surface with a pink dye application. A dark, vertical crack is visible on the right side of the image, extending from the bottom towards the middle. The dye is applied in a somewhat irregular, vertical band.	 Micrograph showing a metal surface with a pink dye application. A dark, vertical crack is visible on the left side of the image, extending from the bottom towards the middle. The dye is applied in a somewhat irregular, vertical band.
TK 11	 Micrograph showing a metal surface with a pink dye application. A dark, vertical crack is visible on the right side of the image, extending from the bottom towards the middle. The dye is applied in a somewhat irregular, vertical band.	 Micrograph showing a metal surface with a pink dye application. A dark, vertical crack is visible on the left side of the image, extending from the bottom towards the middle. The dye is applied in a somewhat irregular, vertical band.

TK 12		
TK 13		

TK 14		
TK 15		

TK 16		
TK 18		

TK 19	 Micrograph showing a light-colored, fine-grained surface. A vertical ruler is visible on the right side, with markings for 1, 2, and 3 mm. The surface appears relatively smooth with some minor texture.
	 Micrograph showing a light-colored, fine-grained surface. A vertical ruler is visible on the right side, with markings for 1, 2, and 3 mm. The surface shows some small, dark spots and a slight texture.
TK 20	 Micrograph showing a light-colored, fine-grained surface. A vertical ruler is visible on the right side, with markings for 1, 2, and 3 mm. The surface has a distinct, branching, pinkish-red pattern.
	 Micrograph showing a light-colored, fine-grained surface. A vertical ruler is visible on the right side, with markings for 1, 2, and 3 mm. The surface has a distinct, branching, pinkish-red pattern, similar to the left view.

