

**OPTIMIERUNG UND NACHWEIS DER  
ULTRASCHALLPRÜFBARKEIT VON AKUSTISCH  
ANISOTROPEN WERKSTOFFEN AN  
AUSTENITISCHEN SCHWEISS- UND  
MISCHVERBINDUNGEN**



**UNIVERSITÄT  
DES  
SAARLANDES**

**DISSERTATION**

Zur Erlangung des Grades  
des Doktors der Ingenieurwissenschaften  
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III  
Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften  
der Universität des Saarlandes

von  
Dipl.-Ing. Sergey Pudovikov

Saarbrücken 2013

Tag des Kolloquiums:

21. November 2013

Dekan:

Univ.-Prof. Dr. Volkhard Helms

Berichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Christian Boller

Prof. Dr.-Ing. habil. Dietmar Eifler

Vorsitz:

Prof. Dr. Hans-Georg Herrmann

Akademischer Mitarbeiter:

Dr.-Ing. Frank Aubertin

## VORWORT

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Mitarbeiter des Fraunhofer-Instituts für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP). Sie gelang nicht zuletzt dank vielseitiger Unterstützung von meinen Kolleginnen und Kollegen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Boller danke ich für die Übernahme des Erstgutachtens meiner Dissertation und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dietmar Eifler für die Erstellung des Zweitgutachtens.

Ich bin Herrn Prof. E.h. Dr.rer.nat, Dr.-Ing. E.h. Gerd Dobmann für die Vermittlung seiner unfassbaren theoretischen und praktischen Kenntnisse im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung, speziell in der Ultraschallprüfung von Kernkraftkomponenten zu besonderem Dank verpflichtet. Seine Unterstützung hat mir sehr geholfen.

Ich möchte Herrn Dr. Andrey Bulavinov für seine fachliche Betreuung und moralische Unterstützung sowie für die Aufwendung seiner Freizeit zum Lesen der Entwürfe meiner Dissertation danken.

Herrn Dr. Roman Pinchuk bin ich dankbar für die wertvollen Diskussionen bezüglich der algorithmischen und mathematischen Aspekte meiner Arbeit.

Darüber hinaus danke ich allen Mitarbeitern der Abteilung „Werkstoffcharakterisierung, Fehlerprüfung und Lebensdauermanagement“ und insbesondere ihrer ehemaligen Abteilungsleiterin Frau Dr. Iris Altpeter für ihren Beitrag zum angenehmen Arbeitsumfeld.

Aus tiefstem Herzen möchte ich meinen Eltern und meiner Schwester für ihren grenzenlosen Beistand herzlich danken. Ohne moralische Unterstützung von meiner Familie wäre ein Gelingen der vorliegenden Dissertation kaum möglich gewesen.

Teile dieser Arbeit wurden bereits veröffentlicht [79, 94, 95, 96] und dienten als Grundlage für zwei Forschungsvorhaben vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [97, 98].

Saarbrücken, im Mai 2013

Sergey Pudovikov

## **KURZFASSUNG**

Schweißnähte in austenitischen Stählen sowie in Mischschweißverbindungen gehören für die Qualitätsprüfung mit Ultraschall traditionell zu „schwerprüfbaren“ Materialien. Während des Erstarrungsprozesses bildet sich in diesen Schweißnähten eine ausgeprägte dendritische Gefügestruktur, die gleichzeitig grobkörnig, anisotrop und inhomogen ist. Die Zuverlässigkeit von konventionellen Ultraschallprüfverfahren an austenitischen Schweißnähten hängt sehr stark von den ausgewählten Prüfparametern und der Erfahrung des Prüfers ab.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Ultraschallprüftechnik entwickelt, die den Fehlernachweis und -bewertung speziell in austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen mit quantitativen Aussagen zu Fehlergröße, -Art, und -Lage in akustisch anisotropen inhomogenen Werkstoffen ermöglicht. Das der Prüftechnik zugrunde liegende Prinzip der synthetischen Fokussierung mit Berücksichtigung der Materialanisotropie und –inhomogenität in Kombination mit zwei- und dreidimensionaler Darstellung der Ergebnisse gewährleistet eine quantitative und zuverlässige Bewertung von Materialfehlern in akustisch anisotropen inhomogenen Prüfobjekten.

Unter anderem wurde in der vorliegenden Dissertation ein iterativer Algorithmus für Bestimmung von unbekanntem elastischen Eigenschaften eines inhomogenen anisotropen Werkstoffs entwickelt. Er ermöglicht den Einsatz der entwickelten Prüftechnik in der Praxis, da die Anisotropie von meisten (insbesondere von handgeschweißten) Schweißverbindungen in der Regel unbekannt ist.

Die Funktionalität der entwickelten Prüftechnik wurde durch mehrere Prüfexperimente an geschweißten austenitischen Testkörpern mit künstlichen und realen Materialungängen validiert. Für den Einsatz des neuen Verfahrens in der Prüfpraxis werden verschiedene Prüfstrategien vorgeschlagen, die je nach aktueller Prüfaufgabe verwendet werden können.

## **ABSTRACT**

Austenitic and dissimilar welds with respect to the ultrasonic testing (UT) methods are considered normally as "difficult-to-test" objects. During the solidification process in such welds a distinct dendrite microstructure evolves, which is coarse-grained, anisotropic and inhomogeneous simultaneously. The reliability of available ultrasonic methods on austenitic welds depends significantly on the selected UT-parameters as well as on the inspection personnel experience.

In the present dissertation, an ultrasonic testing method was developed, which allows the flaw detection and evaluation in acoustically anisotropic inhomogeneous materials, especially in austenitic and dissimilar welds with a quantitative statement to the defect size, type, and location. The principle of synthetic focusing with taking into account the material anisotropy and inhomogeneity along with two- and three-dimensional visualization provides a reliable and quantitative assessment of the inspection results in acoustically anisotropic inhomogeneous test objects.

Among others, an iterative algorithm for the determination of unknown elastic properties of inhomogeneous anisotropic materials has been developed. It allows practical application of the developed UT method, since the anisotropy of most of austenitic and dissimilar welds (especially of hand-welded joints) in practice is usually unknown.

The functionality of the developed inspection technique has been validated by many experiments on welded austenitic specimens having artificial and natural defects. For the practical application of the new ultrasonic technique different testing strategies are proposed, which can be used depending on the current inspection task.

## NOMENKLATUR, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN

$\alpha_0, \beta_0, \gamma, \delta, \varepsilon$	- Thomsen-Parameter	$\alpha_0, \beta_0$ - [m/s] $\gamma, \delta, \varepsilon$ - dimensionslos
$\chi(\alpha)$	- Richtcharakteristik eines PA-Elementes	dimensionslos
$\delta$	- Kronecker-Delta	[0,1]
$\Delta$	- Ablenkwinkel	[Grad]
$\underline{\underline{\varepsilon}} \quad \varepsilon_{ij}$	- Deformationstensor und seine Komponenten	dimensionslos
$\varepsilon$	- Toleranz der GECDM	[GPa]
$\phi$	- Gruppenwinkel	[Grad]
$\eta$	- Skalare Messdaten in SAFT-Datenhyperbeln	[Amplitudensamples, %]
$\lambda_L, \mu$	- Lamé-Konstanten	[GPa]
$\lambda$	- Wellenlänge	[mm]
$\lambda_{DS}$	- Schrittweite des Suchalgorithmus in GECDM	[GPa]
$\nu$	- Poissonzahl	dimensionslos
$\bar{\nu} \quad \nu$	- Phasengeschwindigkeitsvektor, Phasengeschwindigkeit	[mm/mks], [m/s]
$\theta$	- Phasenwinkel	[Grad]
$\rho$	- Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\underline{\underline{\sigma}} \quad \sigma_{ij}$	- Tensor der mechanischen Spannung und seine Komponenten	[GPa]
$\omega$	- Kreisfrequenz	[Hz, s <sup>-1</sup> ]
$\xi$	- Auftreffwinkel	[Grad]
$A_{ij}$	- Komponente der SPA-Informationsmatrix	[Amplitudensamples, %]
$A_{TR}$	- Amplitudenschwelle (Treshhold) in GECDM	[Amplitudensamples, %]
$B$	- Datenhyperbel bei der SAFT-Rekonstruktion	
$\underline{\underline{C}} \quad C \quad C_{ij}$	- Steifigkeitsmatrix und ihre Komponenten	[GPa]
$\underline{\underline{C}} \quad C_{ijkl}$	- Elastizitätstensor und seine Komponenten	[GPa]
$E$	- Elastizitätsmodul	[GPa]
$f_{DS}$	- Descent-Search Funktion	[Spez. Einheiten]
$F$	- äußere Kraft	[N]
$F(\tilde{t})$	- analytisches Signal	
$\bar{g}$	- Polarisationsvektor	
$G$	- Schubmodul	[GPa]

$G_1, G_2, G_3$	- Gewichtskoeffizienten in GECDM	dimensionslos
$H_\theta(\varphi)$	- Richtcharakteristik eines Gruppenstrahlers	dimensionslos
$\bar{k}$	- Wellenzahlvektor	[m <sup>-1</sup> ]
$k$	- Parameter der GECDM	[%]
$L$	- Abweichung einer Anzeige im Sektorbild von erwartender Position	[mm]
$\bar{m} \quad m$	- Slowness-Vektor, Slowness	[s/m, mks/mm]
$\bar{n} \quad n_i$	- Vektor der Ausbreitungsrichtung	
$P$	- Schalldruck	[Pa]
$qL, qP$	- quasi-longitudinale Welle	
$qT, qS, qSV$	- vertikal polarisierte quasi-transversale Welle	
$\bar{r}$	- Radius-Vektor	
$R$	- Rekonstruktionswert bei der SAFT-Rekonstruktion	[Amplitudensamples, %]
$\underset{\equiv}{S} \quad S_{ijkl}$	- Nachgiebigkeitstensor und seine Komponenten	[GPa <sup>-1</sup> ]
$\hat{S}$	- Simplex	
$T_H, SH$	- horizontal polarisierte transversale Welle	
$t, T$	- Laufzeit	[mks, Zeitsamples]
$U_m$	- Amplitude einer harmonischen Welle	[mm, %]
$U$	- Unschärfe einer Anzeige im rekonstruierten Bild (in GECDM)	[mm <sup>2</sup> ]
$V_0$	- Schallgeschwindigkeit in isotropem Werkstoff	[m/s, mm/mks]
$\bar{V} \quad V$	- Gruppengeschwindigkeitsvektor, Gruppengeschwindigkeit	[m/s, mm/mks]
$x_0 \quad x_I \quad x_R \quad x_T$	- Ray-Parameter	[(m/s) <sup>-1</sup> ]
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	- Koordinateneinheitsvektoren	
$X, Y, Z$	- Raumdimensionen	[mm]
<i>A-Bild, A-Scan</i>	- Darstellung eines HF-US-Signals, Amplitude vs. Laufzeit (Laufweg)	
<i>B-Bild, B-Scan</i>	- US-Projektionsbild, Seitenansicht	
<i>C-Bild, C-Scan</i>	- US-Projektionsbild, Draufsicht	
<i>D-Bild, D-Scan</i>	- US-Projektionsbild, Seitenansicht	
<i>E</i>	- Empfänger	
<i>I, R, T</i>	- Incident, Reflected, Transmitted (einfallende, reflektierte, durchgehende Welle)	
<i>S</i>	- Sender	

3D	- dreidimensional
A/D	- Analog/Digital
ADEPT	- Advanced Dual Element Probe Technology
ASME	- American Society of Mechanical Engineers
AVG	- „Amplitude-Verstärkung-Größe“-Methode
BMU	- Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BSH	- Bildschirmhöhe
CUDA	- Compute Unified Device Architecture
DVD	- Digital Versatile Disk
EFIT	- Elastodynamische Finite Integrationstechnik
EMUS	- elektromagnetisch angeregter Ultraschall
F&E	- Forschung und Entwicklung
GECDM	- Gradient Elastic Constant Descent“-Methode
GPSS	- Generalisierte Punktquellensynthese
GPU	- Graphics Processing Unit
GRS	- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
GW	- Grundwerkstoff
GWP	- Gaußsche Wellenpakete
HF	- hochfrequent
IE	- Impuls-Echo-Prüfbetrieb
InASAFT	- Inhomogene-Anisotrope-SAFT
IZFP	- Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren
KKW	- Kernkraftwerk
KTA	- kerntechnischer Ausschuss
LLT	- Longitudinale-Longitudinale-Transversale-Welle
LUT	- Look-Up-Table (engl.), Nachschlagtabelle
MGB	- multi-Gaussian beam
MPA	- Materialprüfungsanstalt
PA	- Phased Array
RAM	- Random Access Memory
RDB	- Reaktordruckbehälter
SAFT	- Synthetische-Apertur-Fokussierungstechnik
SE	- Sender-Empfänger-Prüfbetrieb
SEL	- Sende-Empfangs-Prüfkopf für Longitudinalwellen
SN	- Schweißnaht
SPA	- Sampling Phased Array
TFM	- Total Focusing Method
TI	- transversal-isotrop
TOFD	- Time-Of-Flight-Diffraction
US	- Ultraschall
WEZ	- Wärmeeinflusszone
ZfP	- zerstörungsfreie Prüfung

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1.</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen	1
1.1.1	Industrielle Bedeutung der austenitischen Stähle und austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen	1
1.1.2	Typische Materialfehlerarten in austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen	2
1.1.2.1	Herstellungsbedingte Fehler	3
1.1.2.2	Betriebsbedingte Fehler	4
1.2	Akustische Anisotropie	5
1.2.1	Das Phänomen der akustischen Anisotropie	5
1.2.2	Phasengeschwindigkeit, Gruppengeschwindigkeit und Ablenkwinkel	8
<b>2.</b>	<b>STAND DES WISSENS UND TECHNIK ZUR ULTRASCHALLPRÜFUNG VON AUSTENITISCHEN SCHWEIß- UND MISCHSCHWEIßVERBINDUNGEN</b>	<b>13</b>
2.1	Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißverbindungen in der Praxis	13
2.1.1	Zerstörungsfreie Qualitätsprüfung von Austenitschweißnähten	13
2.1.2	Problemorientierte Prüfkonzepte auf der Basis von Einzelschwingerprüfköpfen	16
2.1.2.1	Auswahl optimaler Prüfparameter	16
2.1.2.2	Problemangepasste Prüfköpfe	18
2.1.3	Verwendung der Gruppenstrahlertechnik	22
2.2	Stand des Wissens im Bereich der Ultraschallprüfung an austenitischen Schweiß- und Mischverbindungen	23
<b>3.</b>	<b>MOTIVATION UND ZIELSETZUNG</b>	<b>27</b>
<b>4.</b>	<b>„SAMPLING PHASED ARRAY“ MIT INVERSER PHASENANPASSUNG</b>	<b>31</b>
4.1	Das Prinzip der Sampling-Phased-Array-Technik mit synthetischer Fokussierung	31
4.1.1	Messprinzip der „Sampling-Phased-Array“-Technik	32
4.1.2	Rekonstruktion von Ergebnisbildern	33
4.1.2.1	Das Prinzip des SAFT-Algorithmus	34
4.1.2.2	Sampling-Phased-Array-Rekonstruktion eines Sektor-Bildes	36
4.1.2.3	Erstellung eines Compound-B-Bildes	38
4.1.2.4	Erstellung eines Volumenbildes	39

4.2	„Sampling Phased Array“ mit verteilten Aperturen	42
4.3	Das Prinzip der inversen Phasen Anpassung bei der Ultraschallprüfung von akustisch anisotropen Werkstoffen	45
4.3.1	Inverse Phasen Anpassung in einem homogenen akustisch anisotropen Medium	46
4.3.2	Inverse Phasen Anpassung in einem inhomogenen akustisch anisotropen Medium	48
<b>5.</b>	<b>MODELLIERUNG DER SCHALLAUSBREITUNG IN EINER AUSTENITISCHEN SCHWEIßVERBINDUNG</b>	<b>51</b>
5.1	Erstellung des Schweißnahtmodells	52
5.2	Akustische Eigenschaften eines transversal-isotropen Mediums	53
5.3	Berechnung der Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten in einem transversal-isotropen Medium mit vertikaler Symmetrieachse	54
5.3.1	Exakte Formel	54
5.3.2	Thomsen-Formulierung der exakten Formel	55
5.3.3	Thomsen-Approximation für die schwache Anisotropie	56
5.4	Schallbrechung in einer akustisch anisotropen Schweißnaht	56
5.4.1	Grafische Darstellung des Brechungsgesetzes	61
5.4.1.1	Slowness-Fläche	61
5.4.1.2	Charakteristische Flächen eines anisotropen Mediums	64
5.4.1.3	Slowness-Oberflächen	66
5.4.2	Schallbrechung an der Grenze „Grundmaterial-Schweißgut“	67
5.4.3	Schallbrechung an den Korngrenzen	69
5.4.4	Einige Bemerkungen zur Schallausbreitung im anisotropen Schweißgut	71
5.4.4.1	Wellenumwandlung an Korngrenzen	71
5.4.4.2	Aufspaltung der Transversal-Welle mit vertikaler Polarisation	72
5.4.4.3	Mögliche Ausbreitung der gebrochenen quasi-transversalen Welle	73
5.5	Ray-Tracing Algorithmus zur Simulation der Schallausbreitung in einem inhomogenen, akustisch anisotropen Medium	74
5.5.1	Eingangsparameter für die Simulation der Schallausbreitung durch anisotropes Mehr-Schicht-Modell	74
5.5.2	Prinzipielle Funktionsweise	75
5.5.2.1	Ray-Tracing Prozedur bei Anordnung des Wandlers am Grundmaterial	76
5.5.2.2	Ray-Tracing Prozedur bei Anordnung des Wandlers am Schweißgut	78
5.5.2.3	Beschleunigung der Ray-Tracing-Simulation im Fall eines PA-Wandlers	78

5.5.3	Prinzipieller Aufbau der Simulationssoftware	79
5.5.4	Simulationsergebnisse	81
5.5.4.1	Ultraschalllaufzeiten zur Berechnung von SPA-Ergebnisbildern	81
5.5.4.2	Visualisierung des Schallbündels	82
<b>6.</b>	<b>ITERATIVE BESTIMMUNG VON UNBEKANNTEN AKUSTISCHEN EIGENSCHAFTEN DURCH EIN OPTIMIERUNGSVERFAHREN: „GRADIENT ELASTIC CONSTANT DESCENT“-METHODE (GECDM)</b>	<b>85</b>
6.1	Grundvoraussetzungen zur Anwendung der iterativen Bestimmung von unbekannten Größen auf Basis der SPA-Prüftechnik	85
6.2	Das Prinzip der iterativen Bestimmung von akustischen Eigenschaften nach der GECDM anhand eines bekannten Referenzreflektors	85
6.2.1	Praktischer Bedarf der automatischen Bestimmung von unbekanntem akustischen Eigenschaften	85
6.2.2	Allgemeines Prinzip der iterativen Bestimmung von unbekanntem akustischen Eigenschaften	86
6.2.3	„Descent Search“-Funktion	87
6.2.3.1	„Descent Search“-Funktion als Bewertungswert der Fokussierungsqualität	87
6.2.3.2	„Descent Search“-Funktion als nichtanalytisch berechenbare Funktion der Steifigkeitsmatrix	90
6.2.4	Minimierung der „Descent“-Funktion	90
6.2.4.1	Gradienten-Verfahren	90
6.2.4.2	Nelder-Mead-Verfahren	91
6.3	Zusammenfassung zum Kapitel 6	93
<b>7.</b>	<b>EXPERIMENTELLE VALIDIERUNG DER SPA-TECHNIK MIT INVERSER PHASENANPASSUNG UND ITERATIVER BESTIMMUNG VON ELASTISCHEN EIGENSCHAFTEN NACH GECDM</b>	<b>95</b>
7.1	Auswahl der Testkörper	95
7.2	Auswahl der Prüfköpfe	99
7.3	Aufbau des Systemprototyps	100
7.3.1	Prüf- und Auswertestation	101
7.3.2	„Sampling Phased Array“-Ultraschallelektronik OPTUS	102
7.3.3	Dreiaachsen-Prüfmanipulator	103

7.4	Software für die Datenaufnahme, Schallausbreitungssimulation, SPA-Rekonstruktion und Auswertung der Prüfergebnisse	103
7.5	Durchführung der Messungen und die Rekonstruktion der Ergebnisbilder	105
7.6	Prüfergebnisse an einer austenitischen Schweißnaht mit künstlichen Fehlern	108
7.6.1	Schweißnaht mit homogener Struktur (3-Schicht-Modell)	108
7.6.2	Schweißnaht mit inhomogener Struktur (Mehr-Schicht-Modell)	111
7.6.3	Schweißnaht mit inhomogener Struktur und zwei Fehlern	114
7.7	Prüfergebnisse an einer austenitischen Schweißnaht mit realen Fehlern	117
7.7.1	Testkörper mit einer Engspaltschweißnaht	117
7.7.2	Testkörper mit einer V-förmigen Breitspaltschweißnaht	119
7.7.3	Testkörper mit einer X-förmigen Breitspaltschweißnaht	120
7.8	Dreidimensionale Darstellung der Prüfergebnisse	121
<b>8.</b>	<b>MÖGLICHE WEGE FÜR DIE WEITERENTWICKLUNG DER TECHNIK DER INVERSEN PHASENANPASSUNG</b>	<b>123</b>
8.1	Weiterentwicklung der Ray-Tracing-Simulation und Bildrekonstruktion	123
8.1.1	Berücksichtigung der Schallfeldenergieverteilung bei der Ultraschallbildrekonstruktion	123
8.1.2	Inbetrachtung weiterer Wellenmoden bei der Ultraschallbildrekonstruktion	124
8.1.3	Beschleunigung des Rechenvorganges durch effiziente Grafikprozessoren	126
8.2	Weiterentwicklung des GECDM-Algorithmus	127
8.2.1	Ermittlung von akustischen Eigenschaften einer austenitischen Schweißnaht im SE-Betrieb	128
8.2.2	„Autofocusing“	131
8.2.3	Ermittlung der Gefügestruktur einer Schweißnaht mit angenommenen akustischen Eigenschaften der Stengelkristalle	131
8.2.4	Beschleunigung der iterativen Suche durch Kaskadenausführung	133
<b>9.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>135</b>
<b>10.</b>	<b>SCHLUSSBEMERKUNG</b>	<b>139</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>141</b>
	<b>ANLAGEN</b>	<b>151</b>

# 1. Einleitung

## 1.1 Austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen

### 1.1.1 Industrielle Bedeutung der austenitischen Stähle und austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen

Seit ihrer Erfindung durch die *Friedrich Krupp AG* (Essen, Deutschland) im Jahr 1912 [1] (Stahltyp 18/8, bestehend aus 18% Cr und 8% Ni) werden die austenitischen rostfreien Stähle in einer Vielzahl von Industriebranchen eingesetzt. Der hohe Chromgehalt (ab 12.5%) verleiht den austenitischen Stählen eine gute Beständigkeit gegen Wasser, Wasserdampf, Luftfeuchtigkeit sowie schwache Säuren und Laugen. Chrom hat die Besonderheit, dass es an Luft oxidiert. Dadurch bildet sich an der Oberfläche eine dünne porenfreie, festhaltende Chromoxidschicht. Diese dient als Schutzschicht gegen Angriffsmedien, sofern sie unter statischen oder zyklischen Beanspruchungen nicht aufreißt.

Außerdem zeichnen sich die rostfreien Stähle in der Regel durch Eigenschaften aus, wie: hohe Zähigkeit, hoher Wärmeausdehnungskoeffizient, schlechte Wärmeleitfähigkeit, niedrige Zugfestigkeit, Spröbruchunempfindlichkeit, hohe Haltbarkeit.

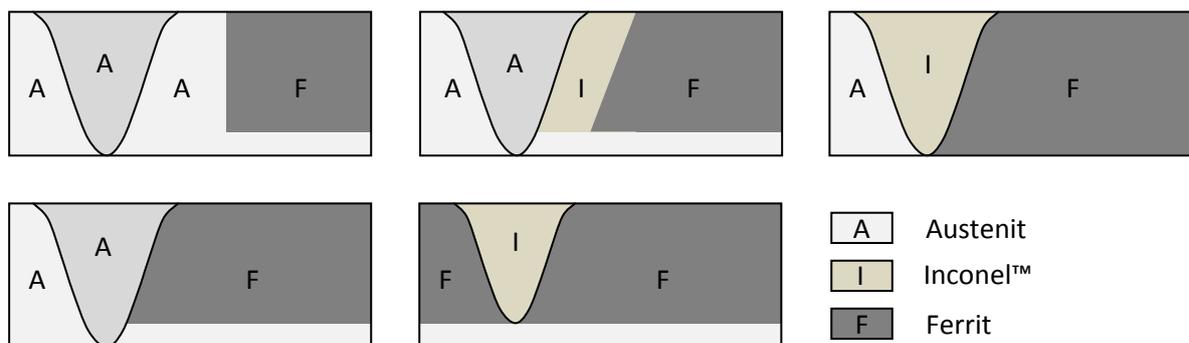
Austenitische Werkstoffe finden aufgrund der obengenannten Gebrauchseigenschaften breite Anwendung in der Industrie: auf dem Gebiet des chemischen Apparatebaus, in der Petrochemie, Erdölverarbeitung, Medizin, Vakuumtechnik, im U-Boot-Bau, Ofen-, Turbinen- und Maschinenbau. Wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit von austenitischen Stählen (dreimal geringer im Vergleich zu ferritischen Stählen [2]) stellt man aus diesen auch die Isolierwände für Kryostaten her.

Besonders wichtig sind die austenitischen Stähle für Industriebranchen, die höchsten sicherheitstechnischen Anforderungen bei ihrer Herstellung und während des Betriebes unterliegen, z.B. für die Anlagenbau [3, 4], so auch für Primärkreis Komponenten in kerntechnischen Anlagen [5]. Die austenitischen Stähle (insbesondere die molybdänhaltigen Stähle) haben eine hohe Korrosionsbeständigkeit und werden häufig als Konstruktionswerkstoffe im Kern des Reaktors oder in der Nähe des Kernes verwendet [6]. Aus solchen Stählen werden auch die Plattierungen von Reaktor-Druckgefäßen sowie Bauteile im Primärkreislauf von Siede- und Druckwasserreaktoren (Primärkreisrohrleitungen, Pumpengehäuse usw.) hergestellt. In diesem Industriesektor werden die austenitischen Stähle aber auch wegen ihrer Beständigkeit bei Neutronenbestrahlung bevorzugt. Ferritische, martensitische und perlitische Stähle erfahren durch Bestrahlung im Reaktor wesentlich stärkere Änderungen ihrer Mikrostruktur und damit auch ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften, im Vergleich zu austenitischen Stählen.

Unterschiedliche Anforderungen an die Komponenten in der Kerntechnik erfordern die Verwendung verschiedener metallischer Werkstoffe. Somit sind Mischnahtverbindungen (Verbindungen zwischen artfremden Werkstoffen) im Anlagenbau weit verbreitet und werden häufig auch in sicherheitsrelevanten Bereichen eingesetzt. Ein Beispiel dafür sind die Schweißnähte zwischen den Primärkreisstützen des Reaktordruckbehälters (ferritisch-bainitischer Stahl) und den Hauptkühlmittelleitungen, welche nach amerikanischem, französischem und japanischem Design aus austenitischem Stahl gefertigt sind. Um das Mismatch in den Eigenschaften, insbesondere der Unterschied in der Wärmedehnung abzumildern, werden diese Nähte meist mit Ni-Werkstoffen gepuffert. Die Werkstoffkombinationen von ferritischen Stählen und austenitischen Stählen, sowie mit Nickel und Nickellegierungen (Inconel™) nennt man auch „Schwarz-Weißverbindungen“.

Inconel™ ist ein rechtlich geschützter Markenname der Fa. *Special Metals Corporation* (USA) für eine Reihe von Nickellegierungen, wobei Nickel als Hauptkomponente und Chrom als wichtigste Nebenkomponekte dienen. Als zusätzliche Legierungen können auch Fe, Co, Nb, Mg, Cu, Al, Ti, S, P, B und andere enthalten sein. Der Werkstoff ist auch dank oben beschriebenen Mechanismus der Oxidschichtbildung korrosionsbeständig und behält eine stabile Festigkeit über einen breiten Temperaturbereich. Für Mischschweißverbindungen werden am häufigsten die Nickelwerkstoffe Inconel-82, -182, -600, -690, und -800 genutzt.

Einige der heute üblichen Mischnahtbauarten sind in Abb. 1 dargestellt.



**Abb. 1: Typischen Bauarten heute üblicher Mischschweißverbindungen**

### 1.1.2 Typische Materialfehlerarten in austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen

Bei austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen treten sowohl Fehlerarten auf, die für alle Schmelzschweißverbindungen typisch sind, als auch solche, deren Entstehen von charakteristischen Eigenschaften der geschweißten Werkstoffe (Austenit, Austenit+Ferrit) oder von der konstruktiven Auslegung der Verbindung (Pufferung, Plattierung) bedingt wird. Die Materialun-

regelmäßigkeiten können sowohl von herstellungsbedingten als auch von betriebsbedingten Einflußfaktoren verursacht werden. Die in diesem Kapitel erwähnten Fehlerarten werden detailliert in [2] und [7] beschrieben.

### 1.1.2.1 **Herstellungsbedingte Fehler**

Als mögliche Ursachen für das Entstehen der herstellungsbedingten Defekte kommen z.B. Fehler bei der Schweißnahtvorbereitung in Frage. Die Wahl falscher Schweißparameter, Handhabungsfehler usw. sind ebenso häufige Ursachen. Zu dieser Gruppe können folgende Fehlerarten nach DIN EN ISO 6520 [7] genannt werden:

**Hohlräume** - Gaseinschlüsse in der Schweißnaht, die bei der Erstarrung des Schweißgutes nicht aus der Schweißnaht herausdiffundiert sind. Man unterscheidet *Poren* (kugelartigen Gaseinschlüsse), *Porosität* (zahlreiche, statisch verteilte Poren), *Porenzeilen*, *Gaskanäle* (langgestreckten Gaseinschlüsse) und *Schlauchporen*;

**Feste Einschlüsse** – artfremde Einschlüsse in dem Schweißgut, sowohl nichtmetallischer (*Schlacken*) als auch fremdmetallischer (*Seigerungen*) Art;

**Bindefehler** – Fehlen der Verbindung zwischen Schweißgut und Grundwerkstoff (*Flankenbindefehler*) oder innerhalb des Schweißgutes (*Lagenbindefehler*);

**Ungenügende Durchschweißung** – nicht ausreichend durchgeschweißter Querschnitt;

**Formfehler** – unzulässige Verformung der Schweißnahtgeometrie, wie *Einbrandkerbe*, *Wurzelkerbe*, *Wurzeldurchhang*, *Kantenversatz*, *Decklagenunterwölbung*, *Wurzelrückfall* und andere.

Die obengenannten herstellungsbedingten Fehlerarten treten sowohl bei ferritischen als auch bei austenitischen Schweißnähten auf. Bei austenitischen Schweißnähten wegen der relativ geringen Wärmeleitfähigkeit und der im Vergleich zu ferritischen Stählen größeren Wärmeausdehnung entsteht eine besondere Gefahr von **Faltenbildungen** durch Schrumpfvorgänge, die zu starken Verformungen der Oberfläche und/oder des Wurzelbereichs und als Folge zur Ausbildung von Strumpfkerben führen können.

Noch ein Fehlertyp, der bei austenitischen Schweißnähten häufiger als bei ferritischen auftritt, sind **Heißrisse**. Sind niedrigschmelzende nickel- und niobreiche Phasen an Korngrenzen vorhanden, so können sie beim Abkühlen des Schweißgutes aufreißen. Diese Rissbildung kann sowohl im Schweißgut als auch in der Wärmeeinflusszone (WEZ) des Grundwerkstoffes auftreten.

Beim Schweißen von Mischverbindungen tritt bei unsachgemäßer Ausführung eine sogenannte **Ablösung** (engl. *Disbonding*) auf – eine makroskopische Trennung zwischen austenitischen und ferritischen Teilen der Mischschweißnaht. Die Ablösung entsteht unmittelbar an der Schmelzlinie und wird durch den Unterschied der Wärmeausdehnungskoeffizienten der Werkstoffe verur-

sacht. Infolge der unterschiedlich hohen Schmelztemperaturen von ferritischen und austenitischen Teilen ist die Gefahr von *Bindefehlerbildung* in Mischverbindungen auch höher, als in homogenen Schweißnähten.

Im ferritischen Teil einer Mischschweißnaht können sich auch sogenannte *Kaltrisse* bilden. Unterschieden werden - *Aufhärtungsrisse* (treten vorwiegend in der Wärmeeinflusszone auf), *Wasserstoffrisse* (treten meistens in der WEZ auf, entstehen durch Aufnahme des atomaren Wasserstoffs aus Feuchtigkeit), *Terrassenbrüche* (Risse in der WEZ und im angrenzenden Material, entstehend bei zeiliger Gefügeausbildung).

In Plattierungen tritt, neben den o.g. Fehlertypen wie Poren, Schlacken, Bindefehler und Ablösungen, auch eine spezielle Fehlerart der *Unterplattierungsrisse* auf. Solche Risse sind senkrecht zur Plattierungsfläche orientiert und entstehen in der Grenzschicht des ferritischen Grundwerkstoffes bei der Spannungsarmglühung als letzte Wärmebehandlung nach der Plattierungsfertigstellung.

#### 1.1.2.2 Betriebsbedingte Fehler

Betriebsbedingte Fehler in austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen können durch die den Betriebsprozess begleitenden mechanischen, thermischen oder chemischen Belastungen verursacht werden.

Industrieanlagen, in denen die austenitischen Stähle sowie Schweißverbindungen aufgrund ihrer vorteilhaften mechanisch-chemischen Eigenschaften verwendet werden, werden häufig unter verschärften betrieblichen Belastungsbedingungen gefahren, wie z.B. hoher mechanischer Beanspruchung, Temperaturtransienten / Thermoschocks oder aggressiven Umgebungsmedien und oftmals auch ihren Überlagerungen.

Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit von austenitischen Stählen treten bei thermischer Beanspruchung große Wärmespannungen auf. Das kann im Zusammenhang mit einem großen Temperaturgradienten (z.B. in Rohrwandungen des Kraftwerkbetriebes bis zu 200°K [2]), das Entstehen von *Ermüdungsrisse*n in der Schweißnaht und Wärmeeinflusszone verursachen.

Das gleichzeitige Vorliegen von inneren oder Zugeigenspannungen, von aggressivem Medium und Chrom-Verarmung an den Korngrenzen durch Chromcarbidausscheidung (was z.B. während der Schweißung bei Einbringung zu großer Streckenenergie in der WEZ geschieht) kann zum Entstehen der transkristallinen oder interkristallinen *Spannungsrissskorrosion* führen. Transkristalline Spannungsrisse sind meistens chloridinduziert und treten oft in Form von netzförmigen Strukturen auf. Die interkristalline Spannungsrissskorrosion wird oft als Kornzerfall bezeichnet und ist mit dem Ausscheiden des Chromcarbids an den Korngrenzen verbunden. Der Zusatz von so genannten Stabilisatoren (Niob und Titan), mit höherer Affinität zum Kohlenstoff

im Vergleich zu Chrom vermeidet, bei gleichzeitiger Absenkung des C-Gehaltes, die Chromverarmung an der Korngrenze und damit die Bildung derartiger Fehler.

## 1.2 Akustische Anisotropie

### 1.2.1 Das Phänomen der akustischen Anisotropie

Austenitische Schweißverbindungen gehören zu akustisch anisotropen Werkstoffverbunden. 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 dieser Konstanten zu erklären, stellen wir uns ein Volumenelement des Werkstoffes vor, auf das die äußere Kraft  $\mathbf{F}$  wirkt. Dadurch entstehen mechanischen Spannungen, die in dem kartesischen Koordinatensystem auf drei Basisachsen  $x$ ,  $y$  und  $z$  projiziert werden können (Abb. 2). Die Spannungen lassen sich formal als Tensor 2. Stufe schreiben.

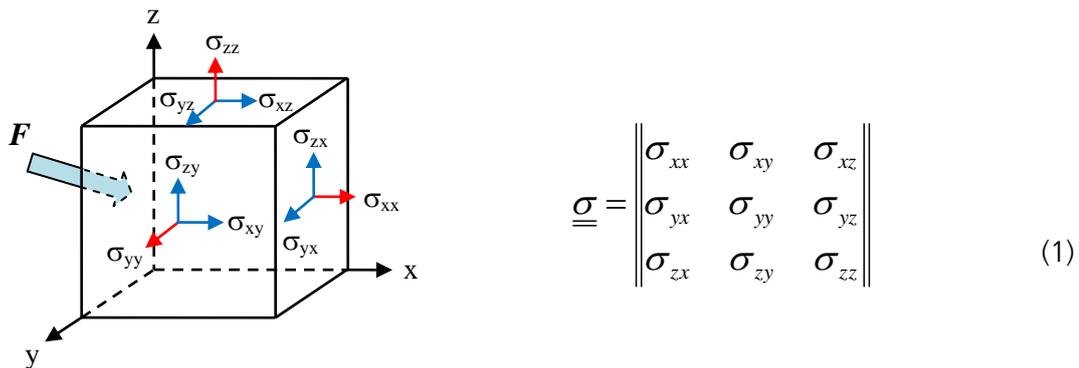


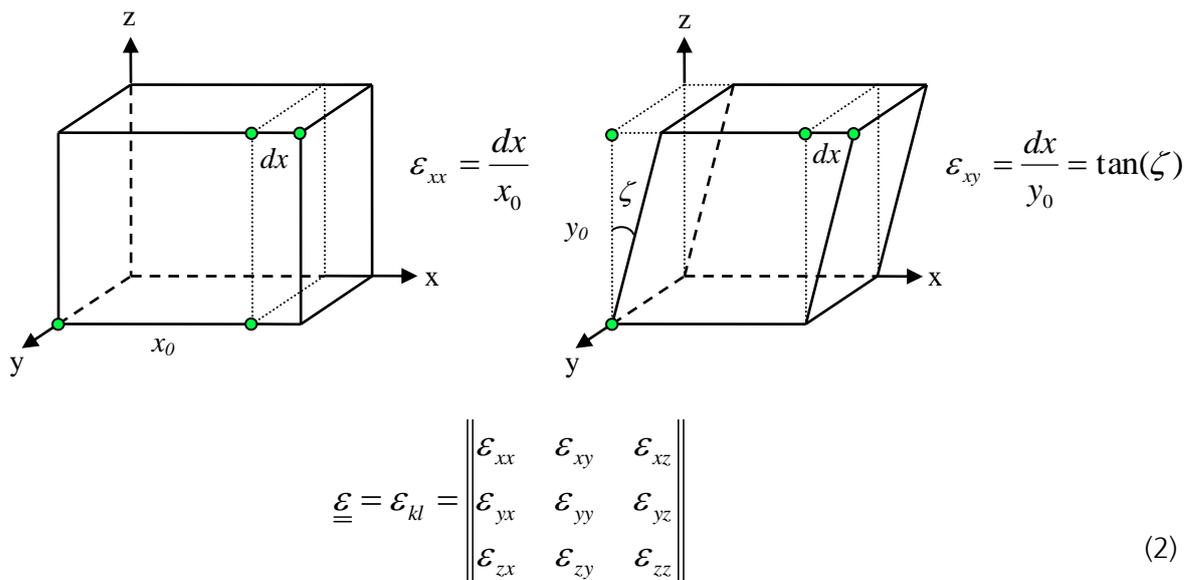
Abb. 2: Mechanischen Spannungen und Spannungstensor

Die mechanische Spannung  $\sigma_{ij}$  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*  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$  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 ent-

sprechenden Fläche und stellen eine Beanspruchung auf Scherung dar. Für die Charakterisierung des deformierten Zustands wird ein Tensor 2. Stufe – *Deformationstensor*  $\underline{\underline{\varepsilon}}$  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 *Tangens* von Scherungswinkeln (Abb.3).



**Abb. 3: 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:

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

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

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

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

gilt für den Elastizitätstensor und für den Nachgiebigkeitstensor auch

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

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

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

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

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

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 Struktur des Aufbaus der meisten anisotropen Materialien stützt sich auf das Vorhandensein von einer oder mehreren Symmetrieebenen bzw. Symmetrieachsen. Die elastischen Eigenschaften

ten des Werkstoffs werden, je nach Symmetrieart, an den Symmetrieebenen gespiegelt und/oder um die Symmetrieachsen 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 *orthorhombischer*, 6 – bei *tetragonaler*, 5 – bei *hexagonaler*, 3 – bei *kubischer* [8].

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

### 1.2.2 Phasengeschwindigkeit, Gruppengeschwindigkeit und Ablenkwinkel

Während die Wellenfront einer Punktquelle in einem isotropen homogenen Medium durch eine reguläre Kugeloberfläche repräsentiert wird, ist das in einem anisotropen Medium auf Grund der Richtungsabhängigkeit der 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. Stellen wir uns dazu eine ellipsenförmige Wellenfront vor, welche wir zu zwei Zeitpunkten (Abb. 4) betrachten. 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 dagegen tangential zur Wellenfront über die Entfernung  $vdt$  aus.

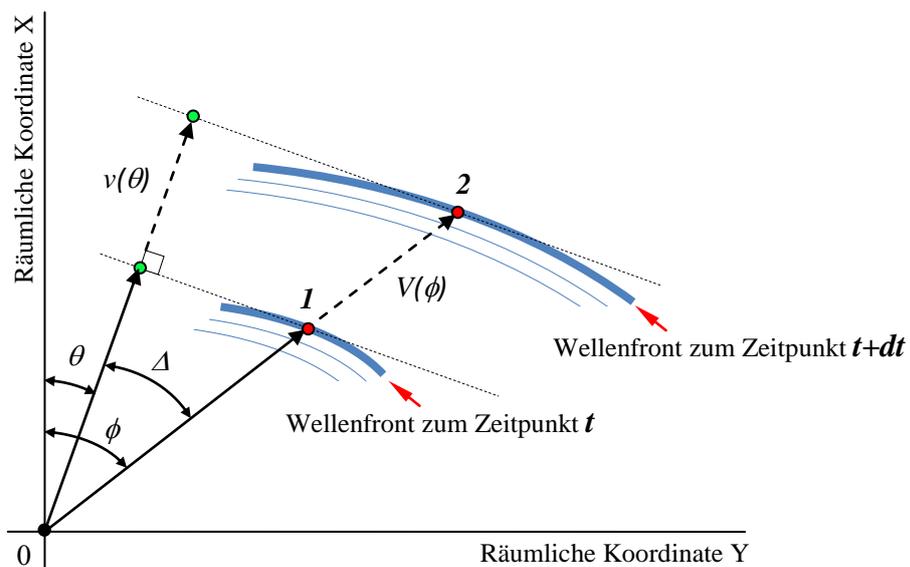


Abb. 4: Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten in einem homogenen anisotropen Medium

Abb. 4 illustriert den Unterschied zwischen Vektoren  $\bar{v}$  und  $\bar{V}$  sowohl in der Richtung als auch in der Länge. Die Geschwindigkeit  $\bar{v}$  der Phasenausbreitung ist die sogenannte *Phasengeschwindigkeit*; der Winkel  $\theta$  wird als *Phasenwinkel* bezeichnet. Die Geschwindigkeit  $\bar{V}$  der Energieausbreitung ist die *Gruppengeschwindigkeit*. In einigen Quellen wird die Gruppengeschwindigkeit auch mit dem Term *Energieschwindigkeit* benannt [9]. Der Winkel  $\phi$  ist der *Gruppenwinkel*. Den Winkel  $\Delta$  zwischen der Energieausbreitungsrichtung und der Richtung der Phasenfront nennt man *Ablenkwinkel*.