TK 32		
TK 33		

TK34

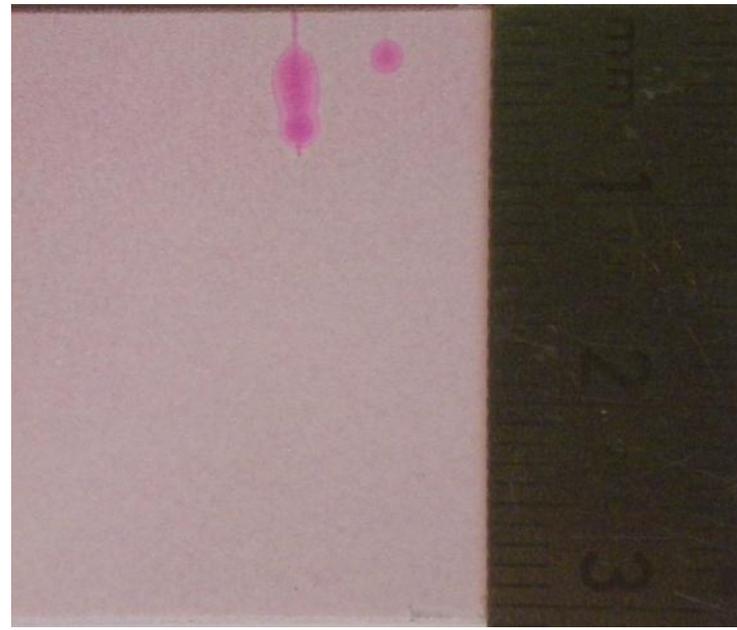
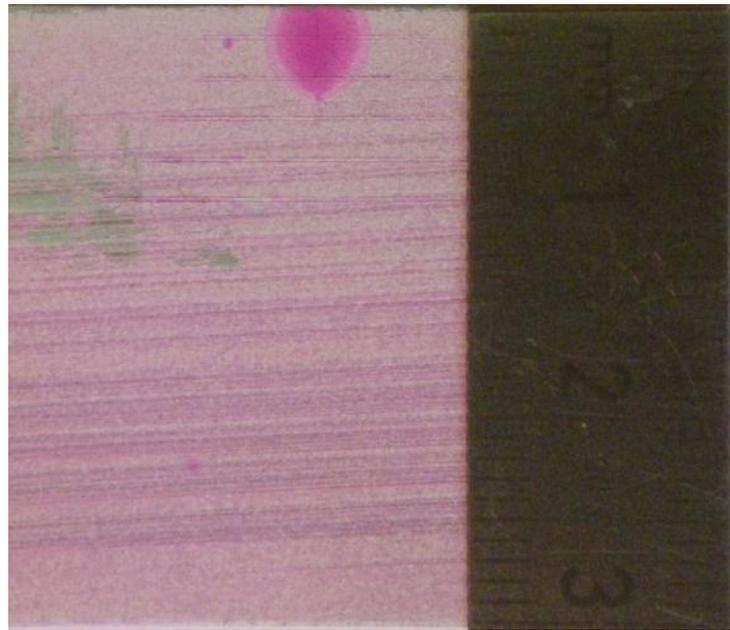
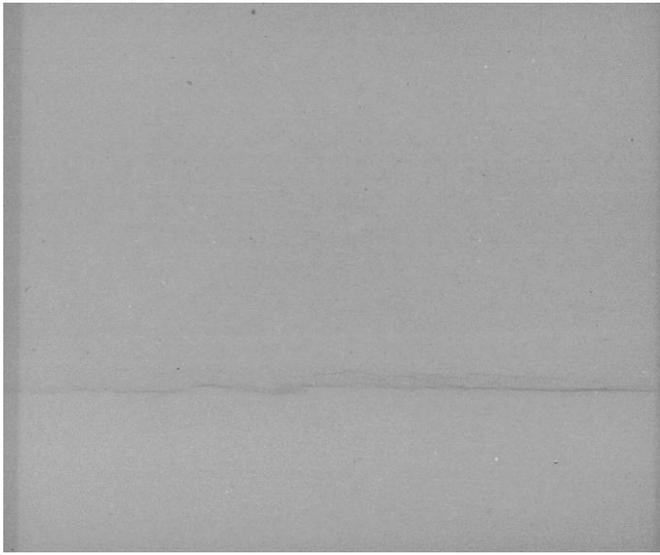