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

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

Der Einheitsvektor  $\bar{g}$  beschreibt die Polarisation der Welle,  $F(\tilde{t})$  ist ein analytisches Signal – ein komplexes Zeitsignal, dessen Spektrum im negativen Frequenzbereich gleich Null ist [10].

Die Phasengeschwindigkeit  $v$  der Welle kann man durch Lösung der Christoffel-Gleichung (9) bestimmen

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

die ihrerseits aus der Wellengleichung (10) folgt [8]:

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

Hierbei sind:  $\rho$  - Dichte des Mediums,  $C_{ijkl}$  - Komponenten des Elastizitätstensors,  $\delta$  - das Kronecker-Delta,  $\underline{\Gamma}$  - der Christoffel-Tensor. Die Indizes  $i, j, k, l$  repräsentieren 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 der Form (6) dargestellt, dann werden die Komponenten des Christoffel-Tensors folgenderweise [11] beschrieben:

$$\begin{aligned}
 \Gamma_{11} &= C_{11}n_1^2 + C_{66}n_2^2 + C_{55}n_3^2 + 2C_{16}n_1n_2 + 2C_{56}n_2n_3 + 2C_{15}n_1n_3 \\
 \Gamma_{22} &= C_{66}n_1^2 + C_{22}n_2^2 + C_{44}n_3^2 + 2C_{26}n_1n_2 + 2C_{24}n_2n_3 + 2C_{46}n_1n_3 \\
 \Gamma_{33} &= C_{55}n_1^2 + C_{44}n_2^2 + C_{33}n_3^2 + 2C_{45}n_1n_2 + 2C_{34}n_2n_3 + 2C_{35}n_1n_3 \\
 \Gamma_{12} &= C_{16}n_1^2 + C_{26}n_2^2 + C_{45}n_3^2 + (C_{12} + C_{66})n_1n_2 + (C_{25} + C_{46})n_2n_3 + (C_{14} + C_{56})n_1n_3 \\
 \Gamma_{13} &= C_{15}n_1^2 + C_{46}n_2^2 + C_{35}n_3^2 + (C_{14} + C_{56})n_1n_2 + (C_{36} + C_{45})n_2n_3 + (C_{13} + C_{55})n_1n_3 \\
 \Gamma_{23} &= C_{56}n_1^2 + C_{24}n_2^2 + C_{34}n_3^2 + (C_{25} + C_{46})n_1n_2 + (C_{23} + C_{44})n_2n_3 + (C_{36} + C_{45})n_1n_3
 \end{aligned} \tag{12}$$

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

Die Gruppengeschwindigkeit  $\bar{V}$  wird nach Formel (13) berechnet [12]:

$$\bar{V} = \frac{\partial \bar{k} \nu}{\partial k_x} \bar{x} + \frac{\partial \bar{k} \nu}{\partial k_y} \bar{y} + \frac{\partial \bar{k} \nu}{\partial k_z} \bar{z} \tag{13}$$

wobei  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  die Koordinateneinheitsvektoren sind und  $\bar{k}$  der Wellenzahlvektor parallel zur Phasengeschwindigkeit ist und die Länge  $k = \omega / \nu$  ( $\omega$  – die Kreisfrequenz) besitzt. Im allgemeinen Fall kann die Abweichung der Richtung des Gruppengeschwindigkeitsvektors von der Richtung des Phasengeschwindigkeitsvektors in allen drei Raumrichtungen  $x, y$  und  $z$  erfolgen. Der Ablenkwinkel  $\Delta$  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 zur  $\bar{n}$ . Die Welle, deren Polarisationsvektor am nächsten zur Ausbreitungsrichtung ist, heißt *quasi-longitudinale* Welle *qL*. Das Präfix „quasi“ unterstreicht, dass die Vektoren  $\bar{g}$  und  $\bar{n}$  nicht kollinear sind. In englischsprachigen Quellen ist diese Welle als *qP* gekennzeichnet. Der Buchstabe „P“ in der Bezeichnung ist ursprünglich aus der Seismologie gekommen und steht dort für „primary“ [13]. Weil die quasi-longitudinale Welle eine größere Geschwindigkeit verglichen mit den anderen zwei Wellenmoden hat, kommt die qP-Welle von der Schallquelle (z.B. einem Erdbeben) am Empfänger immer als erste an. Deswegen wurde die quasi-longitudinale Welle „*primary wave*“ genannt. Es gibt auch eine andere Interpretation der Bezeichnung [14]. Die qP-Welle ist eine Kompressionswelle, also „*pressure wave*“.

Die anderen zwei Wellen besitzen Polarisationsvektoren in der Ebene, die orthogonal zu dem Polarisationsvektor der qL-Welle ist. Sie werden als *quasi-transversale* Wellen *qT* bezeichnet. In

englischsprachigen Quellen werden die Wellen als  $qS_1$  und  $qS_2$  gekennzeichnet („S“ - von „**s**econdary wave“ oder auch „**s**hear wave“). Bezüglich der austenitischen Stengelkristalle unterscheidet man eine vertikal-polarisierte Transversalwelle  $qT_V$  oder  $qSV$ , deren Polarisationsvektor in der Ebene des Stengelkristalls ist, und eine horizontal-polarisierte Transversalwelle  $T_H$  oder  $SH$ , deren Polarisationsvektor senkrecht zur Stengelrichtung steht (das Präfix „quasi“ fehlt, weil die Polarisation der SH-Welle immer senkrecht zu der Ausbreitungsrichtung ist).



## **2. Stand des Wissens und Technik zur Ultraschallprüfung von austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen**

Die austenitischen Schweiß- und Mischschweißnähte sind in Bezug auf konventionelle Ultraschallverfahren als „schwer prüfbar“ Werkstoffe bekannt. Die Schwierigkeit liegt in der dendriten Struktur dieser Schweißnähte, die gleichzeitig grobkörnig, anisotrop und inhomogen ist.

Das Hauptziel der zerstörungsfreien Prüfung generell und hier diskutiert, speziell der Ultraschallprüfung, ist der zuverlässige Nachweis und die Bewertung der Materialfehler (Fehlerart, -lage, -größe). In der Praxis werden Sonderformen von Ultraschallsensoren eingesetzt und an die Prüfungsaufgabe angepasste Prüfparameter verwendet, um den negativen Einfluss der Materialanisotropie zu vermindern. Die Wissenschaft ihrerseits versucht, die destruktiven Phänomene mehr detailliert zu verstehen und zu beschreiben, um diese korrigieren oder „umgehen“ zu können. In diesem Abschnitt wird daher der erreichte Stand der Ultraschallprüfung von austenitischen und Mischschweißverbindungen sowohl von der praktischen als auch von der wissenschaftlichen Seite zusammengestellt.

### **2.1 Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißverbindungen in der Praxis**

#### **2.1.1 Zerstörungsfreie Qualitätsprüfung von Austenitschweißnähten**

Zum Nachweis der Gebrauchseignung der Schweißverbindungen gehören neben stichprobenweise an Verfahrensproben zerstörend durchgeführten mechanisch-technologischen Prüfungen (Festigkeit, Zähigkeit) unter anderem auch zerstörungsfreie Prüfungen. Die zuletzt genannten 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 deutsche KTA (kerntechnischer Ausschuss)-Regelwerk und der US-amerikanische ASME-Code zitiert [15, 16]. Die hohe Empfindlichkeit und der Umfang der Prüfungen sollen gewährleisten, dass die nachweisbaren Materialungängen wesentlich kleiner sind, als die unter den betrieblichen Lastbedingungen und Störlastbedingungen kritischen Fehler, welches die zum Versagen der Komponenten führenden Fehler sind.

Diese hohen prüftechnischen Anforderungen sind derzeit für austenitische und Mischnähte nur bedingt erreichbar. Gründe liegen zum einen in der Neigung zur Grobkörnigkeit des Grundwerkstoffes (was zur Schallschwächung durch Streuung verstärkt beiträgt), zum anderen

im Erstarrungsgefüge des Schweißgutes, was sich in der akustischen Anisotropie bemerkbar macht, den Schallstrahl verformt und das Schallfeld deformiert.

Während seit längerem durch optimierte Herstellungsprozesse eine für die Prüfbarkeit hinreichende Feinkörnigkeit des Grundwerkstoffes gegeben ist [17], bleibt trotz aller schweißtechnischen Fortschritte [18] 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 thermisch 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 Forschungsaktivitäten, die durch diese Fehler in austenitischen Nähten und Mischverbindungen ausgelöst wurden [19-22].

In Deutschland werden seit 1975 sicherheitsrelevante Ereignisse in Kernkraftanlagen nach bundeseinheitlichen Kriterien gemeldet [23]. 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 [24] 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 Modenkonversionseffekten verursacht [25]. Dieses Phänomen, bekannt als akustische Anisotropie, bedingt, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, eine Abweichung der Ausbreitungsrichtung von Ultraschallwellen von dem gewünschten Einschallwinkel. 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

aber auch der Erdanziehungskraft bestimmt ist. Die Schallausbreitung durch das Schweißgut hängt von der Textur und den physikalischen Eigenschaften des Gefüges ab, die von Naht zu Naht (Werkstoffeinfluss, Nahtgeometrie, Workshopschweißung oder Baustellennaht) 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 (Sende-Empfang-Technik mit longitudinaler Welle) für die nahe Oberfläche und eine 45° T- Wellentechnik (SV-transversal) für die ferne Oberfläche, bei einer Wanddicke >80 mm ergänzt durch eine Tandemtechnik bzw. eine Wellenumwandlungstechnik (LLT [26]), eingesetzt. Die Ergebnisse werden nach einer Kalibrierung der Prüfempfindlichkeit des Prüfsystems (Prüfkopf und Hardware) an Referenzfehlern, welche in Vergleichskörper eingebracht sind, nach der AVG-Methode [27] bewertet.

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 durch das KTA-Regelwerk definierten Bewertungsgrenze auf, sind in diesen Prüfbereichen nachträglich und zusätzlich Analyse-Prüfungen mit den Techniken:

- Fokus- Prüfung
- Gruppenstrahlern<sup>1</sup>
- SAFT- Rekonstruktion (Synthetische-Apertur-Fokussierungstechnik)<sup>2</sup>
- TOFD (Time-Of-Flight-Diffraction) [28, 29]

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.

---

<sup>1</sup> Siehe Abschnitt 2.1.3

<sup>2</sup> Siehe Abschnitt 4.1.2.1

## **2.1.2 Problemorientierte Prüfkonzpte auf der Basis von Einzelschwingerprüfköpfen**

### **2.1.2.1 Auswahl optimaler Prüfparameter**

Die elastischen Eigenschaften einer austenitischen Schweißnaht hängen, sowohl von den Schweißparametern als auch von der Nahtgeometrie und von den geschweißten Werkstoffen ab und ändern sich von Naht zu Naht. Starke Schwächung und Streuung des Ultraschalls sowie die Deformation des Schallfeldes, die durch die Anisotropie und Inhomogenität der Nahtstruktur verursacht werden, erfordern die Anpassung mehrerer Prüfparameter (Prüffrequenz, Einschallwinkel, Wellenmode, Impulslänge, Verstärkungswert usw.) für die konkrete Prüfaufgabe. Aus jahrelanger praktischer Erfahrung im Bereich der Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißverbindungen können folgende Werte hervorgehoben werden.

#### **Prüffrequenz**

Die meisten austenitischen Schweißnähte sind nur in einem Frequenzbereich von 0.5 MHz bis zu 4 MHz prüfbar (je nach ausgewählter Wellenmode) – die akustischen Wellen sind durch die grobkörnige Gefügestruktur einer wesentlichen Schallschwächung durch Streuung ausgesetzt. Bei der Ultraschallprüfung von dünnwandigen Komponenten sowie Engspaltschweißnähten ist der Schallweg durch die Schweißnaht relativ gering, sodass auch Ultraschallwellen mit höheren Frequenzen verwendet werden können.

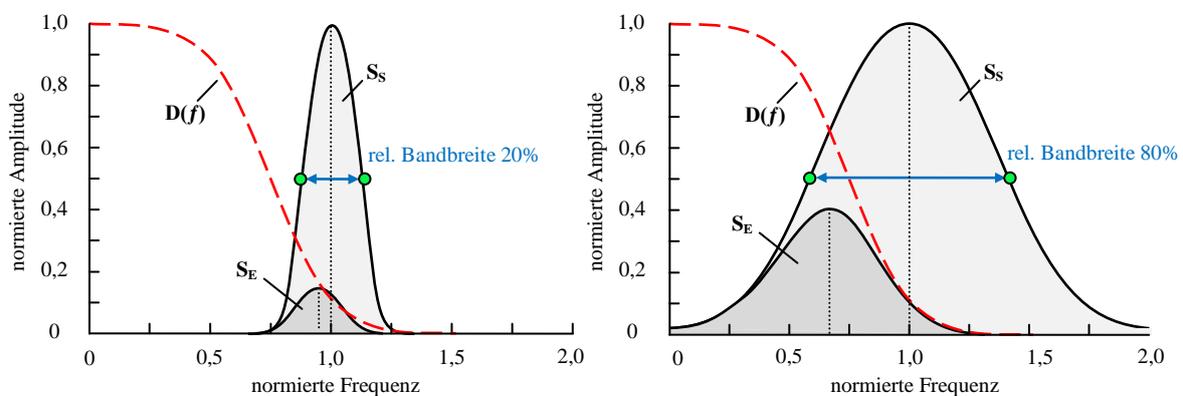
Bei der Frequenzauswahl muss man auch darauf achten, dass das Nachweis- und Auflösungsvermögen der Ultraschallprüfung direkt von der Wellenlänge des Ultraschalls abhängig ist. Diese ihrerseits ist umgekehrt proportional zur Ultraschallfrequenz.

#### **Impulslänge (Bandbreite)**

Neben der Prüffrequenz, ist die Länge des Sendeimpulses einer der wichtigsten Parameter eines Ultraschallprüfsystems, der das Signal/Rausch-Verhältnis bei der US-Prüfung von grobkörnigen Werkstoffen beeinflusst. Dies erfolgt auf zwei Wegen. Einerseits übt die Impulslänge einen Einfluss auf die Höhe der Rauschsignale aus. Durch die Grobkornstruktur des Werkstoffes wird Ultraschallstreuung in alle Raumrichtungen erzeugt, was einerseits die Vorwärtsausbreitungsenergie entzieht und andererseits die sich rückwärts ausbreitenden Echos als Störungen überlagert und zu Interferenzen führt. Dieser Interferenzeffekt führt in Endkonsequenz dazu, dass sich der Rauschpegel des Ultraschallsignals erhöht. Je länger die Ultraschallimpulse sind, desto höher ist die Interferenzfähigkeit der Rückstreusignale und desto höher sind die Gefügeanzeigen („Gras“ oder „Tannenbäume“ auf dem A-Bild), die die Fehleranzeigen überdecken können. Verkürzung der Schallimpulse verringert ihre Kohärenzlänge und vermindert dadurch den Interferenzeffekt. Um das Signal/Rausch-Verhältnis bei der Ultraschallprüfung von grobkörnigen Strukturen durch

Verringerung der Streuanzeigen zu verbessern, verwendet man möglichst kurze, also breitbandige Sendeimpulse.

Der zweite Wirkungseffekt der Impulslänge liegt darin, dass die Amplitude der Schallstreuung an den Korngrenzen mit der Frequenz steigt und damit die hochfrequenten Anteile des Ultraschallimpulses viel stärker geschwächt werden, als die niederfrequenten. Dies als Folge führt zur Änderung des Signalspektrums und zur Verschiebung seines Maximums zu kürzeren Laufzeiten. Die Schallgeschwindigkeit wird mit größerer Entfernung vom Prüfkopf kleiner (Dispersion). Damit wird die Fehlerortung ungenauer. Die schematische Aufklärung des Effektes ist in Abb. 5 dargestellt.



**Abb. 5: Änderung des Spektrums eines schmalbandigen (links) und breitbandigen (rechts) Ultraschall-Impulses in einem grobkörnigen Werkstoff [2]**

Die rote Strichkurve  $D(f)$  in Abb. 5 beschreibt die Frequenzverteilung des Amplitudenabfalls in einem grobkörnigen (Korngröße ca. 0.5 mm) Werkstoff auf einem bestimmten Laufweg. Das Spektrum  $S_E$  des empfangenen Signals ist das Produkt von dem Spektrum  $S_s$  des Sendeimpulses und der Funktion  $D(f)$ . Die Auswirkung der frequenzabhängigen Funktion  $D(f)$  verursacht die Verschiebung der Mittenfrequenz zu niedrigen Frequenzen. Obwohl die Verschiebung im Fall eines breitbandigen Impulses im Vergleich mit einem schmalbandigen wesentlich deutlicher ist, ist das breite Spektrum eines kurzen Impulses mehr „tolerant“ zur Änderung: die maximale Amplitude  $S_E$  in Abb. 5 beträgt ca. 40% des Anfangswerts gegenüber nur noch 15% bei einem schmalbandigen Impuls.

Aus diesen zwei Effekten ergibt sich, dass kurze (breitbandige) Impulse für die Ultraschallprüfung von grobkörnigen Werkstoffen wesentlich günstiger sind als schmalbandige. Die Erfahrung der Praxis zeigt, dass der Ultraschall-Impuls, der etwa 1.5 Schwingungen enthält (relative Bandbreite ca. 140%), das beste Signal/Rausch-Verhältnis bei der Prüfung von austenitischen Schweißnähten aufweist.

## Wellenmode

In Gegensatz zu ferritischen Schweißverbindungen, die in der Regel durch Schrägeinschallung mittels vertikal-polarisierten Transversalwellen (SV-Wellen, nach *engl. Shear Vertical*) geprüft werden, sind die austenitischen Schweißnähte bezüglich dieser Wellenmode ungünstig. Dafür gibt es zwei Hauptgründe. In erster Linie, werden die vertikal-polarisierten Transversalwellen einer stärkeren Streuung an den Korngrenzen eines austenitischen Schweißguts unterzogen als die beiden anderen Wellenmoden (Longitudinal-Welle und horizontal-polarisierte Transversalwelle). Die Schwächung der SV-Welle ist genau so groß, wie die Schwächung der Longitudinalwelle mit doppelter Frequenz [2].

Außerdem ist die durch die Materialanisotropie und Inhomogenität verursachte Deformation (Spreizung und Aufspaltung) des Schallbündels einer vertikal-polarisierten Transversalwelle (siehe Abschnitt 5.4.4.2) viel stärker ausgeprägt, als bei Longitudinalwellen oder horizontal-polarisierten Transversalwellen.

Die horizontal-polarisierte Transversalwelle (SH-Welle, von *engl. Shear Horizontal*) ist am wenigsten durch die Anisotropie beeinflusst [30]. Sinnvoll anregbar sind SH-Wellen allein mit elektromagnetischen Ultraschallwandlern (EMUS). Sie leiden im Allgemeinen unter einem schlechteren Signal / Rausch-Verhältnis verglichen mit Piezoschwingern. Aufgrund des hohen technologischen Anspruchs an den Fehlernachweis und hohen Prüfkopf- und Gerätekosten der EMUS-Systeme werden in der Prüfpraxis überwiegend piezoelektrisch wandelnde Longitudinalwellen-Prüfköpfe verwendet.

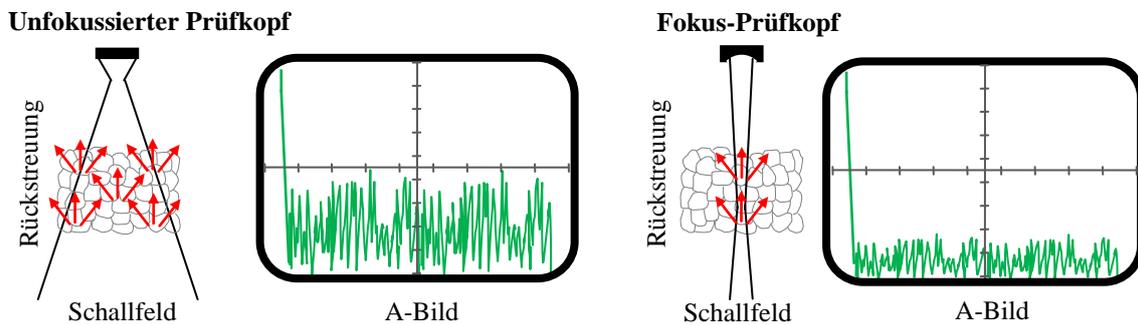
### 2.1.2.2 Problemangepasste Prüfköpfe

In diesem Abschnitt werden Einzel- und Dual (Zweikopf)-schwinger-Prüfköpfe beschrieben, die sich für die Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißnähten und anderen grobkörnigen Werkstoffen besonders eignen bzw. speziell für solche Prüfaufgaben entwickelt worden sind [26].

### Fokussierende Prüfköpfe

Da die Verminderung der durch die Schallstreuung verursachten Scheinanzeigen eine wichtige Aufgabenstellung bei der Ultraschallprüfung von grobkörnigen Strukturen ist, sind konventionelle Prüfköpfe mit divergenten Schallfeldern für austenitische Schweißnähte nicht immer optimal. Die Rückstreuesignale von sämtlichen Körnern, die vom Schallfeld erfasst worden sind, überlagern sich und werden registriert. Je breiter das Schallfeld ist, desto mehr Streusignale kommen zu Stande und desto schlechter ist das Signal/Rausch-Verhältnis. Die übliche Lösung des Problems

besteht im Einsatz von fokussierten Ultraschallwandlern (Abb. 6) und in der Begrenzung des Schallfeldes auf den Fehlerwartungsbereich.



**Abb. 6: Einfluss der Form des Schallfeldes auf den Pegel der Rückstreuanzeigen**

Fokussierende Prüfköpfe werden sowohl für die senkrechte als auch schräge Einschallung verwendet. Der Nachteil der Fokus-Prüfköpfe besteht darin, dass sich deren effektive Arbeitszone auf dem limitierten Fokus-Bereich beschränkt und Fehler nur innerhalb dieses Bereiches nachgewiesen werden können. Deswegen werden solchen Prüfköpfe meistens nicht für die Fehlersuche, sondern für die Analyse eines Befundes (z.B., Bestimmung der Längsausdehnung) verwendet.

### **SEL-Prüfkopf und ADEPT-Prüfkopf**

Das Wirkungsprinzip eines SEL-Prüfkopfes (**S**ende-**E**mpfangs-Prüfkopf für **L**ongitudinalwellen) basiert auf bekannter Funktionsweise eines Sender-Empfänger-Prüfkopfes, wobei die Aufgaben der Anregung und des Empfangs von elastischen Wellen zwischen zwei Piezoelementen verteilt werden. Die Begrenzung des Arbeitsbereiches (Fokussierung) erfolgt durch Überlagerung des Schallfelds vom Sender und des Empfangsbereichs des Empfängers.

Die Piezoelemente eines SEL-Prüfkopfes werden nebeneinander an einem Vorlaufkeil angebracht und sind mit einem Öffnungswinkel bzw. Dachwinkel zueinander angeordnet (Abb. 7 oben).

Ein ADEPT-Prüfkopf (**A**dvanced **D**ual **E**lement **P**robe **T**echnology) ist eine Sonderform des SEL-Prüfkopfes: Sender und Empfänger des Prüfkopfes sind nicht nebeneinander, sondern hintereinander angeordnet (Abb. 7 unten). Durch die entsprechende Anpassung von Keilwinkeln, die sich für Sender und Empfänger unterscheiden, erreicht man die gewünschte divergenzfreie fokussierte Richtcharakteristik eines ADEPT-Prüfkopfes.

Der Fokusbereich der SEL-Prüfköpfe ist wesentlich länger im Vergleich zu Einschwinger-Fokus-Prüfköpfen.

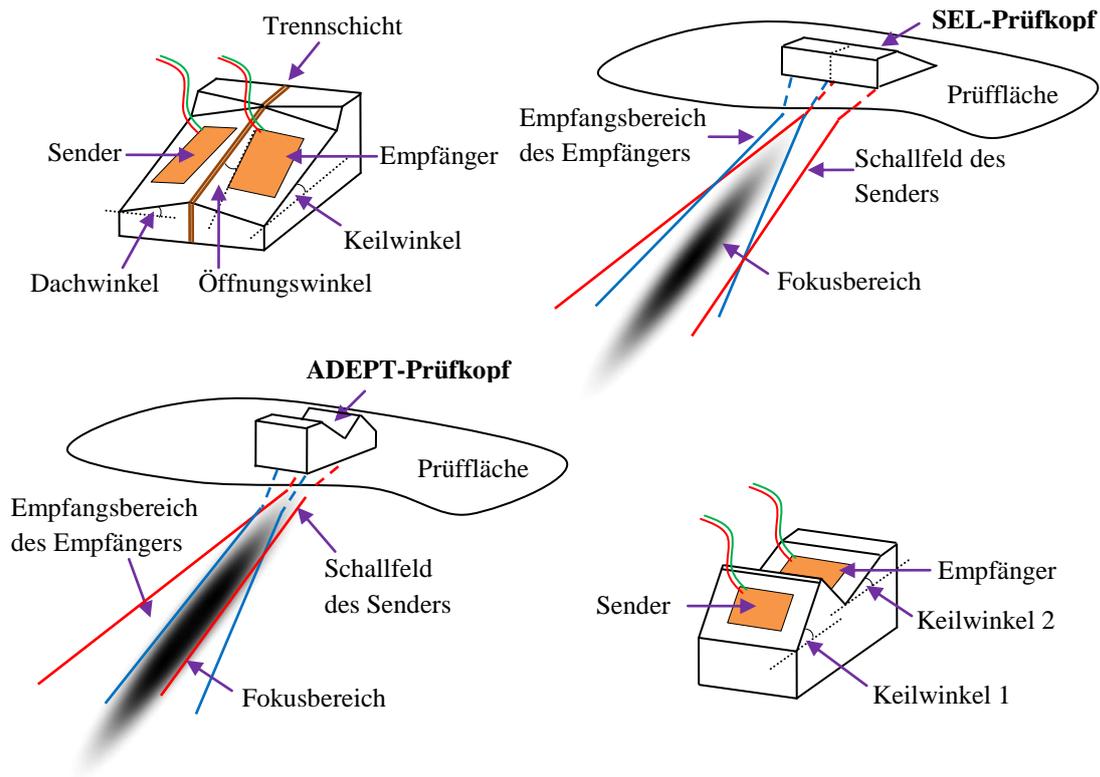


Abb. 7: Aufbauprinzip und Wirkweise eines SEL-Prüfkopfes und eines ADEPT-Prüfkopfes

### Kriechwellen-Prüfkopf

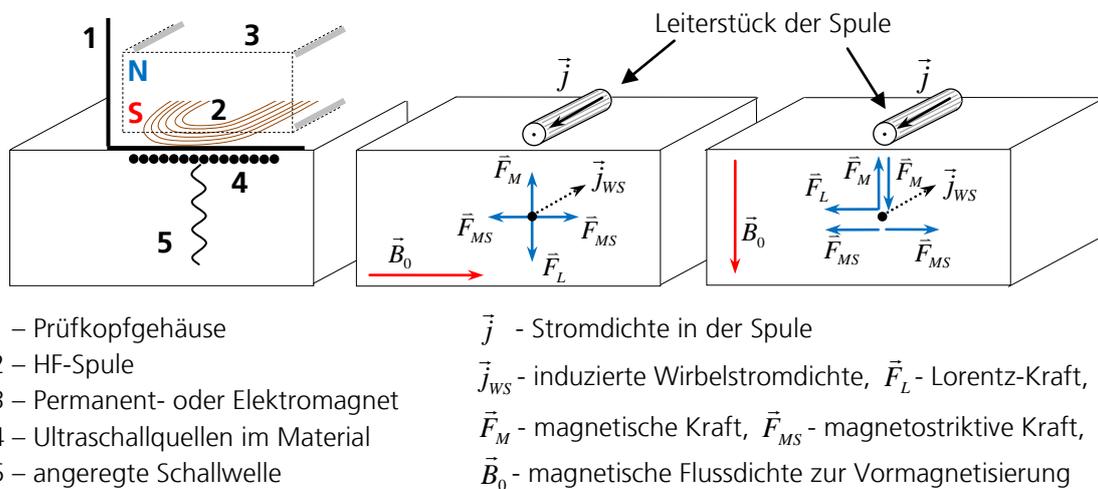
Der Keilwinkel eines Kriechwellen-Prüfkopfes entspricht dem Grenzwinkel der Totalreflektion für Longitudinalwellen, wobei sich die Longitudinalwelle (Kriechwelle) unter dem Winkel ca.  $83^\circ$  ausbreitet. Deswegen werden die Kriechwellenprüfköpfe hauptsächlich zur Prüfung von oberflächennahen Bereichen benutzt.

### EMUS-Prüfköpfe

Die wesentlichen Bestandteile eines EMUS-Wandlers sind (Abb. 8) eine Magnetisierungseinrichtung, bestehend aus Permanentmagneten oder Elektromagneten, und eine oder mehrere speziell geformte HF-Spulen, die im Sendefall dynamische elektromagnetische Felder in der Oberflächenregion eines leitenden Prüfobjekts induzieren. Im Empfangsfall werden in der Spule elektrische Spannungsimpulse induziert, die der Ultraschallamplitude proportional sind. Die Auslegung und Ausgestaltung eines EMUS-Wandlers hängt von den anzuregenden und zu detektierenden elastischen Wellenmoden ab. Die EMUS-Prüfköpfe funktionieren ohne Koppelmittel.

Im Fall der nichtferromagnetischen austenitischen Stähle basiert das Wirkprinzip eines EMUS-Prüfkopfes auf der Erzeugung von Lorentzkräften. Zitiert nach [31]:

„Über eine im Wandler angeordnete Spule, die im Sendefall mit einem HF-Burstsignal angeregt wird, werden in der dem Sensor zugewandten Testkörperoberfläche Wirbelströme induziert. Wird den Wirbelströmen ein senkrechtes, statisches oder quasistatisches Magnetfeld überlagert, wirkt senkrecht zu beiden Größen auf die bewegten Ladungsträger die Lorentzkraft und führt zu periodischen Gitterschwingungen aufgrund der oszillierenden Wirbelströme. Die Gitterschwingungen können als Quellen für Ultraschallwellen wirken. Dieser Mechanismus gilt für alle leitenden, metallischen Materialien. Die Anregung über Lorentzkräfte ist proportional zur statischen magnetischen Induktion und zum Spulenstrom.“ (Niese, 2010, S. 25)



**Abb. 8: Allgemeine Konstruktion und Wirkungsprinzip eines EMUS-Wandlers [31] in einem ferromagnetischen Werkstoff. In einem austenitischen Werkstoff sind die magnetische Kräfte ( $F_M$  und  $F_{MS}$ ) nicht vorhanden, es gibt nur Lorentzkraft  $F_L$ .**

Mit EMUS-Prüfköpfen können auch horizontal polarisierte Transversalwellen erzeugt und empfangen werden. Die erzeugten horizontal-polarisierten Transversalwellen durchdringen das stengelkristalline Gefüge ähnlich gut wie die Longitudinalwellen. Sind die Stengelkristalle in der Einschallebene orientiert (wie im Fall der Längsfehlerprüfung), besitzen die SH-Wellen eine weitere positive Eigenschaft– sie erfahren keine Wellenumwandlung an Grenzflächen. Außerdem, ist der Winkelspiegeleffekt der SH-Wellen im Einschallwinkelbereich zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  uneingeschränkt zu 100% wirksam.

Diesen Vorteilen stehen die Nachteile der EMUS-Prüfung (ein schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis, höhere Kosten des Wandlers und des Steuergeräts im Vergleich zur piezoelektrischen Ultraschallanregung) gegenüber.

### 2.1.3 Verwendung der Gruppenstrahlertechnik

Die in den letzten Jahren im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung stattfindende intensive Weiterentwicklung der Gruppenstrahlertechnik (oder **Phased-Array-Technik**) ist nicht zuletzt dem rasanten Fortschritt des „main streams“ bei der Entwicklung der Mikroelektronik und Sensorik zu verdanken. Obwohl die mehrkanaligen PA-Geräte einen komplizierten elektronischen Aufbau und hochentwickelte Steuerungssoftware verlangen, werden diese im Laufe der Zeit beständig erschwinglicher ersetzt daher zunehmend die konventionelle Ultraschallprüftechnik auch bei Standardanwendungen.

Ein Gruppenstrahler (oder „Phased Array“-Prüfkopf) ist ein Ultraschallprüfkopf, dessen aktive, „strahlende“ Fläche in kleine Segmente in einer Richtung (lineares Array) bzw. zweidimensional (Matrix-Array) unterteilt wird. Die Elemente werden elektronisch getrennt voneinander angesteuert [32]. Aufgrund der mit der angeregten Wellenlänge kleineren bis vergleichbaren Ausdehnung können diese elementaren Wandler in entsprechenden Raumprojektionen als Punktquellen betrachtet werden, die zylinderförmige bzw. kugelförmige Ultraschallwellenfronten erzeugen. Diese werden in dem Halbraum unter dem Prüfkopf miteinander überlagert. Durch Superposition von elementaren ungerichteten Wellen nach dem Huygens’schen Prinzip entsteht das Schallfeld, das einerseits bei gleichzeitiger Anregung von allen Elementen dem Schallfeld eines Einzelschwingers gleicher Dimensionen entspricht. Andererseits wird bei der Erzeugung des Schallfeldes das starre eindeutig bestimmte konstante Flächenintegral der Schwingerfläche  $S$  durch eine flexible steuerbare Summierung der Elementarwellen ersetzt (Abb. 9). In der Abbildung 9 werden folgende Bezeichnungen verwendet:  $P_x$  und  $P_0$  – Schalldruck im Punkt  $x$  des Volumens bzw. direkt unter dem Wandler,  $\lambda$  – Wellenlänge,  $r_x$  – Radiusvektor zum Punkt  $x$ ,  $S$  – Schwingerfläche,  $l$  – Elementlänge.

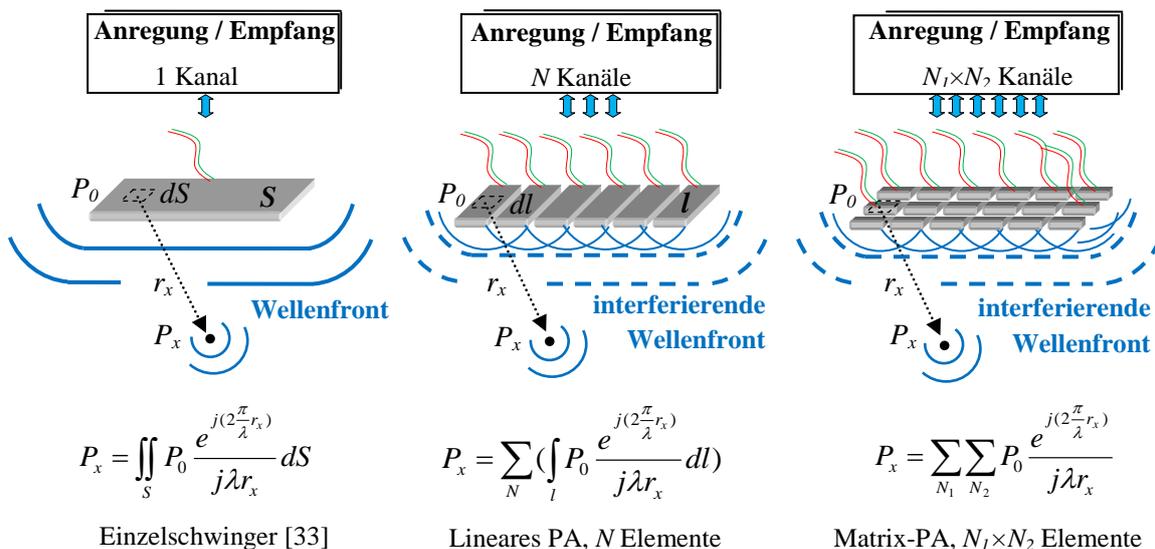


Abb. 9: Wirkweise und Schallfelder von Phased Array Prüfköpfen

Durch eine zeitverzögerte Anregung bzw. Empfang der Elementarwellen ermöglichen die PA-Prüfgeräte, das nach dem Superpositionsprinzip sich ergebende Schallfeld zu steuern. Ein linearer Gruppenstrahler gestattet die Schwenkung und/oder Fokussierung der Wellenfront innerhalb der Ebene unter dem Prüfkopf, die parallel zur Ausrichtung der Elemente ist. Ein Matrix-PA ermöglicht dasselbe im Raum.

Die Entwicklung der Gruppenstrahlertechnik hat die Ultraschallprüfung auf ein neues Qualitätsniveau gebracht. Ein Phased-Array-Prüfkopf mit einem elektronisch gesteuerten Schallfeld ersetzt die ganze Reihe von Einzelschwinger-Prüfköpfen, deren Einschallwinkel- oder Fokusbereich vorgegeben ist. Dieser Vorteil lässt sich natürlich auch bei der Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißnähten nutzen.

Auf der Basis der Gruppenstrahlertechnik können auch die erwähnten Prüfkopfkonzepte (ADEPT, SEL) realisiert werden (Abb. 10). Es gibt auch EMUS-Arrays [34].

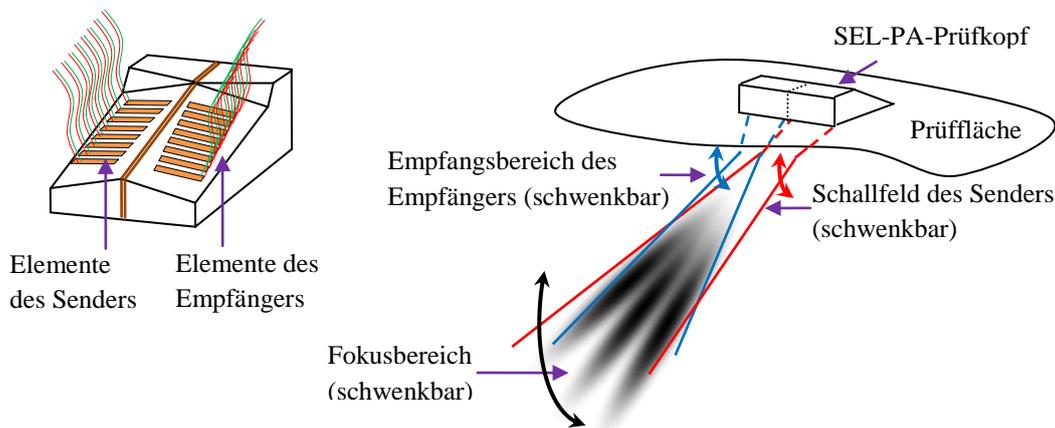


Abb. 10: SEL-Gruppenstrahler

## 2.2 Stand des Wissens im Bereich der Ultraschallprüfung an austenitischen Schweiß- und Mischverbindungen

Theoretische Grundlagen zur Schallausbreitung in einem anisotropen Medium wurden in den 1950er-1960er Jahren von *Musgrave* [35], *Helbig* [36] und *Fedorov* [37] ausgearbeitet und mathematisch beschrieben. In der heutigen Zeit wurden die Schallausbreitungsphänomene in anisotropen und inhomogenen Werkstoffen, inklusive das Verhalten des Schallfeldes an den Inhomogenität-Grenzen, in den Doktor- und Masterarbeiten von *Slawinski* [38], *Vestrum* [39], *Niklasson* [40] und *Halkjær* [41] detailliert analysiert.

Seit den 1980er Jahren ist die Optimierung der Ultraschallprüfung an akustisch anisotropen und inhomogenen austenitischen Schweiß- und Mischschweißverbindungen das Thema von mehreren Forschungs- und Entwicklungsvorhaben gewesen.

Der Einfluss der Anisotropie und Inhomogenität einer austenitischen Naht auf die ausbreitende akustische Welle hängt sehr stark von den ausgewählten Prüfparametern (dem Einschallwinkel, der Wellenmode, der Frequenz, der Prüfposition usw.) ab. Die Interpretation und die Auswertung der empfangenen Ultraschallsignale bzw. die Optimierung der Prüfparameter sind nicht möglich ohne das Verständnis über die Ausbreitung der elastischen Wellen durch die Schweißnaht. Deswegen wurde eine Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten zum Thema „Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißverbindungen“ der Simulation der Schallausbreitung komplett oder zum Teil gewidmet. Heutzutage werden folgende Simulationsverfahren entwickelt und für anisotrope und inhomogene Werkstoffe verwendet:

- Ray Tracing (Strahlverfolgung) – [42, 43, 44, 46, 46]
- Gaußsche Wellenpakete (GWP) – [47, 48, 49, 50, 51]
- Generalisierte Punktquellensynthese (GPSS) – [52]
- Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT) – [41, 53, 54, 55].

Als praxisrelevantes Ergebnis der Schallausbreitungssimulation zählt in erster Linie die Visualisierung der Schallverfolgung durch anisotropes und inhomogenes Gefüge einer austenitischen Schweißnaht, sowie die Abschätzung der Wirkung der Schweißnahtstruktur auf das Schallfeld. Dies erleichtert wesentlich die Interpretation der empfangenen Ultraschallsignale.

Das zweite Ergebnis folgt aus dem ersten und besteht in der Möglichkeit, die Prüfparameter (Einschallwinkel, Prüfposition usw.) basierend auf dem Verständnis der Schallausbreitungsphänomene zu optimieren. Das war, z. B., das Hauptziel von den Forschungsprojekten des Fraunhofer IZFP *Austenit I, II* und *III* [56, 57, 58], die von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) beauftragt wurden. Im Rahmen der Projekte wurden schrittweise, mit steigender Komplexität, die Simulationsalgorithmen (Ray Tracing, GWP, GPSS und EFIT) entwickelt bzw. angepasst und validiert, welche die Schallausbreitung in:

- einem homogenen anisotropen Medium,
- einem Drei-Schicht-Medium „isotrop - anisotrop homogen - isotrop“,
- einem inhomogenen anisotropen Medium (das als Mehr-Schicht-Medium betrachtet wurde)

simulieren konnten. Im Rahmen der Projekte wurde nachgewiesen, dass die kristalline Gefügestruktur einer austenitischen Schweißnaht als eine Mehrheit von transversal-isotropen Schichten betrachtet werden kann.

Breiter Einsatz der Gruppenstrahlertechnik in die Prüfpraxis initiierte die F&E-Vorgänge, deren Ziel war, die Vorteile dieser Technik für traditionell „schwerprüfbare“ austenitische Schweißnä-

te auszunutzen. Als Beispiel dafür dient die Arbeit [51]. In diesem Forschungsvorhaben wird die Schallausbreitung durch das erstellte Modell einer Mischschweißverbindung anhand der Gaußsche-Wellenpakete-Methode (*engl.* multi-Gaussian beam, oder MGB) mit Berücksichtigung der Anisotropie und Inhomogenität simuliert. Im Laufe des Simulationsvorganges werden die Schalllaufzeiten von jedem Element des Gruppenstrahlers bis zum gewünschten Fokuspunkt bestimmt und danach für die Bildung des Verzögerungsgesetzes genutzt.