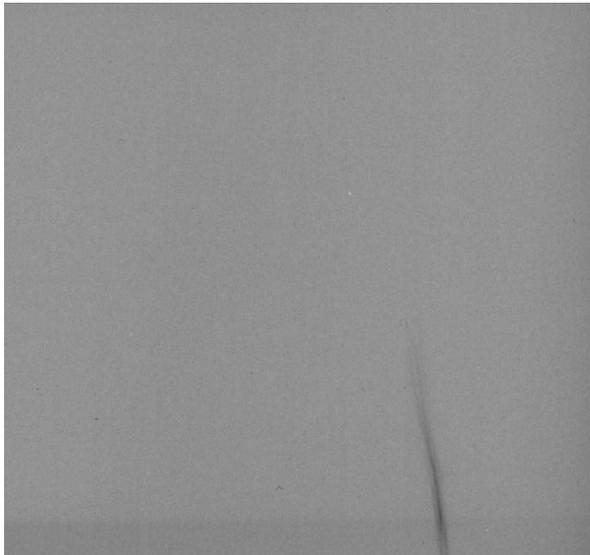
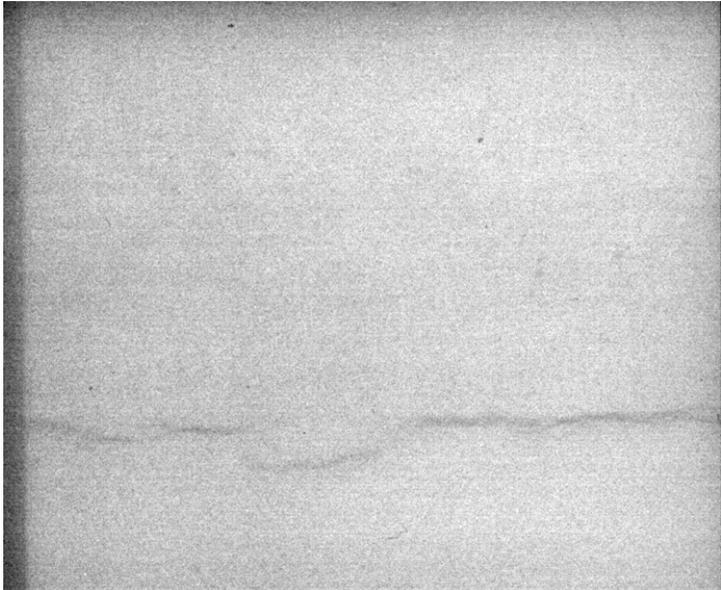
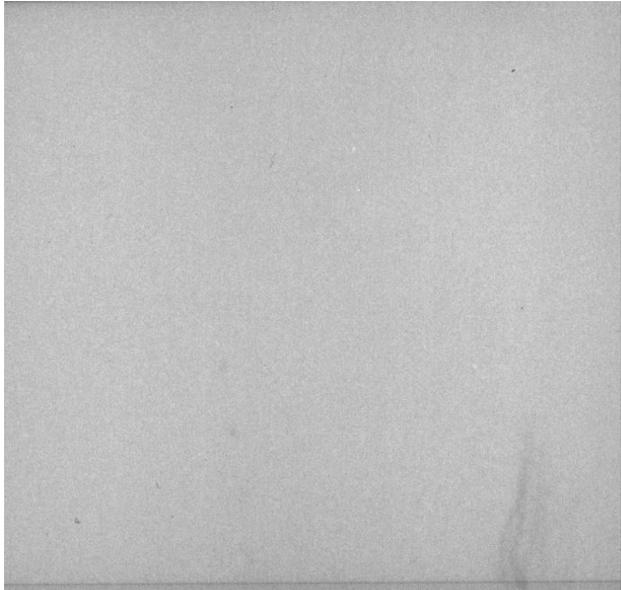
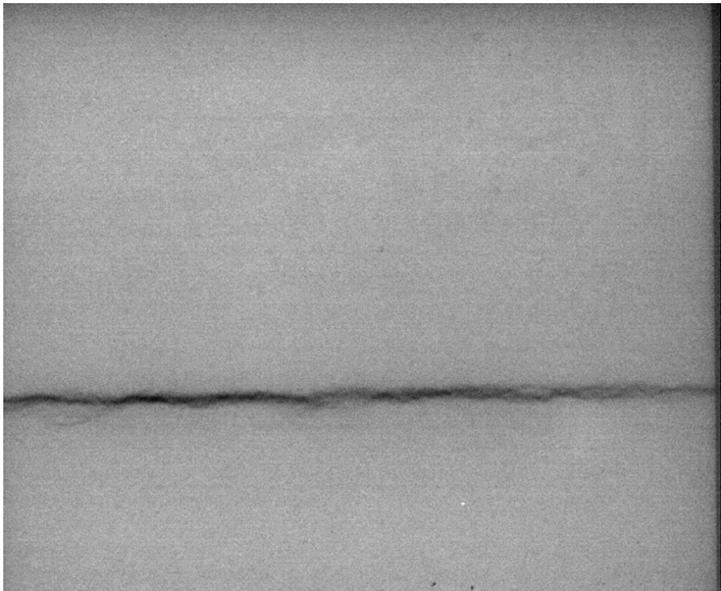