Das Fraunhofer IZFP hat in den letzten Jahren als Auftragnehmer [59, 60] bzw. als Unterauftragnehmer [61, 62, 63] in mehreren Forschungsvorhaben teilgenommen, in welchen unter anderem die bildgebende Technik der synthetischen Fokussierung (SAFT)<sup>3</sup> für die Ultraschallprüfung an Mischverbindungen und an plattierten Testkörpern angewandt wurde. Die Ergebnisse der Vorhaben [61, 62, 63] zeigen, dass das Nachweisvermögen der SAFT-Technik Dank der Steigerung des Signal-Rausch-Verhältnisses ein wenig höher im Vergleich zum konventionellen Verfahren ist. Trotzdem führt die Wirkung der Anisotropie und der Inhomogenität zu falscher Darstellung der vorhandenen Fehler (sowohl in der Lage als auch in der Ausdehnung). Im Rahmen des IZFP-Vorhabens [60] wurde die Erweiterung des SAFT-Algorithmus entwickelt und validiert. Die neue Technik wurde InASAFT (Inhomogene-Anisotrope-SAFT) genannt und wird mit Berücksichtigung der Anisotropie und der Inhomogenität des Prüfgegenstandes realisiert. Diese Technik gewährleistet eine korrekte Darstellung der Bindefehler in einer Mischschweißverbindung bei der Rekonstruktion sowohl von den simulierten (EFIT) als auch von gemessenen Daten. Trotzdem war das Signal-Rausch-Verhältnis an realen Messdaten nicht ausreichend.

Im Rahmen seiner Dissertation hat *Connoly* [64] den Messvorgang eines Gruppenstrahlers an einer austenitischen Schweißnaht modelliert, wobei die einzelnen Elemente des Wandlers eins nach dem anderen als Sender dienten. Es wurde die Schallausbreitung von einzelnen Elementen des PA-Wandlers durch das erstellte pixelierte Modell des anisotropen und inhomogenen Schweißnahtgefüges simuliert. Dafür wurden zwei Simulationsverfahren verwendet – Ray Tracing und EFIT-Methode. Das Nahtmodell „enthielt“ in einem Fall einen punktförmigen Reflektor (Zylinderbohrung) und in anderem – Bindefehler. Während des Simulationsvorganges erfolgten:

- 1) Bestimmung der Laufzeiten von jedem einzelnen PA-Elementen bis zu jedem Pixel des Modells;
- 2) Modellierung von synthetischen Ultraschalldaten (A-Signalen), die von jedem PA-Element „erzeugt“ bzw. „empfangen“ wurden.

---

<sup>3</sup> wird detailliert im Abschnitt 4.1.2.1 erläutert

Danach wurden die synthetisierten Ultraschalldaten in der SAFT-Rekonstruktion nach dem Total Focusing Method (TFM) [65] genutzt. Der erwähnte Rekonstruktionsalgorithmus ist völlig äquivalent der Rekonstruktion nach dem Sampling Phased Array (SPA) Prinzip, welches im Kapitel 4 der vorliegenden Dissertation detailliert erläutert wird.

*Connolly* [64] hat anhand der synthetischen Daten gezeigt, dass die Rekonstruktion der Ultraschallergebnisse an einer austenitischen Schweißnaht nach dem Total Focusing Method mit Berücksichtigung der Anisotropie und Inhomogenität eine quantitative Aussage über die Lage und Ausdehnung der Materialungängen gewährleistet. An realen austenitischen Schweißnähten wurde diese Fähigkeit in [64] nicht untersucht.

Einer der wichtigsten Faktoren, der die Zuverlässigkeit jedes Simulationsvorganges unabhängig vom verwendeten Verfahren bestimmt, ist die Genauigkeit der Parameter des angenommenen Modells. Im Fall einer austenitischen Schweißnaht bzw. einer Mischverbindung gehören dazu die dendrite Gefügestruktur der Naht und ihre elastischen Eigenschaften sowie die Eigenschaften der geschweißten Komponente.

Man muss bemerken, dass das Bilden der Stengelkristallite während des Erstarrungsprozesses von mehreren Faktoren abhängt und die Gefügestruktur nie a-priori genau bekannt ist. In den meisten in diesem Abschnitt erwähnten wissenschaftlichen Arbeiten wurde das Modell des anisotropen inhomogenen Nahtgefüges anhand eines Schliffbildes erstellt. Bei der praktischen Prüfung an realen Objekten ist nur mit extremem, teils zerstörendem Aufwand möglich.

### 3. Motivation und Zielsetzung

Die austenitische Schweiß- und Mischverbindungen finden eine breite Anwendung, unter anderem, in den Industriebranchen mit hohen sicherheitstechnischen Anforderungen. Gleichzeitig beschränkt ihre ausgeprägte Anisotropie und inhomogene Gefügestruktur das Nachweisvermögen der Ultraschallprüfung. Viele nationale und internationale F&E-Projekte zum Thema der Ultraschallprüfung von austenitischen und Mischschweißverbindungen tragen zwar zum Verständnis der Schallausbreitungsphänomene bei, bieten aber keine Ansätze für die Verbesserung der Prüftechnik in der Praxis.

Das Hauptziel der vorliegenden Dissertation besteht in der Entwicklung einer direkt nutzbaren Ultraschallprüftechnik, die den zuverlässigen Nachweis und Bewertung der Materialungängen in akustisch anisotropen und/oder inhomogenen Werkstoffen gestattet. Für den Einsatz an austenitischen Schweiß- und Mischverbindungen muss die Prüftechnik nachfolgende Anforderungen erfüllen:

- *Zuverlässiger Fehlernachweis in anisotropen inhomogenen Werkstoffen*

Die Prüftechnik muss den Nachweis sowohl der voluminösen als auch der rissartigen Fehler gewährleisten.

- *Quantitative Aussagen zu Fehlergröße, -art und -lage*

Die handelsübliche Ultraschallprüfung ist – gemessen an den Standards – zurzeit qualitativ. Eine Aussage bezüglich der Zulässigkeit / Unzulässigkeit der Befunde basiert auf der Unter- / Überschreitung von definierten Amplitudenschwellen, die an dem Justier- oder Vergleichskörper eingestellt werden. Die Fehlergröße wird durch Vergleich der Anzeigeamplitude mit der Amplitude der Reflektion von einem Referenzreflektor (Vergleichskörpermethode [27]) oder einem Ersatzreflektor (AVG-Methode) abgeschätzt. Der Typ des Fehlers (volumenhaft / flächig) und seine relativen Dimensionen werden anhand der Halbwertsmethode [27] bestimmt, wobei die Amplitudendynamik (Abfall der Anzeigeamplitude um 6 dB<sup>4</sup>) analysiert wird. Sämtliche dieser Methoden gewährleisten keine Aussage über die tatsächlichen Größenparameter des Fehlers und können zur falschen Bewertung des Objektzustandes führen. Besonders kritisch ist der Fall eines Fehlers mit rauer Oberfläche, an der die elastischen Wellen nicht „spiegelnd“ reflektiert sondern gestreut werden.

---

<sup>4</sup> je nach den Anforderungen der entsprechenden Prüfnormen können andere Amplitudenschwellen eingesetzt werden (z.B. -10/-20 dB)

Bei der US-Prüfung von anisotropen inhomogenen austenitischen Schweißverbindungen ist infolge der Schallbeugungseffekte zusätzlich die Ermittlung der Fehlerlage bzw. die Trennung des Fehlers von den geometrischen Anzeigen, welche, je nach Konstruktion (Geometrie) sehr komplex sein können, sehr kompliziert. Die Auswertung der Prüfergebnisse hängt in diesem Fall größtenteils von der Erfahrung des Prüfers ab und ist subjektiv.

Die in dieser Dissertation zu entwickelnde Prüftechnik muss die Prüfergebnisse an einem anisotropen inhomogenen Prüfobjekt in solcher Form darstellen, dass diese Ergebnisse, einerseits, einfach und eindeutig sind und, andererseits, quantitativ bewertet werden können.

Die erwünschten Anforderungen sind auch:

- *Verkürzte Prüfzeit*

Wie oben beschrieben, beinhaltet die Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißverbindungen, insbesondere an sicherheitsrelevanten Objekten, den Einsatz von mehreren Ultraschallprüftechniken, um eine möglichst ausreichende Fehlernachweissicherheit zu erreichen. Dies führt zu erhöhten Zeit- und Aufwandkosten. An KKW-Anlagen kann dadurch zusätzlich eine erhöhte Strahlenbelastung des Prüfpersonals verursacht werden, welche zu minimieren ist.

Die neue Prüftechnik soll die zuverlässige Ultraschallprüfung von anisotropen inhomogenen Werkstoffen mit nur einem Prüfvorgang ermöglichen.

- *Allgemeingültigkeit*

Die Prüftechnik soll für alle Typen von austenitischen Schweiß- und Mischverbindungen ohne wesentliche Änderungen des Prüfkonzeptes anwendbar sein. Man muss, wie schon mehrfach bemerkt, darauf hinweisen, dass sich sowohl die physikalischen Eigenschaften der geschweißten Materialien als auch die Gefügestruktur einer austenitischen Naht von Verbindung zu Verbindung unterscheiden. Es gibt auch mehrere Varianten der Mischschweißverbindungen. Im Prinzip ist jede austenitische Schweißnaht einzigartig. Darüber hinaus folgt das Bedürfnis nach einem Hilfsmittel – Simulationssoftware –, das die Schallausbreitungsphänomene in jedem konkreten Fall nachbildet, um diese danach zu nutzen. Das ist ein zwar untergeordnetes Ziel, gemessen am Erreichen eines wesentlich neuen Standes des Wissens und der Technik, das trotzdem im Rahmen dieser Dissertation erreicht werden soll.

Jedes Simulationsverfahren erfordert die Erstellung eines physikalischen Modells (in diesem Fall – Schweißnahtmodells). Da im Allgemeinen das angenommene Modell von der Realität abweichen kann (Näherungen) und dies die Zuverlässigkeit der Simulation beeinflusst, muss die zu entwickelnde Simulationssoftware einen Rückkopplungsmechanismus für die Anpassung der Parameter an das angenommene Modell besitzen, um es zu verbessern.

Als Grundlage der neuen Ultraschallprüftechnik kann das am Fraunhofer IZFP entwickelte [66] und patentierte [67, 68] Prüfverfahren auf der Basis von Gruppenstrahlerprüfköpfen – der getaktete Gruppenstrahler („Sampling-Phased-Array“ oder SPA) – mit seiner aussagekräftigen zwei- und dreidimensionalen Fehlerbildvisualisierung dienen. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation muss die SPA-Prüftechnik für die Anwendung an akustisch anisotropen inhomogenen Werkstoffen wie austenitischen Schweißnähten erweitert werden.

Zu den eingesetzten Zielen gehört auch die Validierung der neuen Prüftechnik an austenitischen Schweißnähten mit künstlichen und realen Fehlern. Es muss sowohl das Nachweisvermögen des Verfahrens als auch sein Vermögen, die Irregularität quantitativ zu beschreiben, nachgewiesen werden.

Für den Einsatz der neuen Prüftechnik soll eine praxistaugliche Vorgehensweise ausgearbeitet werden.



## 4. „Sampling Phased Array“ mit inverser Phasenanpassung

### 4.1 Das Prinzip der Sampling-Phased-Array-Technik mit synthetischer Fokussierung

In einem Sende-/Empfangsvorgang des konventionellen Gruppenstrahlers sind in der Regel alle Elemente des Arrays sowohl als Sender als auch als Empfänger beteiligt. Die empfangenen Laufzeitsignale von einzelnen Elementen des Gruppenstrahlers werden nach einem bestimmten Gesetz addiert [69]. Das dadurch entstehende Summensignal repräsentiert die empfangene Information aus einer bestimmten Einschallrichtung, welche in weiten Grenzen frei, nach dem oben genannten Gesetz, wählbar ist. Damit besteht der Vorteil der konventionellen Gruppenstrahlertechnik darin, dass dieser phasengesteuerte Gruppenstrahler eine Vielfalt von Einzelschwingerprüfköpfen mit unterschiedlichen Einschallwinkeln ersetzt. Um  $n$  Einschallwinkel bzw. Fokuspunkte anzuschallen, sind demgemäß  $n$  Anregung- und Empfang-Takte erforderlich (Abb. 11).

Analysiert man den Informationsgehalt der gemessenen Zeitsignale, so erkennt man, dass durch die phasengesteuerte Anregung der Wellen und Addition der elementaren Signale  $A_{ij}$  ( $i$ : sendendes Element,  $j$ : empfangendes Element) der größte Anteil der nützlichen Ultraschallinformation verloren geht [66] (Abb. 11,  $N$ : Anzahl der Elemente eines Gruppenstrahlers,  $S$  – Sender,  $E$  – Empfänger).

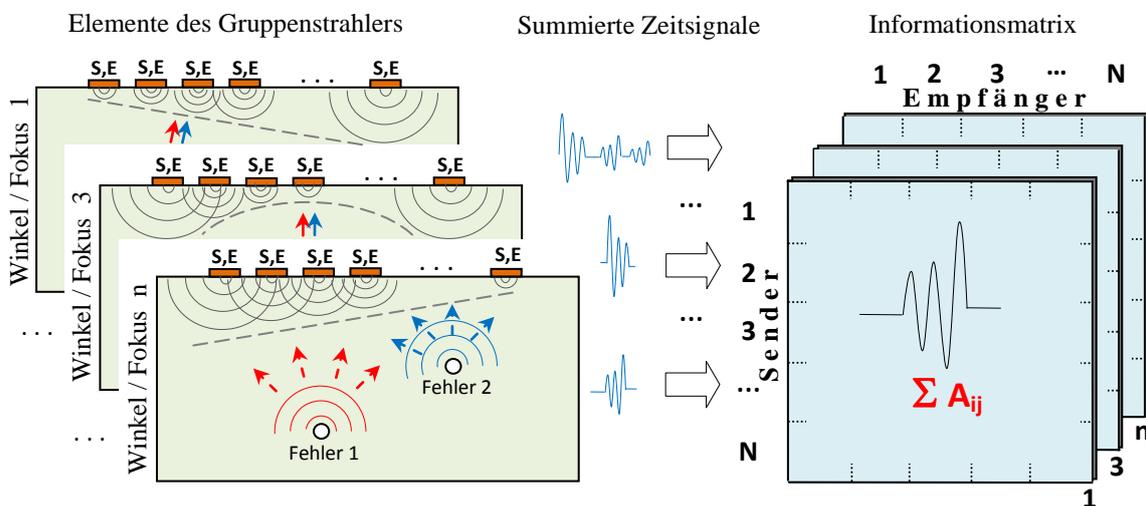


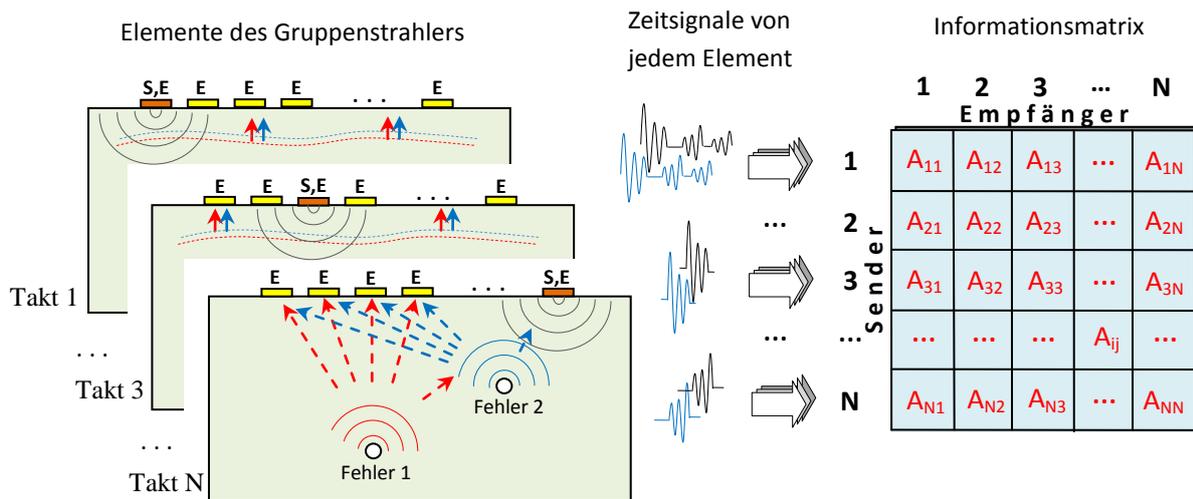
Abb. 11: Das Prinzip und Informationsgehalt eines konventionellen Gruppenstrahlers

Die heute gegebenen Möglichkeiten der schnellen Datenerfassung, Speicherung und Verarbeitung erlauben es jedoch, die einzelnen Zeitsignale von Elementen des Gruppenstrahlers zu erfassen und auch in Echtzeit zu verarbeiten. Die am Fraunhofer Institut für zerstörungsfreien Prüfverfahren entwickelte neuartige Prüftechnik auf der Basis von Gruppenstrahlerprüfköpfen – Getakteter Gruppenstrahler oder **Sampling-Phased-Array-Technik** [66, 67, 68] genannt, – basiert auf

Anregung, Empfang und Bearbeitung der elementaren Ultraschallsignale von einzelnen Elementen des Gruppenstrahlers. Die Technik erzeugt und nutzt die vollständige Ultraschallinformation einer Gruppenstrahlermessung und weist wesentliche prüftechnische Vorteile im Vergleich zur konventionellen Gruppenstrahlertechnik auf.

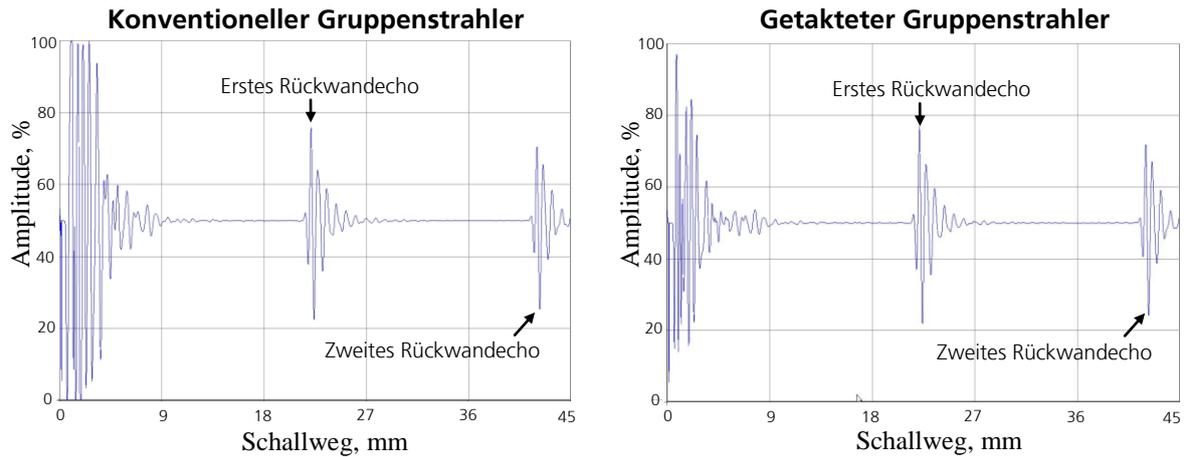
#### 4.1.1 Messprinzip der „Sampling-Phased-Array“-Technik

Messtechnisch wird die SPA-Technik dadurch realisiert, dass nur ein Element des Gruppenstrahlerprüfkopfes sendet, während alle anderen Elemente empfangen. Die aufgenommenen Zeitsignale werden abgespeichert. Sendet z.B. in einem Messtakt das  $i$ -te Element, dann ergeben sich entsprechend der  $1 \dots N$  empfangene Zeitsignale die Elemente  $A_{ij}$  der Informationsmatrix (Abb. 12, wobei  $i$ : das sendende Element,  $j$ : das empfangende Element,  $N$ : die Anzahl der Elemente eines linearen Gruppenstrahlers,  $S$  – der Sender,  $E$  – der Empfänger kennzeichnen). Nach  $N$  Takten ist die Informationsmatrix aufgefüllt – sie enthält die gemessenen Zeitsignale von allen Kombinationen von Sendern und Empfängern.



**Abb. 12: Das Prinzip 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 (im Rechner) 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 zum Laufzeitsignal des konventionellen Gruppenstrahlers auf (Abb. 13). Die Parität der physikalischen und der synthetischen Superposition der elementaren Ultraschallwellen wurde in [66] aufgewiesen.



**Abb. 13: Äquivalenz des konventionellen Gruppenstrahlers und getakteten Gruppenstrahlers bei senkrechter Einschallung des Testkörpers mit Wandstärke 20 mm [66]**

Neben der vollen Äquivalenz der synthetisch nachgebildeten Signale, ermöglicht die SPA-Technik im Vergleich zur konventionellen Gruppenstrahler-Technik eine wesentliche Beschleunigung des Prüfvorganges. Das Einstellen eines Einschallwinkels bzw. einer Fokustiefe beim konventionellen Gruppenstrahler erfordert eine zusätzliche Ultraschallmessung (Zeit pro Datenaufnahme ~ mehrere Mikrosekunden), während beim getakteten Gruppenstrahler das gleiche Ergebnis aus der bestehenden Informationsmatrix rein rechnerisch erzeugt werden kann (Zeit pro Rechenoperation ~ mehrere Nanosekunden).