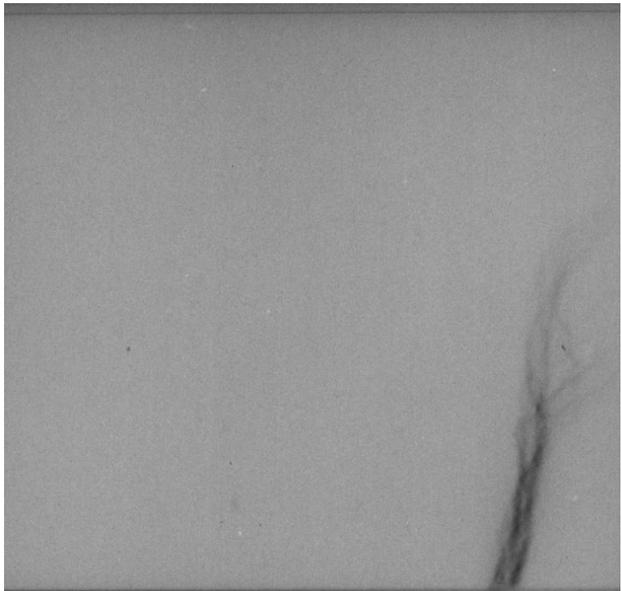
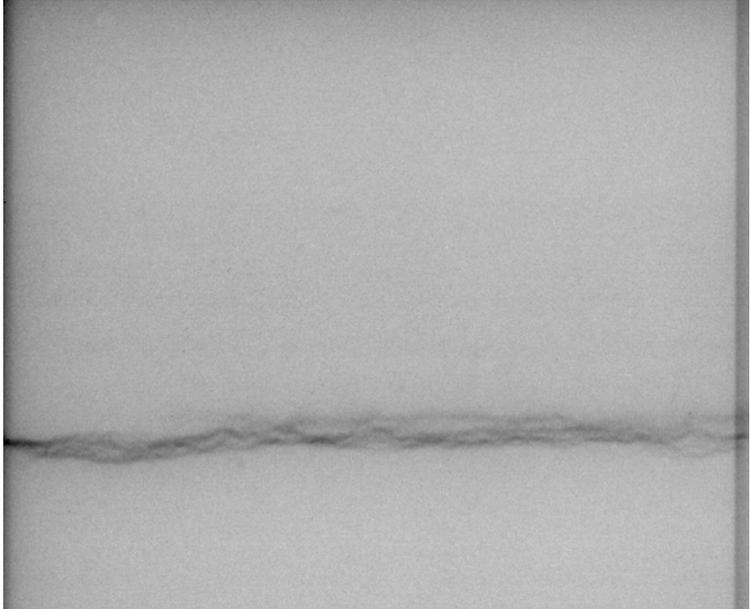
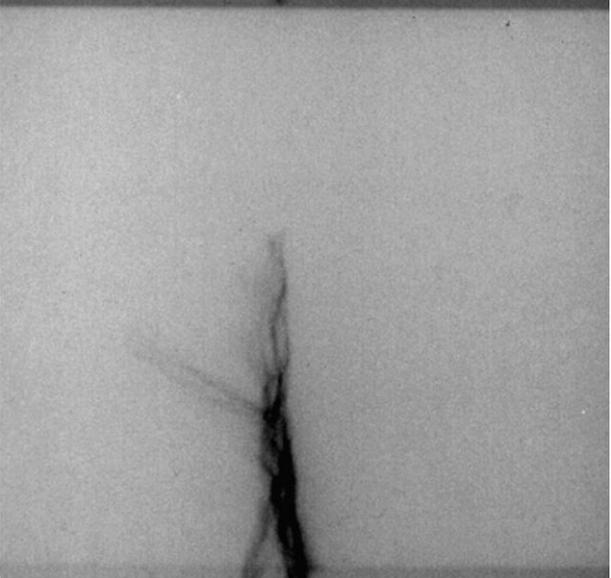
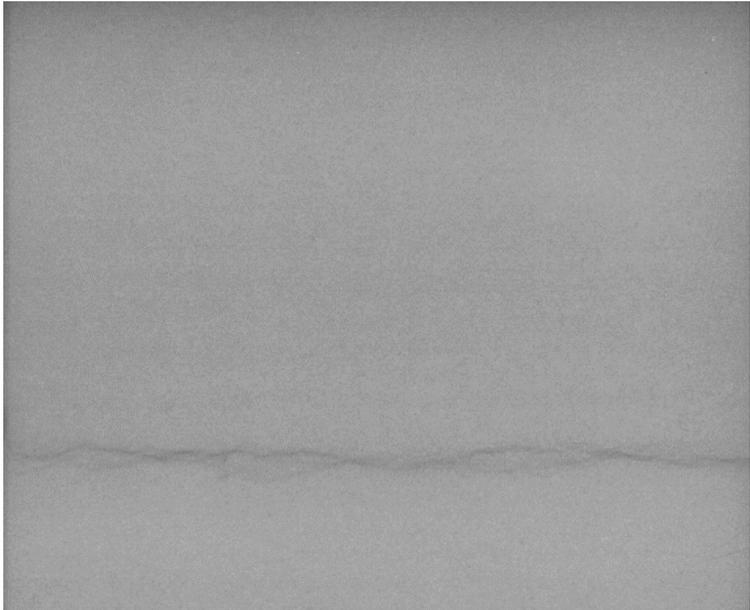
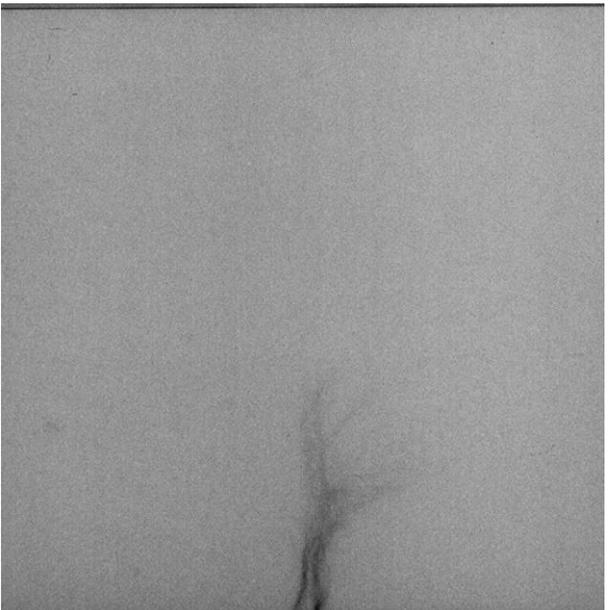
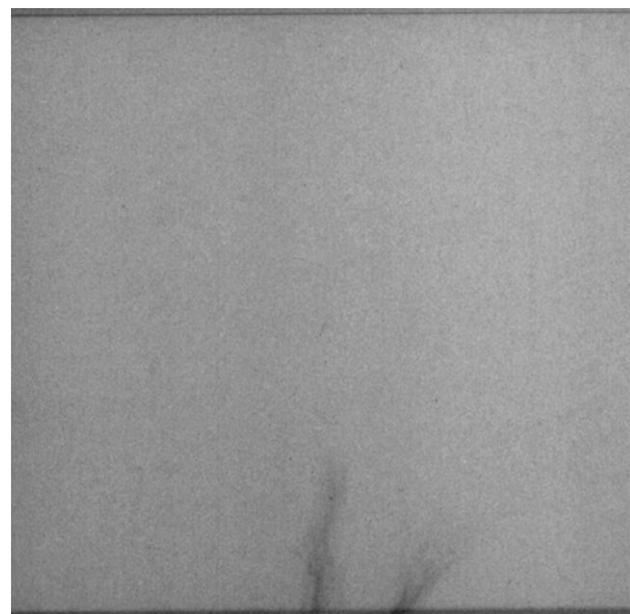
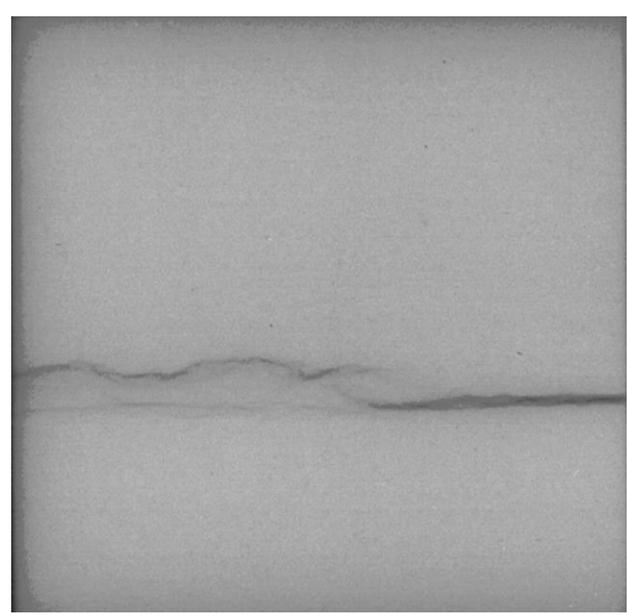
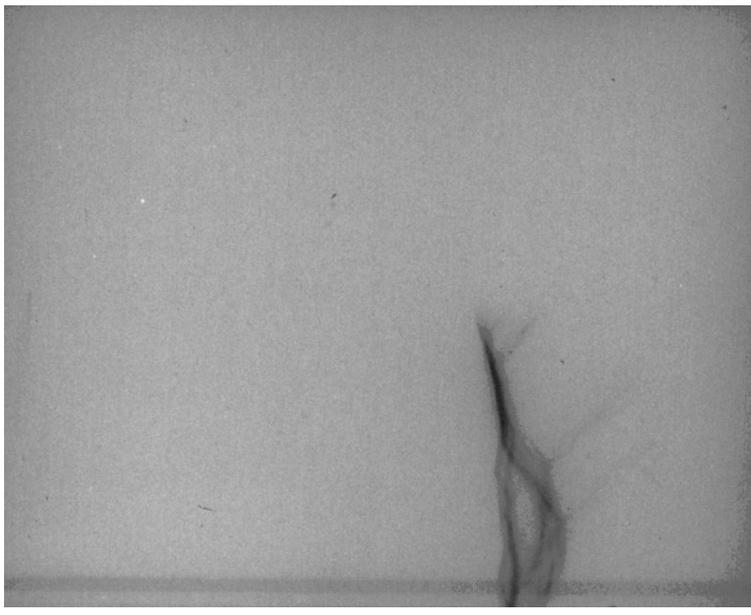