#### 4.1.2 Rekonstruktion von Ergebnisbildern

Ein weiterer Vorteil der SPA-Technik besteht in der Möglichkeit der schnellen synthetischen Fokussierung in jeden beliebigen berechenbaren Punkt des beschallten Volumens innerhalb des Nahfeldes des Prüfkopfs.

In der Fachliteratur der letzten Jahre lassen sich mehrere bildgebende Ultraschallprüftechniken verfolgen, die relativ ähnliche Ansätze in der Verarbeitung der Ultraschallsignale und Rekonstruktion der Ultraschallbilder realisieren [65, 66, 70, 71]. 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, der zunächst heuristisch von *Doctor* [72] im Jahre 1986 begründet und später von *K.-J. Langenberg* [73, 74] theoretisch untermauert wurde.

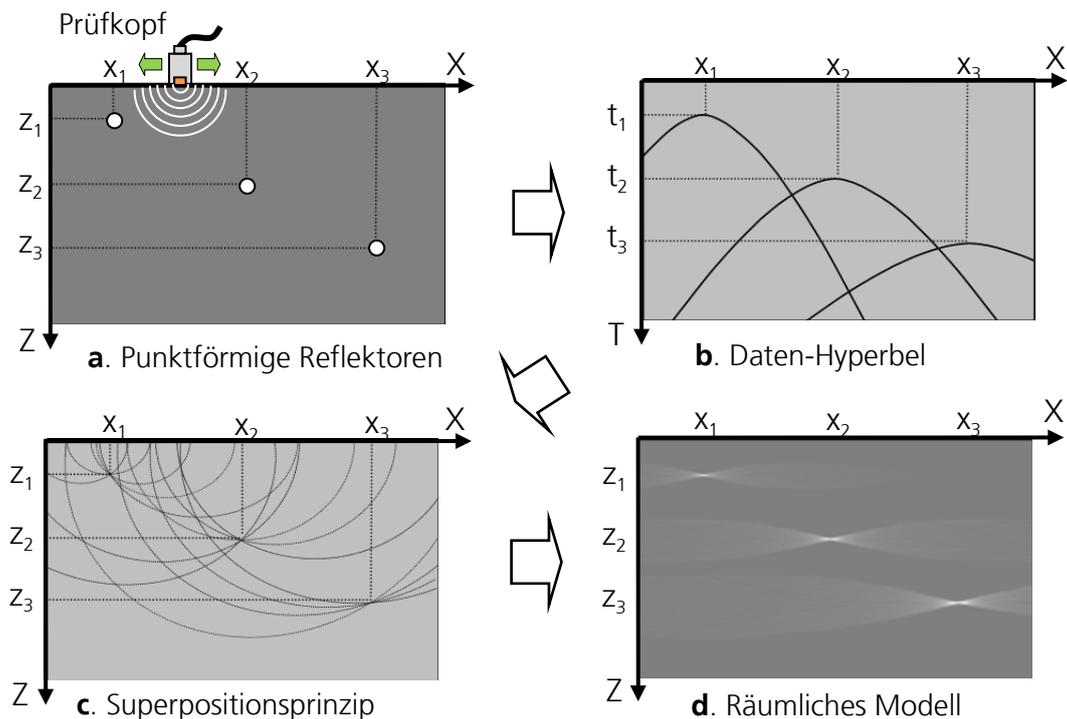
Der SAFT-Algorithmus ist als verallgemeinerte Version einer beugungstomographischen Rückausbreitung der Daten im Zeitbereich zu interpretieren [75].

#### 4.1.2.1 Das Prinzip des SAFT-Algorithmus

Die Prinzipien des Algorithmus und der auf der Migrationstechnik basierten SAFT-Bildrekonstruktion werden in den Dissertationen von *Bulavinov* [66] und *Zimmer* [75] detailliert erläutert. In diesem Abschnitt werden daher diese mit Hilfe von Bildern und Formeln aus erwähnten Quellen allein nochmal kurz zusammengefasst.

Das klassische SAFT-Verfahren wird anhand eines Prüfkopfs realisiert, der eine kleine Apertur besitzt und damit ein sehr divergentes Schallfeld erzeugt. Der Prüfkopf wird gemäß einem ein- oder zweidimensionalen Raster, entsprechend einer flächigen oder linearen Apertur verfahren. Abb. 14 zeigt nachfolgend die Reihenfolge der Datenbearbeitungsschritte 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. 14a). Der Werkstoff des Prüfobjektes wird als homogen-isotrop angenommen. Das Objekt wird von einem Ultraschallwandler mit kleiner aktiver Apertur beschallt. Der Wandler sendet zum Zeitpunkt  $t_0=0$  eine ungerichtete akustische Welle aus, die sich der mit konstanter Geschwindigkeit  $V_0$  im Prüfobjekt ausbreitet.



**Abb. 14: Zur Erläuterung des SAFT-Algorithmus**

Nachdem die Ungängen im Prüfstück von der ankommenden Welle getroffen werden, erzeugen diese als sekundäre Quellen kugelförmige Streufelder, die vom Ultraschallwandler empfangen werden. Der Prüfkopf wird dann auf der Messfläche um das Inkrement  $dx$  (in der Regel mit einer

Schrittweite von  $\sim 0.1$  Wellenlänge) verschoben. Die Sende/Empfangsverfahren wird in jeder Messposition wiederholt. Durch die Variation des Empfangsortes entsteht für jede Ungänge im Datenbereich eine hyperbelförmige Laufzeitortskurve (Abb. 14b).

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. 14c). Der Übergang vom Zeitbereich (empfangenen Laufzeitortskurven) zum räumlichen Modell erfolgt durch Multiplikation mit der Schallgeschwindigkeit  $V_0$ . Mathematisch formuliert, wird jedem Pixel  $(x', z')$  im Rekonstruktionsraum der Wert  $R$  zugeordnet, der einem Integral der skalaren Messdaten  $\eta$  entlang den Datenhyperbeln  $B$  gemäß

$$R(x', z') = \int_B \eta \left( x, t = 2 \frac{\sqrt{(x-x')^2 + (z-z')^2}}{V_0} \right) dx \quad (14)$$

entspricht, wobei  $x$  die Reihe der Messpositionen ist. Dieser Ansatz wird in [75] als pixelorientierte Formulierung der SAFT-Rekonstruktion bezeichnet und wird in Abb. 15a 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. 14c, 14d). 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. 14d).

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 (siehe Abschnitt 4.3).

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 diffraktierten/reflektierten akustischen Wellen von allen Richtungen gleichzeitig. Die Information über der Reflektorlage ist in einem einzelnen betrachteten A-Scan nur in der Form der Laufzeit vorhanden. Gibt es in dem A-Scan  $A(t)$  eine Anzeige bei der Laufzeit  $t=t_j$  (Abb. 15b), so bedeutet es, dass der Reflektor in einem zu der Ortslinie  $O = 1/2 \times \text{Isochrone } t_j \times \text{Schallgeschwindigkeit}$  gehörigen Punkt liegt. Die Rückprojektion des A-Scans  $A=A(t)$  ins räumliche Modell besteht in der Zuordnung des Wertes  $A_j=A(t_j)$  zu jedem Pixel, durch welchen diese

Ortslinie läuft. In der Abbildung wird die Schallgeschwindigkeit aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit als  $V_0 = 2$  bel. Einh. festgelegt. Dieser Vorschrift folgend 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.

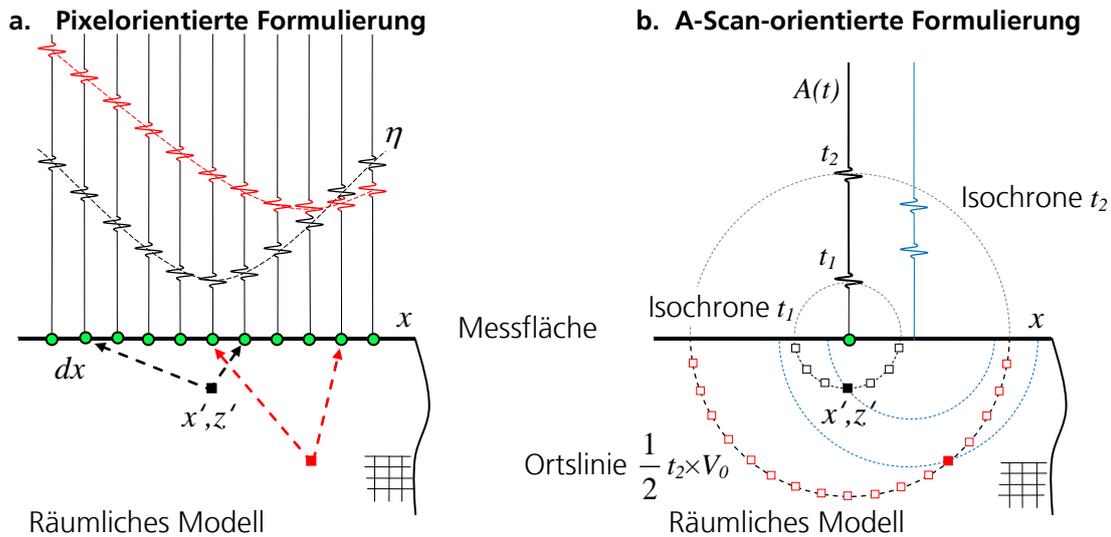


Abb. 15: Pixelorientierte und A-Scan-orientierte Formulierungen der SAFT-Rekonstruktion

#### 4.1.2.2 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 fast die gleichen physikalischen Eigenschaften haben, können sie in Analogie zum üblichen SAFT-Algorithmus als  $N$  Messpositionen eines Einzelschwinger-Prüfkopfes betrachtet werden. Die Gruppenstrahler-Elemente sind in einer (ein Linien-Array) bzw. in zwei (ein 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, der normalerweise die Ultraschallsignale eines Einzelschwinger-Prüfkopfes verarbeitet, können beim getakteten Gruppenstrahler verschiedene Kombinationen von Sendern und Empfängern in der Rekonstruktion berücksichtigt werden. Diese Möglichkeit erweitert den Informationsgehalt des Verfahrens und verbessert damit sein Fehlernachweisvermögen. Die Formel 14 erweitert sich in diesem Fall zu:

$$R(x', z') = \int_B \eta \left( x, t = \frac{\sqrt{(x_S - x')^2 + (z_S - z')^2}}{V_0} + \frac{\sqrt{(x_E - x')^2 + (z_E - z')^2}}{V_0} \right) dx \quad (15)$$

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.

Wir wollen das Prinzip der SPA-Rekonstruktion am Beispiel eines linearen Phased-Array-Wandlers erläutern. 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 (Pixel) unterteilt. Für jeden Pixel innerhalb des rekonstruierten Bereiches wird die Schalllaufzeit  $T_{ij}$  von den aktuellen Positionen des Senders  $(x_i, z_i)$  zu diesem Bildpixel  $(x_m, z_m)$  und zurück vom Pixel zum Empfänger  $(x_j, z_j)$  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. 16). Diese Prozedur wird für jede „Sender-Empfänger“-Kombination wiederholt.

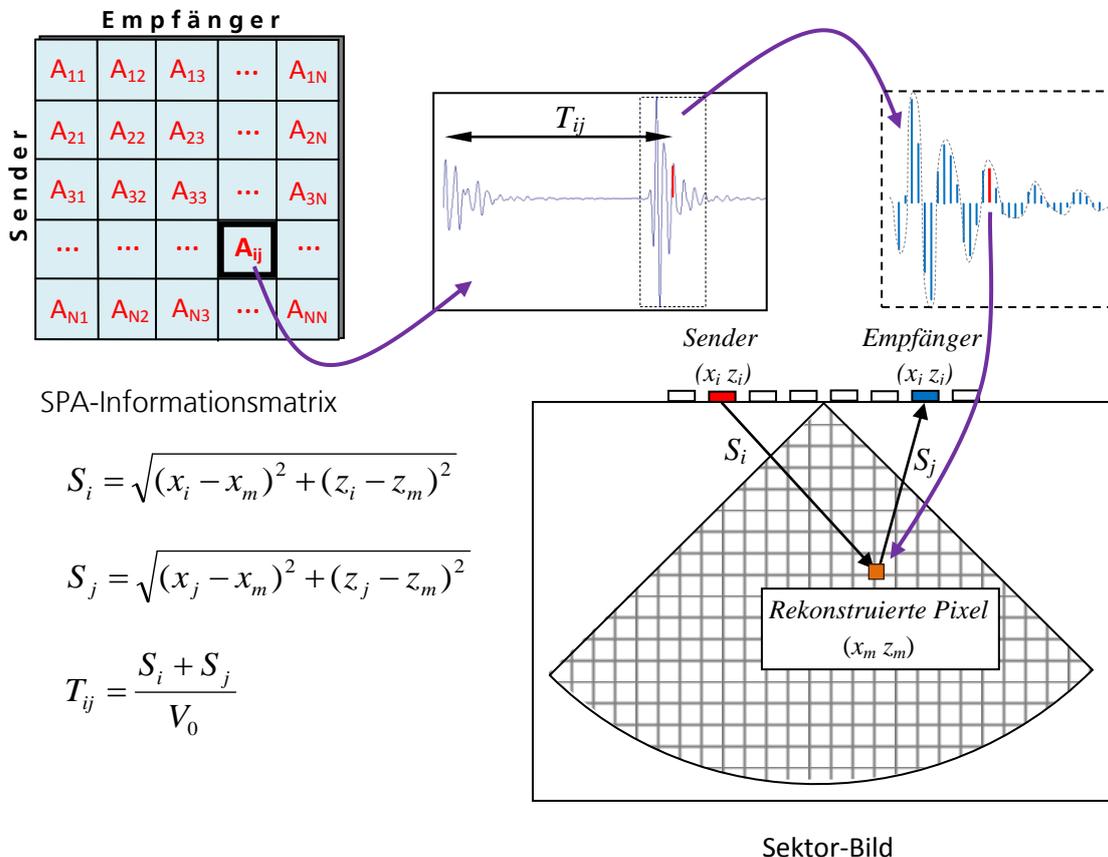
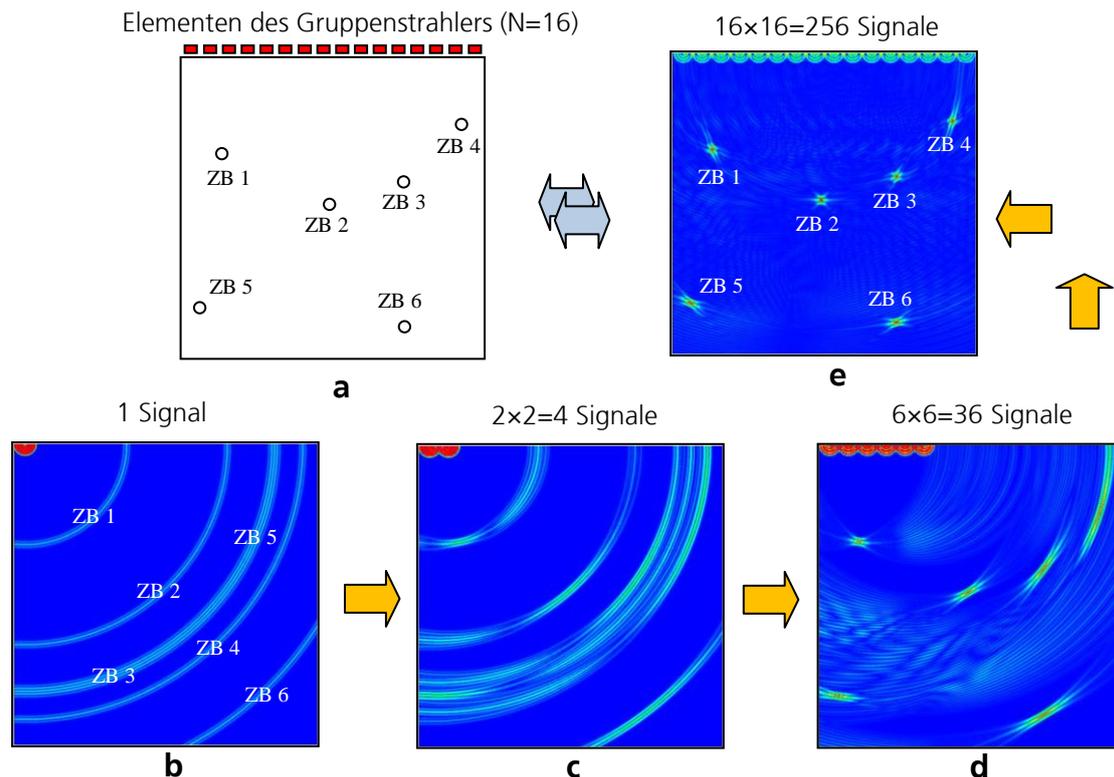


Abb. 16: Das Prinzip der Sektor-Bild-Rekonstruktion bei SPA

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 geometrische Ort des projizierten Signals  $A_{ij}$  entspricht dem Halbkreis bei  $i=j$  bzw. der Halbellipse bei  $i \neq j$  (Abb. 17b). Je mehr Messdaten (Komponenten der SPA-Informationsmatrix) ins Sektor-Bild projiziert und aufaddiert werden (Abb. 17c, Abb. 17d), desto deutlicher zeichnen sich die Reflektoren im rekonstruierten Sektor-Bild ab (Abb. 17e).



**Abb. 17: Beispiel der Sektorbild-Rekonstruktion für 16-Elemente-Gruppenstrahler. Die empfangenen Laufzeitsignale von sechs Zylinderbohrungen werden nach dem SPA-Rekonstruktionsprinzip zurückprojiziert**

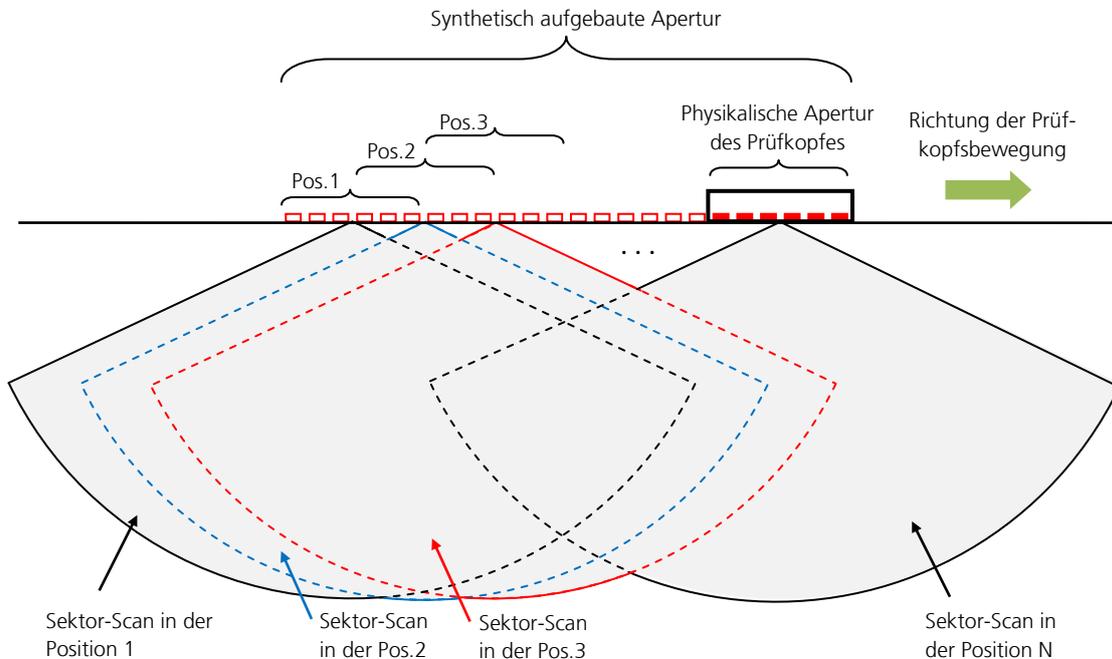
Die Ultraschall-Laufzeiten von jedem Element des Wandler-Arrays zu jedem Volumenpunkt können im Vorfeld berechnet und in der so genannten Look-Up Tabelle gespeichert werden, sodass der Bildrekonstruktionsvorgang wesentlich beschleunigt werden kann.

#### 4.1.2.3 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) beschränkt sich auf seinen Nahfeldbereich, also das Nahfeld der Gruppe. Das bedeutet, dass bei größeren Bauteildicken die Vorteile des Verfahrens nur in einer schnellen Sektor-Bild-Rekonstruktion und Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit besteht. Je nach Prüfbereichgrö-

Be 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 des Aufbaues einer eindimensionalen synthetischen Apertur (Abb. 18). Der Fokusbereich ergibt sich dann aus dem Nahfeld der erzeugten synthetischen Apertur und kann bei genügender Aperturlänge auf die gesamte Bauteildicke erweitert werden. 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.