Tabelle 3: Durchstrahlungsaufnahmen von Austenit-Testkörpern mit realistischen Fehlern

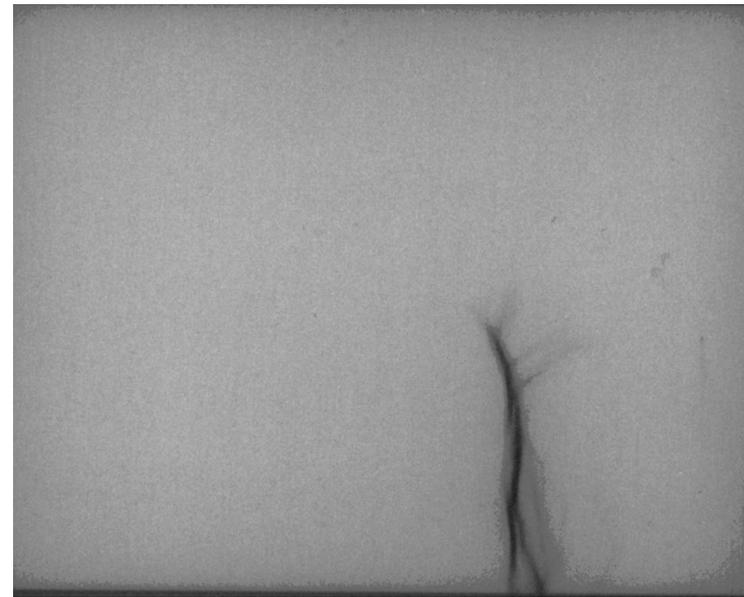
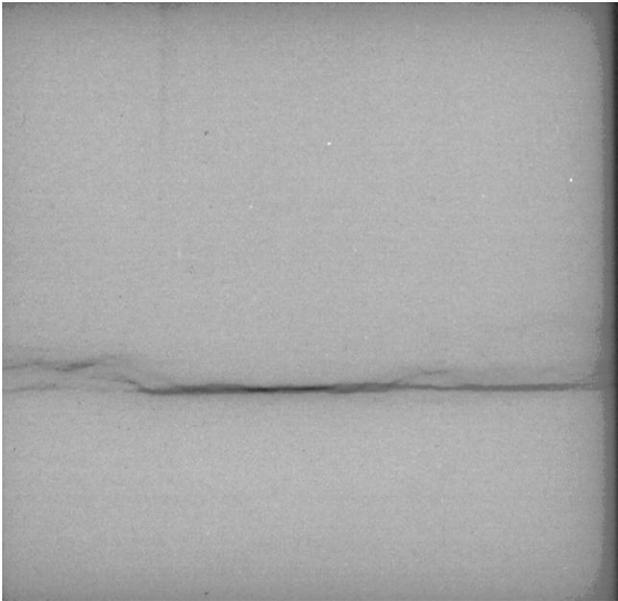
Testkörper-Nr.	Einstrahlrichtung in Dickenrichtung	Einstrahlrichtung in Schweißfortschrittsrichtung
TK 6	 A grayscale radiograph showing a horizontal weld line across the center of the specimen. The weld has a slightly irregular, wavy appearance.	 A grayscale radiograph showing a vertical weld line on the right side of the specimen. The weld is relatively straight and uniform in thickness.
TK 7	 A grayscale radiograph showing a horizontal weld line across the center of the specimen. The weld is slightly wavy and has a consistent thickness.	 A grayscale radiograph showing a vertical weld line on the right side of the specimen. The weld is straight and uniform.