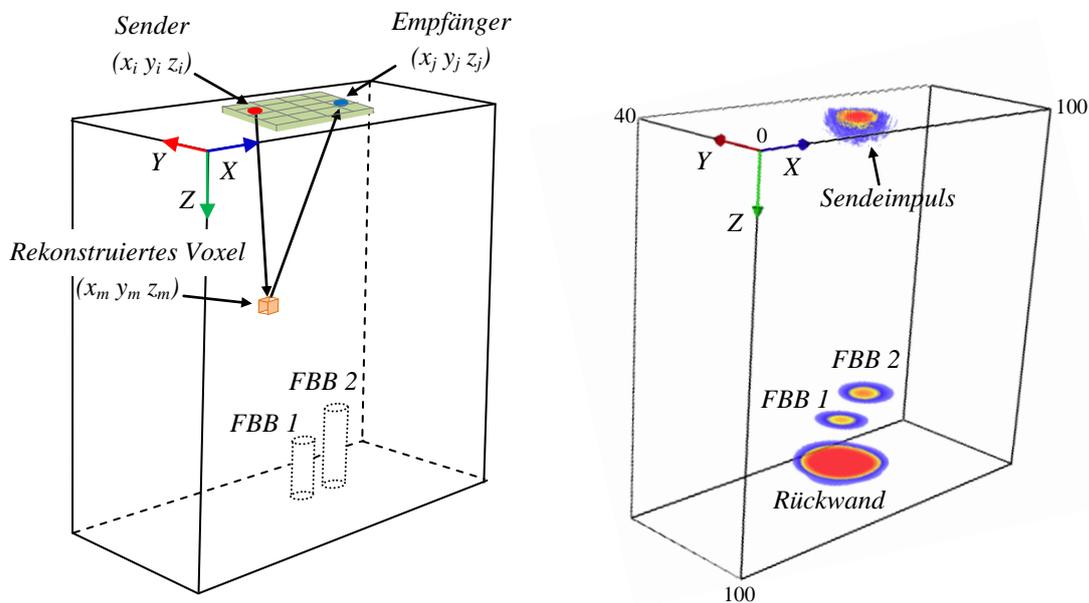
**Abb. 18: Aufbau einer synthetischen Apertur**

#### 4.1.2.4 Erstellung eines Volumenbildes

Die dreidimensionale Bildrekonstruktion nach dem SAFT-Prinzip erfolgt durch die Anregung von möglichst divergenten Schallfeldern im Bauteilvolumen und anschließender Rückprojektion und Überlagerung von aufgenommenen Ultraschall-Echosignalen. Messtechnisch kann dies entweder durch das zweidimensionale Abtasten der Prüffläche anhand eines Einzelschwinger-Prüfkopfes oder durch die Verwendung von Matrix-Phased-Array-Prüfköpfen realisiert werden.

Das Prinzip der Volumenrekonstruktion ist ähnlich der Sektorbild-Rekonstruktion (Abb. 16). In der Analogie dazu wird das zu rekonstruierende Volumen in kleine dreidimensionale Segmente (Voxels) untergeteilt. Die Ultraschall-Laufzeiten von jedem Array-Element zu jedem Volumenelement werden berechnet. Dabei müssen alle drei Raumkoordinaten  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  berücksichtigt werden (Abb. 19 links) und die Integration der Daten erfolgt als ein Flächenintegral entlang des Datenhyperboloids  $S_B$ :

$$R(x', y', z') = \iint_{S_B} \eta \left( x, y, t = \frac{\sqrt{(x_S - x')^2 + (y_S - y')^2 + (z_S - z')^2}}{V_0} + \frac{\sqrt{(x_E - x')^2 + (y_E - y')^2 + (z_E - z')^2}}{V_0} \right) dx dy \quad (16)$$



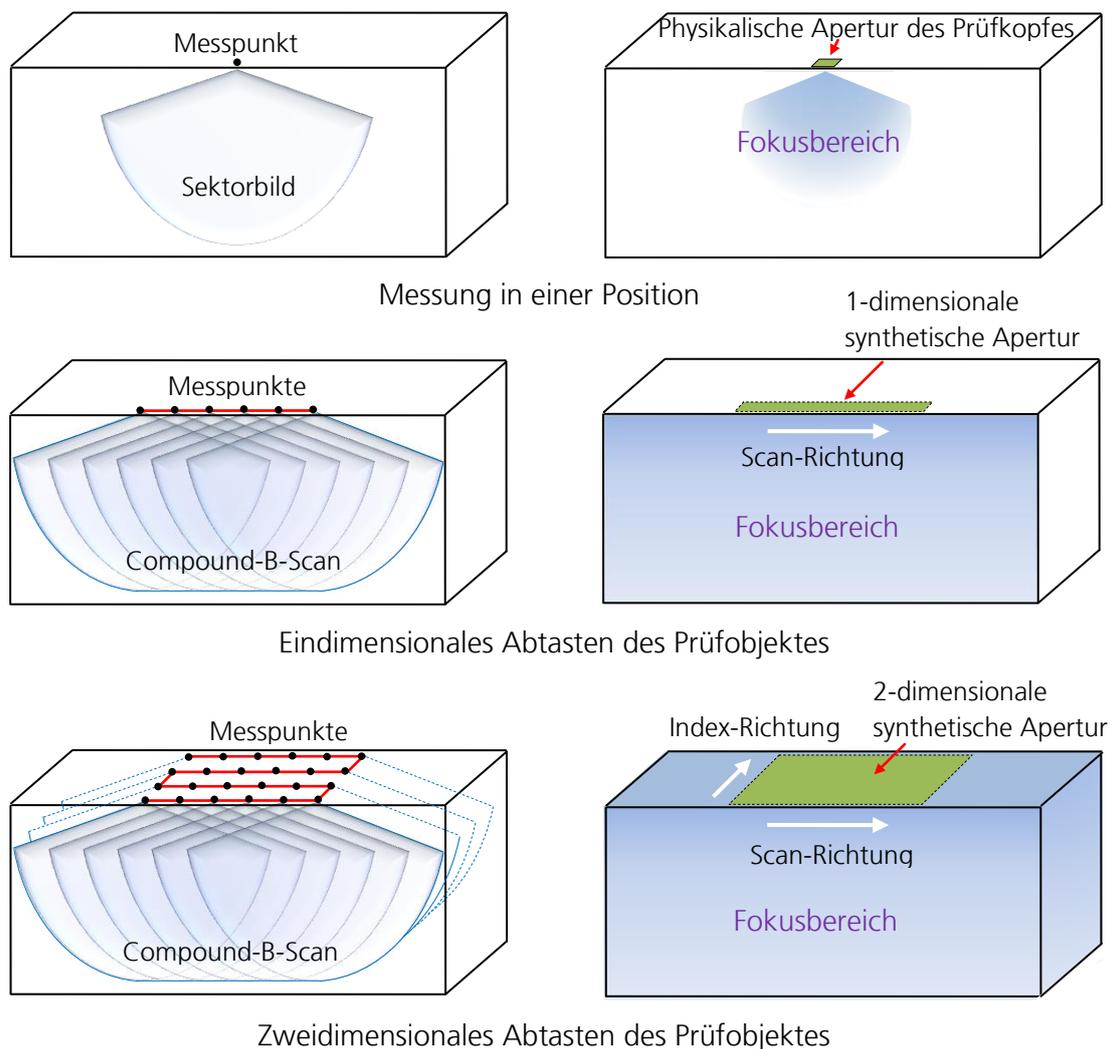
**Abb. 19: Dreidimensionale Bildrekonstruktion: Visualisierung des Prüfkörpers mit zwei Flachbodenbohrungen. Datenaufnahme mit einem Matrix-Array-Prüfkopf (5 MHz, 8x8 Elemente, Elementabstand 1 mm).**

Bei der Anwendung eines Matrix-Array mit gleicher Elementanzahl und Elementgröße in X- und Y-Richtung ergibt sich die gleichmäßige laterale Auflösung im Bauteilvolumen (Abb. 19 rechts).

Die dreidimensionale Darstellung und Auswertung der Prüfergebnisse ist auch bei der Prüfung mit Linien-Array-Prüfköpfen möglich. Dafür muss das zu untersuchende Prüfobjekt zweidimensional, z.B. mit einem mäanderförmigen Raster abgetastet werden. Bei Überlagerung der Sektorbilder entlang der Scan-Achse wird ein Compound-B-Scan (4.1.2.3) erstellt, wobei sich durch den Aufbau der eindimensionalen synthetischen Apertur der effektive Fokusbereich vergrößert (Abb. 20, Mitte). Die Schnittbilder (Compound-B-Scans) von verschiedenen Messspuren (Index-Achse) werden im dreidimensionalen Raum angeordnet. So entsteht das Volumen-Bild des Bau-

teils (Abb. 20, 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 Spurabständen ebenfalls mit dem SAFT-Algorithmus verrechnet 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. 20: 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 Materialungängen 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. 21 die Sampling-Phased-Array-Prüfergebnisse an einem plattierten ferritischen Testkörper dargestellt.

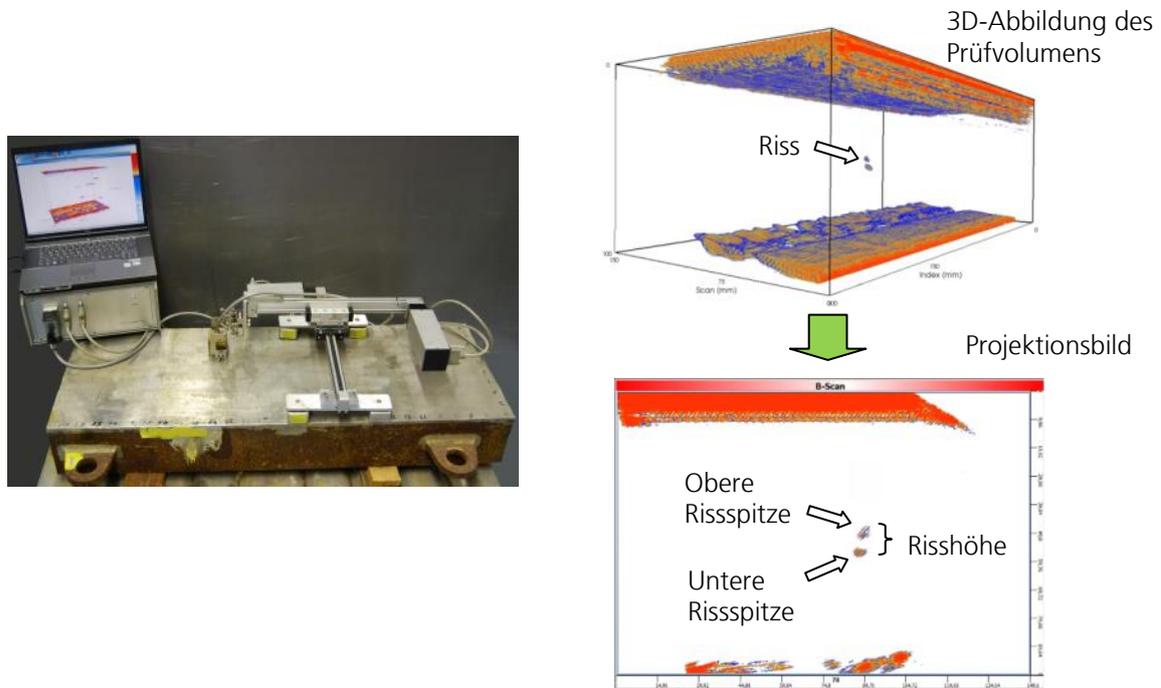


Abb. 21: Quantitative Auswertung eines Befundes durch 3D-Visualisierung des Bauteilvolumens

#### 4.2 „Sampling Phased Array“ mit verteilten Aperturen

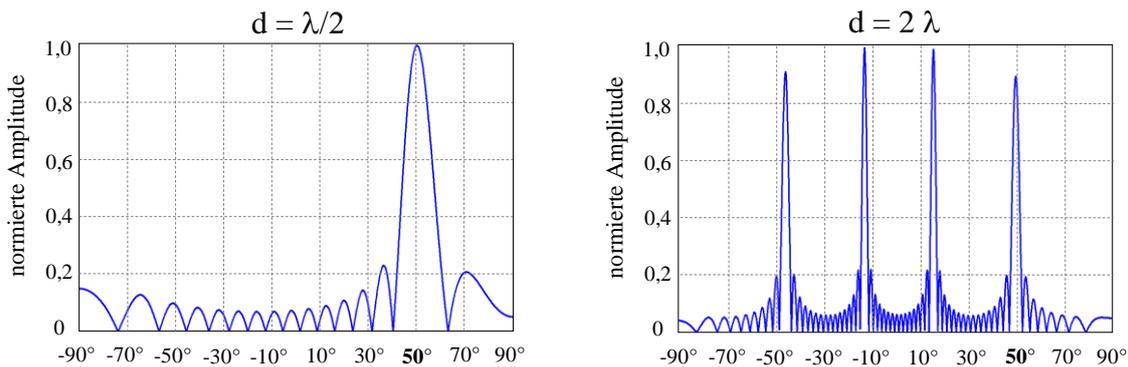
Sowohl die physikalische Fokussierung mit konventioneller Phased-Array-Technik als auch die synthetische Fokussierung mit Sampling-Phased-Array für einen Prüfkopf in einer festen Position verbessert das Auflösungsvermögen nur innerhalb des Nahfeldes des Ultraschallwandlers. Da die Nahfeldlänge eines 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  $\theta$  an, so entsteht das Schallfeld, d.h. dessen Richtcharakteristik, nach der folgenden Formeln [76]:

$$H_{\theta}(\varphi) = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi a \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\frac{\pi a \sin \varphi}{\lambda}} \right| \left| \frac{\sin\left(N \frac{\pi d (\sin \theta - \sin \varphi)}{\lambda}\right)}{N \sin\left(\frac{\pi d (\sin \theta - \sin \varphi)}{\lambda}\right)} \right| \quad (17)$$

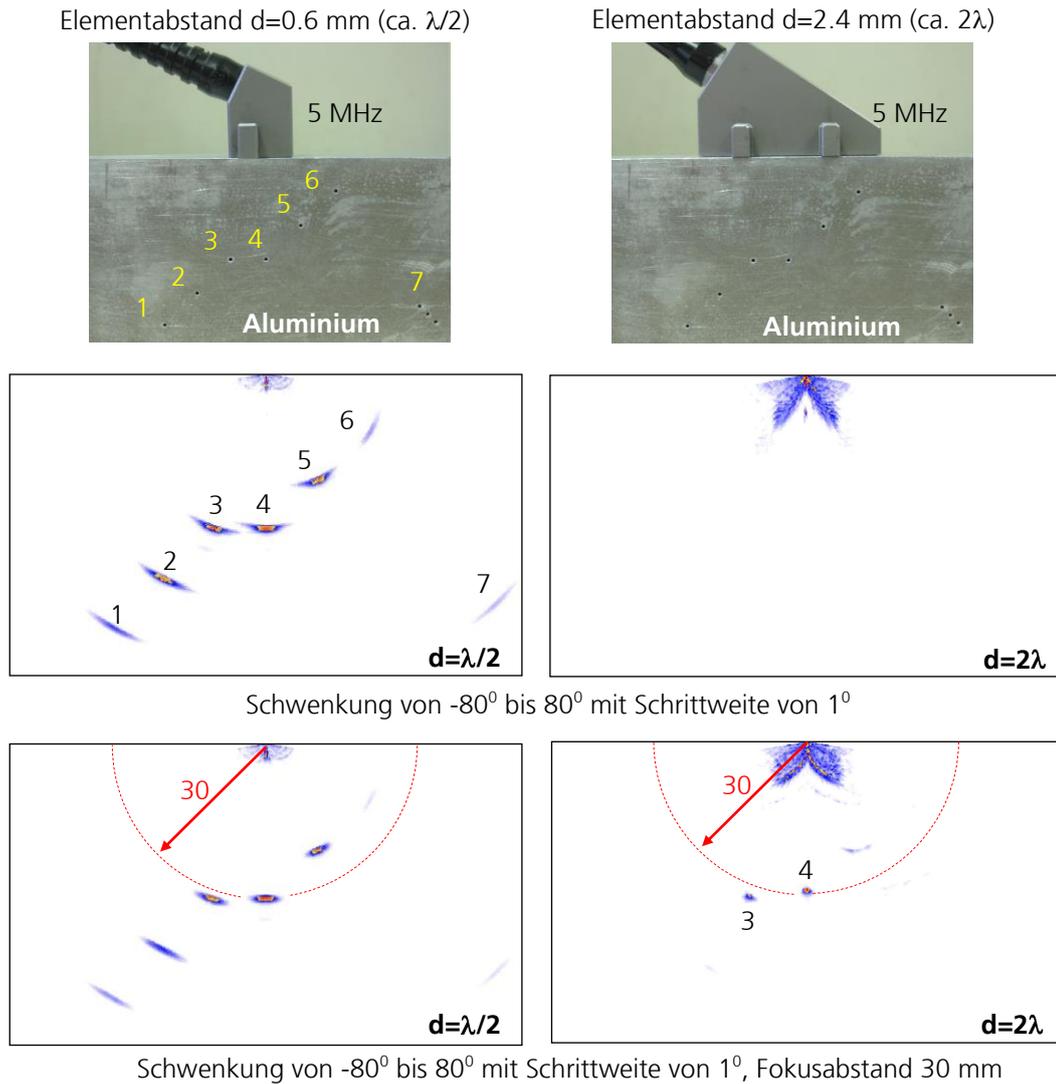
Hierbei sind:  $H_{\theta}(\varphi)$  – die normierte Amplitude entlang des Winkels  $\varphi$ ,  $N$  – die Elementanzahl,  $d$  – der Elementabstand,  $a$  – die Elementbreite und  $\lambda$  – die Wellenlänge.

Wenn der Array-Elementabstand größer als die halbe Wellenlänge ist ( $d/\lambda > 0.5$ ), entstehen in der Richtcharakteristik Hauptkeulen höherer Ordnung (Abb. 22). Dies ist eine Folge davon, dass das Nyquist-Shannon'sche Abtasttheorem (das auch als „Sampling“-Theorem [77] bekannt ist) in diesem Fall verletzt wird.



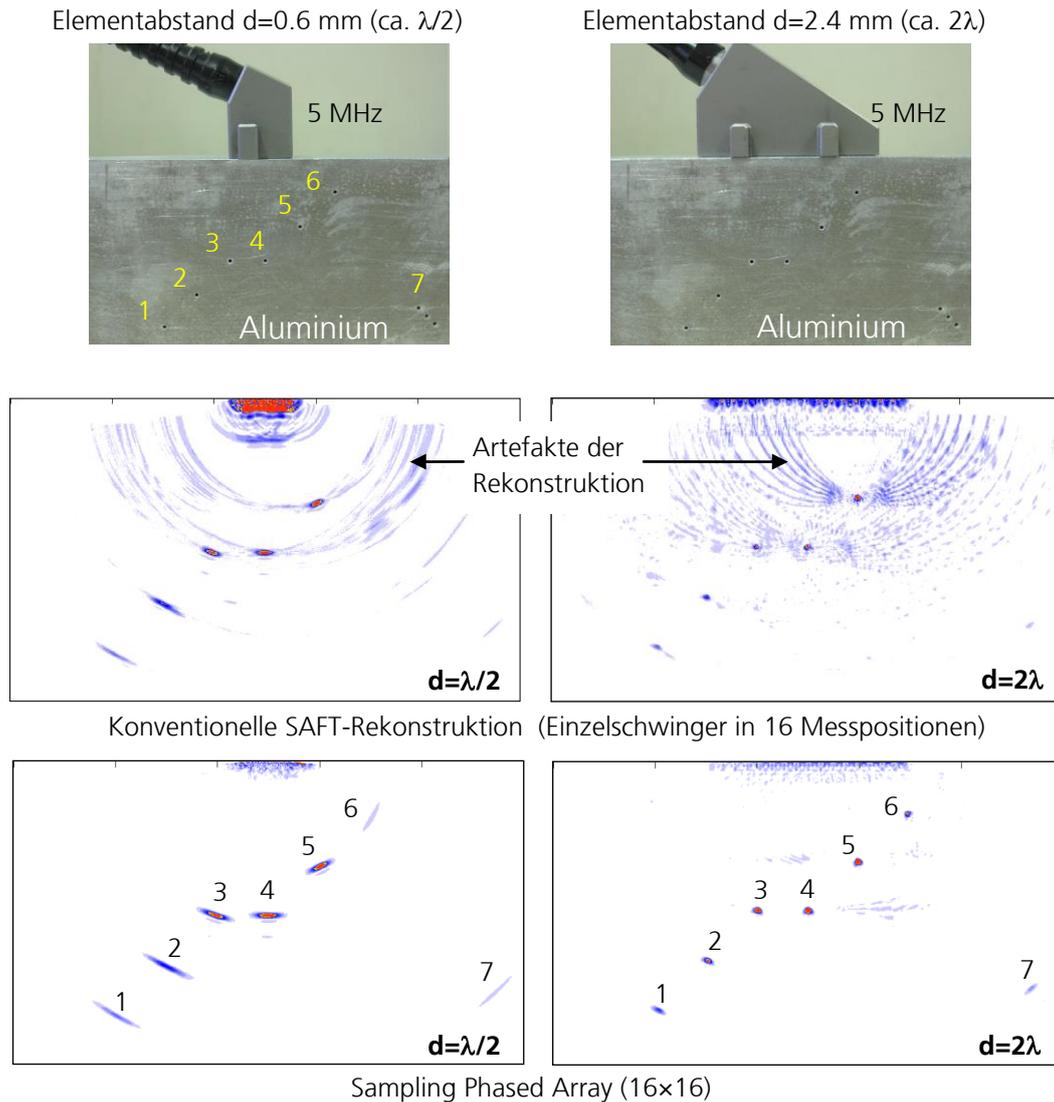
**Abb. 22: Richtcharakteristik des konventionellen Gruppenstrahlers, dessen Elemente entsprechend dem Einschallwinkel von 50° angeregt worden sind**

Die entstehenden zusätzlichen Maxima verursachen 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. 23).



**Abb. 23: Sektor-Bilder, erstellte in konventioneller Gruppenstrahler-Technik (Schwenkung und Fokussierung) bei verschiedenen Elementabständen**

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 Einzelschwingerprüfkopfes) muss der Schussabstand von ca. 10% der Wellenlänge eingehalten werden. Ist der Abstand größer, so entstehen Rekonstruktionsartefakte (Abb. 24, Mitte). Bei der Rekonstruktion nach dem SPA-Prinzip lässt sich diese Forderung umgehen: durch Aufaddieren der zusätzlichen US-Information von Sender-Empfänger-Kombinationen werden die Rekonstruktionsartefakte unterdrückt (Abb. 24, unten). Damit ist es möglich, eine Aperturvergrößerung und damit die Verbesserung des Auflösungsvermögens auch bei Prüfköpfen mit geringer Elementanzahl zu erzielen.