TK 8		
TK 9		

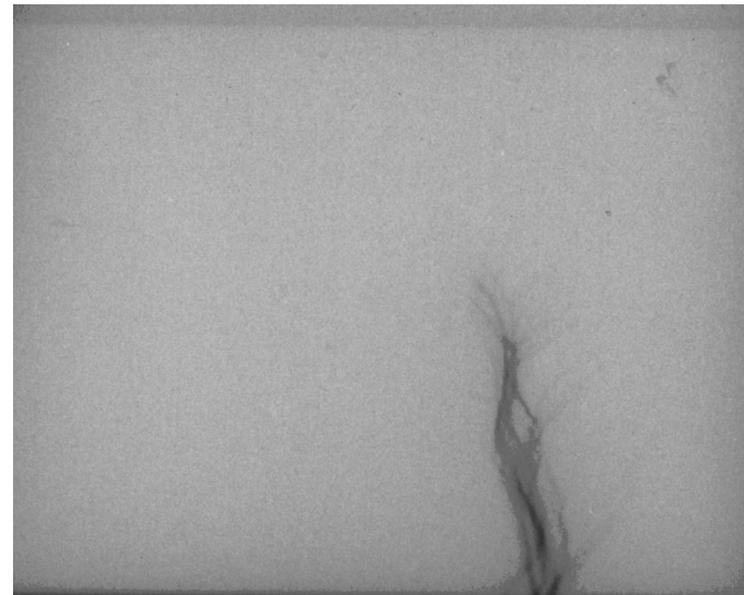
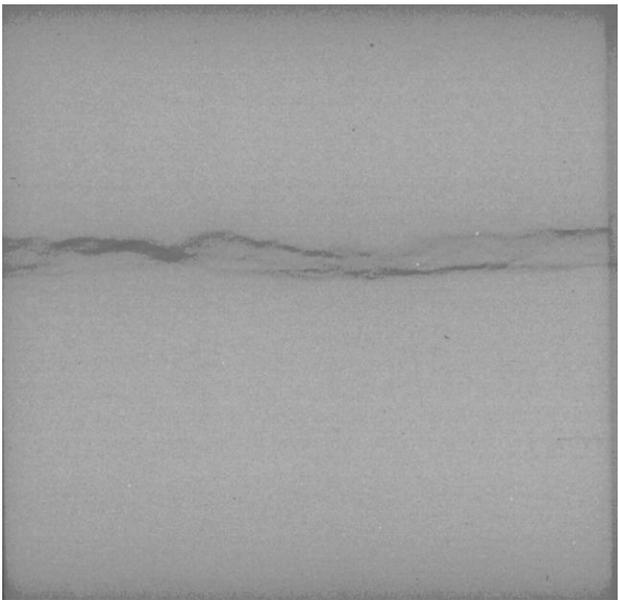
TK 10	 A grayscale micrograph showing a horizontal crack line across the center of a metal specimen. The crack is slightly irregular and has a jagged appearance.	 A grayscale micrograph showing a vertical crack in a metal specimen. The crack is dark and has a branching, tree-like structure extending upwards from the bottom edge.
TK 11	 A grayscale micrograph showing a horizontal crack line across the center of a metal specimen. The crack is slightly irregular and has a jagged appearance.	 A grayscale micrograph showing a vertical crack in a metal specimen. The crack is dark and has a branching, tree-like structure extending upwards from the bottom edge.

TK 12		
TK 13		

TK 14



TK 15



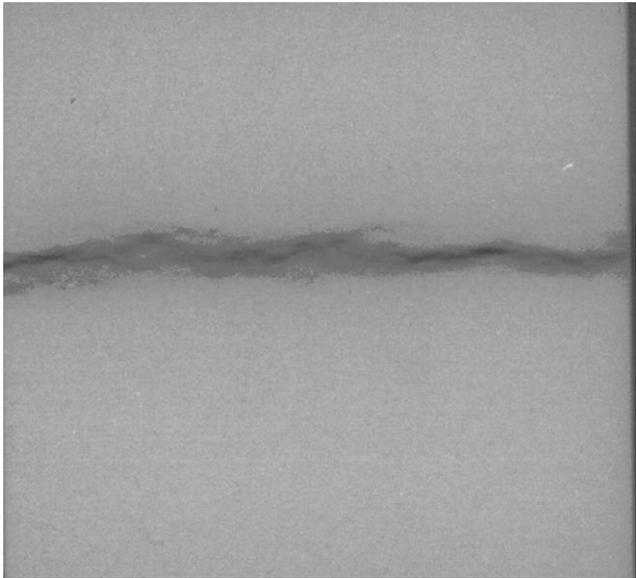
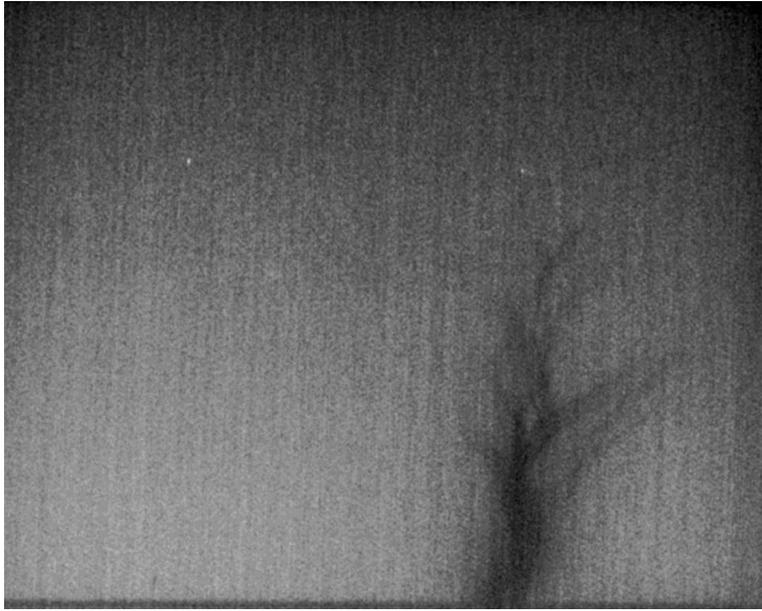
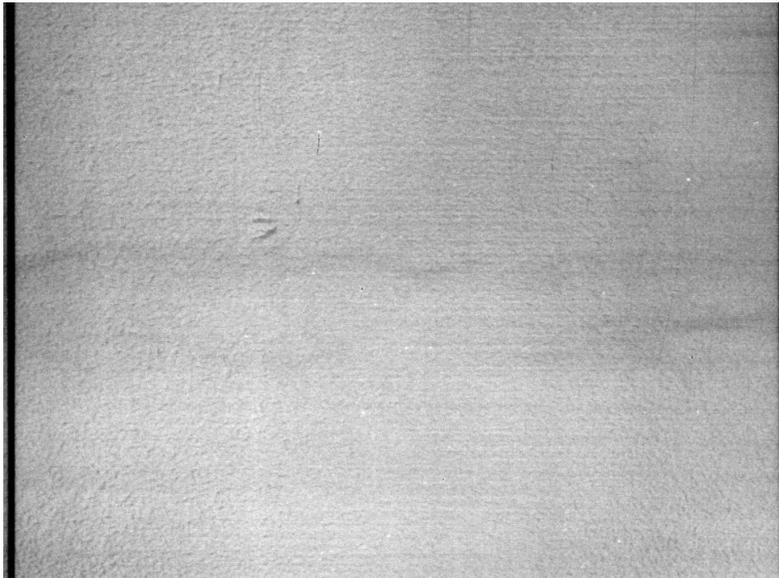
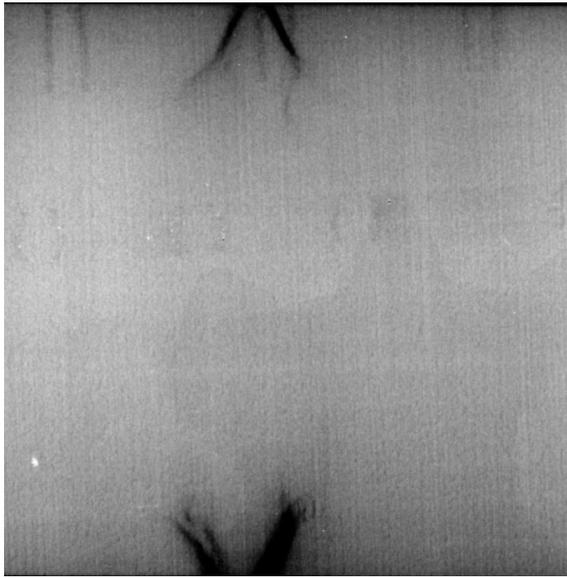
TK 16		
TK 20		

Tabelle 4: Ergebnisse Ultraschall-TOFD

TK Nr.	Scan-Richtung	Nichtparallele Prüfung nach DIN EN 583-6 = Scan-Richtung 2 in Abbildung 6	Parallele Prüfung nach DIN EN 583-6 = Scan-Richtung 1 in Abbildung 6
5	↗↘		
5	↖↗		