**Abb. 24: Sektor-Bilder, erstellt mit den auf dem SAFT-Algorithmus basierten Prüftechniken: (konventionelle SAFT und SPA) bei verschiedenen Elementabständen**

Das Anwendungsprinzip und der mögliche Einsatz der Sampling Phased Array –Technik mit verteilten Aperturen für die Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen wird im [78] beschrieben.

#### **4.3 Das Prinzip der inversen Phasenanpassung bei der 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 [79].

Die akustischen Eigenschaften eines anisotropen Mediums lassen sich u.a. durch die Größe der Ablenkung der Energieausbreitungsrichtung von dem Phasenausbreitungsvektor charakterisieren. Die Phase einer Ultraschallwelle breitet sich mit der Phasengeschwindigkeit  $\mathbf{v}$  unter dem Phasenwinkel  $\theta$  aus. Ihre akustische Energie – mit Gruppengeschwindigkeit  $\mathbf{V}$  unter dem Gruppenwinkel  $\phi$  (1.2.2). Sowohl die Längen der beiden Geschwindigkeitsvektoren als auch der Ablenkungswinkel zwischen beiden hängen für alle Wellenarten von der Steifigkeitsmatrix des Werkstoffs ab.

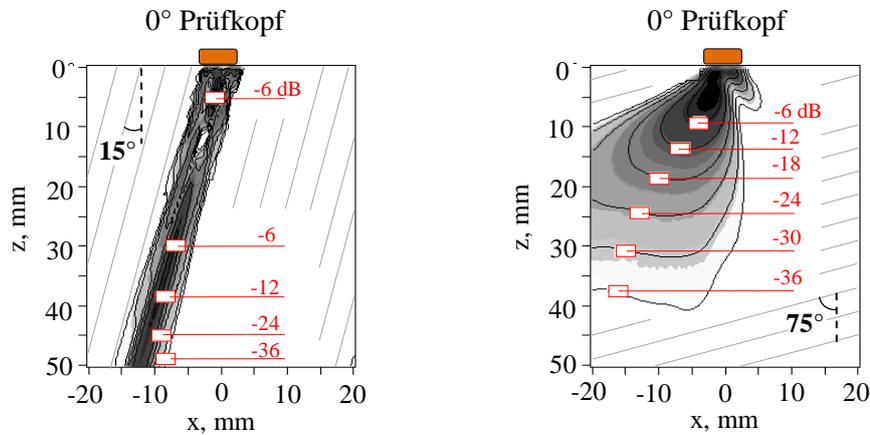
Werden die gemessenen Ultraschallsignale unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit nach dem SAFT-Algorithmus zurück ins Volumen projiziert, entsteht das Sampling Phased Array Sektor-Bild mit synthetischer Fokussierung in jedem beliebig rechnerisch adressierbaren Volumenpunkt. Man spricht über die inverse 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 Werkstoffs 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-orientierten Interpretation der SAFT-Rekonstruktion (Abschnitt 4.1.2.1, Abb. 15b), 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.

#### **4.3.1 Inverse Phasenanpassung in einem homogenen akustisch anisotropen Medium**

Unter einem akustisch homogenen anisotropen Werkstoff versteht man ein Medium, dessen akustische Eigenschaften nur von der Richtung abhängen und sich räumlich gar nicht oder nur unbedeutend ändern. Als Beispiel hierfür dienen einige Faserverbund-Werkstoffe. 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 einige hundert Prozent erreichen. In Abb. 25 wird die Wirkung der Faser-

richtung ( $15^\circ$  zur Kontaktfläche in Abbildung links und  $75^\circ$  in Abbildung rechts) auf das von einem senkrechten Prüfkopf (Einschallwinkel  $0^\circ$ ) erzeugte Schallfeld dargestellt. Die Schallfelder wurden anhand der Methode der Punktquellensynthese [48] berechnet.



**Abb. 25: Einfluss der Faserrichtung eines homogenen anisotropen Kohlefaserwerkstoffes auf das Schallfeld eines senkrechten Prüfkopfes**

Aus der Abbildung 25 folgt, dass:

1. die Ausbreitungsrichtung der erzeugten Schallwelle nicht mehr normal zur Kontaktfläche ist und
2. die Faserrichtung des CFK-Werkstoffes sowohl die Richtung als auch die Form und Intensität des erzeugten Schallfeldes stark beeinflusst. Die akustische Energie, die unter einem Einschallwinkel ausgesendet wurde (hierbei  $0^\circ$ ), neigt sich wegen der starken Werkstoffanisotropie zur Faserrichtung.

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 (4.1.2.2). Die inverse Phasen Anpassung für ein homogenes anisotropes Medium besteht damit in der Berücksichtigung der Gruppengeschwindigkeit in der Ausbreitungsrichtung zwischen dem jeweiligen rekonstruierten Pixel und dem sendenden bzw. empfangenden Array-Element. Die SPA-Technik mit inverser Phasen Anpassung gestattet damit eine ortsgetreue Darstellung der Materialumgängen (Abb. 26).

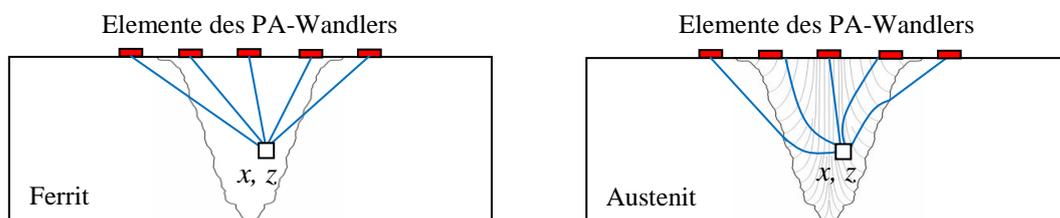


**Abb. 26: Vergleich der Ergebnisse der Ultraschallprüfung an einem homogenen akustisch anisotropen CFK-Testkörper**

#### 4.3.2 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 – wie schon in (2.1.1) diskutiert – im Schweißgut sogenannte Stengelkristalle. 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 Stengelkristalle 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. 27). Dabei muss berücksichtigt werden, dass sich die Schallgeschwindigkeit entlang des Pfades ändert und ihre lokalen Werte für Berechnung der Laufzeit benutzt werden müssen.



**Abb. 27: 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 Ausbreitung der Ultraschallwellen vorgenommen werden kann. Heutzutage verwendet man verschiedene Methoden für die Simulation der Ausbreitung der elastischen Wellen,

wie z.B., die Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT) [41, 53, 54, 55], die generalisierte Punktquellensynthese (GPSS) [52] u.a. Eine der einfachsten und zugleich schnellsten Modellierungsmethoden ist das „Ray Tracing“ – die Schallstrahlverfolgung unter Berücksichtigung des Brechungsgesetzes, die in ihrer einfachsten Ausführung keine Amplitudenwerte berücksichtigt [42].



## 5. Modellierung der Schallausbreitung in einer austenitischen 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 die Laufzeiten von Ultraschallwandlern zu jedem Volumenpunkt zu berechnen.

In Rahmen dieser Dissertation wurde ein „Ray Tracing“-Algorithmus entwickelt und implementiert, der die Ermittlung von Laufzeiten zwischen zwei beliebigen Punkten in einem inhomogenen und/oder anisotropen Medium erlaubt. Bezüglich der Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißverbindungen wird diese Software für die Berechnung der Laufzeiten von den individuellen Elementen des Ultraschallwandlers bis zu jedem Volumenpunkt eingesetzt. Die ermittelten Laufzeiten werden dann für die nachfolgende SAFT-Rekonstruktion verwendet. Der Algorithmus basiert auf folgenden Annahmen:

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

Der implementierte 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.

Das Prinzip der Schallausbreitungsberechnung, das im Rahmen dieser Dissertation für einen linearen Phased-Array-Wandler implementiert wurde, basiert unter anderem auf dem Ansatz der „Slowness“-Flächen. Dank der Einfachheit der Berechnung der Schallbrechung ist es möglich, den Algorithmus durch Übergang zu „Slowness“-Oberflächen zur Berechnung der Schallausbreitung im 3D-Raum (beispielsweise, für einen Matrix-Array-Wandler) zu erweitern.

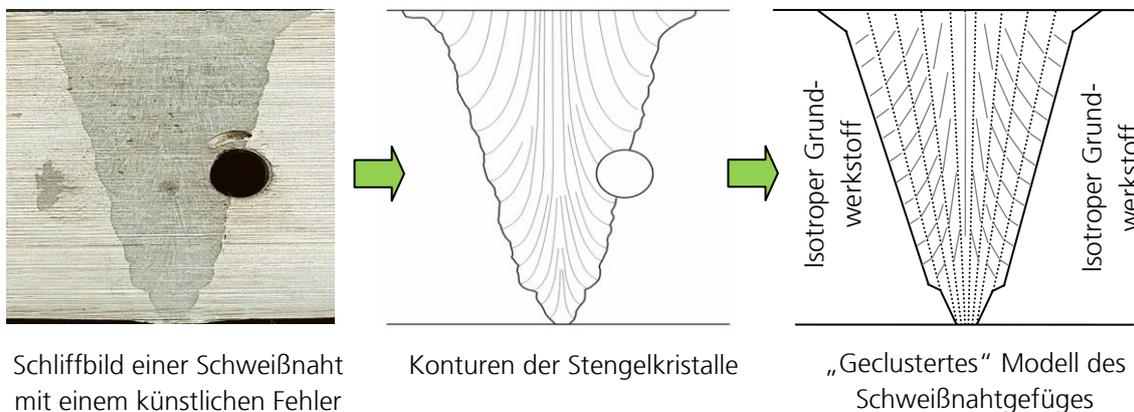
## 5.1 Erstellung des Schweißnahtmodells

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 Stengelkristalle.

Während die Schweißnahtgeometrie und Schallgeschwindigkeit im isotropen Grundmaterial oft bekannt sind bzw. auch am Prüfobjekt 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 Schliffbild der Schweißnaht, z.B. an einer vergleichbar geschweißten Verfahrensprobe, erstellen, welches eine gute Grundlage zur Modellbildung der Schweißnaht ist. Diese Vorgehensweise wurde erstmals von *Ogilvy* [80] im Jahr 1985 angewendet und ihr folgen auch andere Autoren [51, 56, 57, 58, 81, 82].

Abb. 28 zeigt ein Beispiel, wie aus einem Schliffbild der Schweißnaht zunächst der Verlauf von Stengelkristallen ermittelt werden kann und dann die Bereiche mit annäherungsweise gleicher Kristallorientierung eingegrenzt werden können.



**Abb. 28: Erstellung des Schweißnahtmodells anhand eines Schliffbildes**

Die anderen wichtigen Parameter des Schweißnahtmodells sind die akustischen Eigenschaften der Stengelkristalle sowie ihre Dichte. Akustische Eigenschaften werden in der Form der Steifigkeitsmatrix  $C$  vorgegeben, die – wie schon diskutiert – fünf voneinander unabhängige elastische Konstanten besitzt.

Ähnlicherweise wird das Modell einer Mischverbindung erstellt. Die elastischen Eigenschaften der miteinander verbundenen Komponenten werden entweder als konstante Schallgeschwin-

digkeit  $V_0$  (für isotrope Werkstoffe) oder als eine Steifigkeitsmatrix  $C$  (für transversal-isotrope Werkstoffe) vorgegeben (Abb. 29).

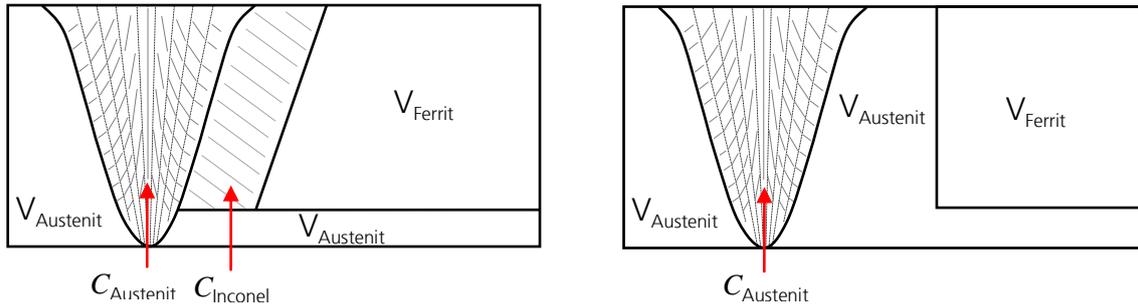


Abb. 29: Erstellte Modelle von Mischverbindungen

## 5.2 Akustische Eigenschaften eines transversal-isotropen Mediums

Akustisch anisotrope Stengelkristalle einer austenitischen Schweißnaht können als ein transversal-isotropes Medium betrachtet werden [80, 56, 57, 58]. Die Symmetrieachse entspricht der Wachstumsrichtung der Kristalle während des Erstarrungsprozesses. Obwohl jeder einzelne Stengelkristallit 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 im Verhältnis zur Wellenlänge kleinen Durchmessers als isotrop betrachtet werden [83], also bilden die Kristalle eine Isotropie-Ebene (Abb. 30).

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.

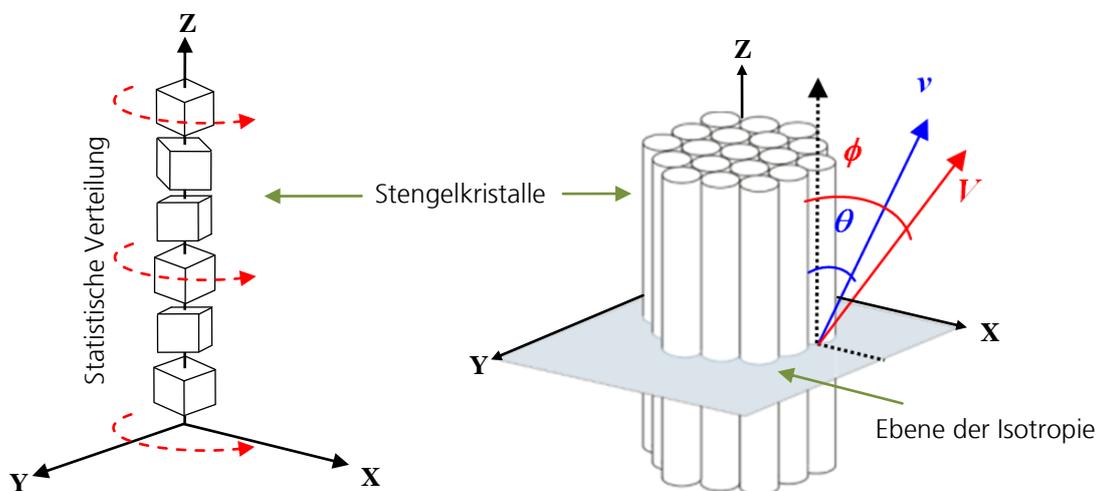


Abb. 30: Transversal-isotrope Stengelkristalle einer austenitischen Schweißnaht

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

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{11} - 2C_{66} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & \text{Symmetrie} & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \quad (18)$$

Sind die Komponenten des Elastizitätstensors bekannt, besteht die Möglichkeit, die Phasengeschwindigkeit  $v$  und die Gruppengeschwindigkeit  $V$  für einen vorgegebenen Phasenwinkel  $\theta$  und entsprechenden Gruppenwinkel  $\phi$  zu berechnen.

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

#### 5.3.1 Exakte Formel

Die Christoffel-Gleichung (9) für den Fall eines transversal-isotropen Mediums mit vertikaler Symmetrieachse wurde von *Daley* und *Hron* [84] gelöst, die 1977 die sogenannte exakte Formel aufgestellt haben. Die Phasengeschwindigkeit unter einem Phasenwinkel  $\theta$  berechnet man dementsprechend als:

$$\rho v_P^2 = \frac{1}{2} [C_{33} + C_{44} + (C_{11} - C_{33}) \sin^2 \theta + D(\theta)] \quad (19)$$

$$\rho v_{SV}^2 = \frac{1}{2} [C_{33} + C_{44} + (C_{11} - C_{33}) \sin^2 \theta - D(\theta)] \quad (20)$$

$$\rho v_{SH}^2 = C_{66} \sin^2 \theta + C_{44} \cos^2 \theta \quad (21)$$

wobei  $\rho$  die Dichte des Werkstoffes und

$$D(\theta) = \left\{ \begin{aligned} & (C_{33} - C_{44})^2 + \\ & 2[2(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})(C_{11} + C_{33} - 2C_{44})] \sin^2 \theta + \\ & [(C_{11} + C_{33} - 2C_{44})^2 - 4(C_{13} + C_{44})^2] \sin^4 \theta \end{aligned} \right\}^{1/2} \quad (22)$$

ist.

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

$$V^2(\phi(\theta)) = v^2(\theta) + \left( \frac{dv}{d\theta} \right)^2 \quad (23)$$

$$\tan \phi = \frac{\tan \theta + \frac{1}{v} \frac{dv}{d\theta}}{1 - \frac{\tan \theta}{v} \frac{dv}{d\theta}} \quad (24)$$

In einem transversal-isotropen Medium sind die Winkel  $\theta$  und  $\phi$  bezogen auf die Symmetrieachse abzutragen. Bei  $\theta = 0^\circ$  und  $90^\circ$  (entlang und senkrecht zur Symmetrieachse) koinzidieren die Phasengeschwindigkeit und die Gruppengeschwindigkeit – der Ablenkwinkel  $\Delta$  ist damit gleich null.

### 5.3.2 Thomsen-Formulierung der exakten Formel

Im Jahre 1986 schlug *Thomsen* [85] eine alternative Berechnung der Phasengeschwindigkeiten vor. Sie basiert auf den sogenannten Thomsen-Parametern  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  und  $\varepsilon$ .

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}}, \quad \beta_0 = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}}, \quad \gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}} \quad (25)$$

$$\delta = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})}, \quad \varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}}$$

Entsprechend [85], berechnet man die Phasengeschwindigkeit zu

$$v_p^2(\theta) = \alpha_0^2 (1 + \varepsilon \cos^2 \theta + D^*(\theta)) \quad (26)$$

$$v_{sv}^2(\theta) = \beta_0^2 (1 + A^{-1} (\varepsilon \cos^2 \theta - D^*(\theta))) \quad (27)$$

$$v_{sh}^2(\theta) = \beta_0^2 (1 + 2\gamma \cos^2 \theta) \quad , \quad (28)$$

wobei

$$A = \frac{\beta_0^2}{\alpha_0^2} \quad (29)$$

und

$$D^*(\theta) = \frac{1}{2}(1-A) \left[ \left( 1 + \frac{4(2\delta - \varepsilon)(1-A)}{(1-A)^2} \sin^2(\theta) \cos^2(\theta) + \frac{4\varepsilon(1-A + \varepsilon)}{(1-A)^2} \cos^4(\theta) \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (30)$$

sind.

### 5.3.3 Thomsen-Approximation für die schwache Anisotropie

*Thomsen* hat seine Formeln (26-27) für den Fall eines schwach anisotropen Mediums (das heißt, die Parameter  $\gamma, \delta, \varepsilon < 0.2$  [13]) approximiert. Die Approximation der Phasengeschwindigkeitsberechnung setzt die Linearisierung des Parameters  $D^*$  (30) voraus; dadurch werden die Formeln (26-27) vereinfacht. Entsprechend der Approximation, berechnet man die Phasengeschwindigkeit der elastischen Wellen als

$$v_p(\theta) = \alpha_0 (1 + \delta \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \varepsilon \cos^4 \theta) \quad (31)$$

$$v_{sv}(\theta) = \beta_0 \left( 1 + \frac{\alpha_0^2}{\beta_0^2} (\varepsilon - \delta) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right) \quad (32)$$

$$v_{sh}(\theta) = \beta_0 (1 + \gamma \cos^2 \theta) \quad (33)$$

## 5.4 Schallbrechung in einer akustisch anisotropen Schweißnaht

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

$$\frac{\sin(\theta_1^I)}{V_1} = \frac{\sin(\theta_2^T)}{V_2} = \frac{\sin(\theta_1^R)}{V_1} = x_0 \quad (34)$$

wobei  $x_0$  – der sogenannte „Ray-Parameter“ ist. Die Indizes **1** und **2** gelten für Medium 1 bzw. Medium 2; die Bezeichnungen *I*, *T* und *R* bedeuten einfallende (**I**ncident), durchgehende (**T**ransmitted) bzw. reflektierte (**R**elected) Wellen. Die Winkel sind vom Normalenvektor auf der Trennfläche der Medien aus abzutragen.

In einem anisotropen Medium ist die Schallgeschwindigkeit nicht konstant, sondern ist eine Funktion der Richtung. *Fedorov* [37] zeigte, dass das Snellius'sche Gesetz in seiner allgemeinen Form auch für ein anisotropes Medium gilt:

$$\frac{\sin(\theta_1^I)}{v_1(\theta_1^I)} = \frac{\sin(\theta_2^T)}{v_2(\theta_2^T)} = \frac{\sin(\theta_1^R)}{v_1(\theta_1^R)} = x_0 \quad (35)$$

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

Die Aufgabe der Richtungsbestimmung der gebrochenen/reflektierten Welle besteht in der Ermittlung des Phasenwinkels  $\theta$  und der Phasengeschwindigkeit  $v(\theta)$ , die dem vorgegebenen Ray-Parameter  $x$  entsprechen. Die Ermittlung des Reflektions- bzw. Brechungswinkels repräsentiert die Lösung des so genannten inversen Problems.

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:

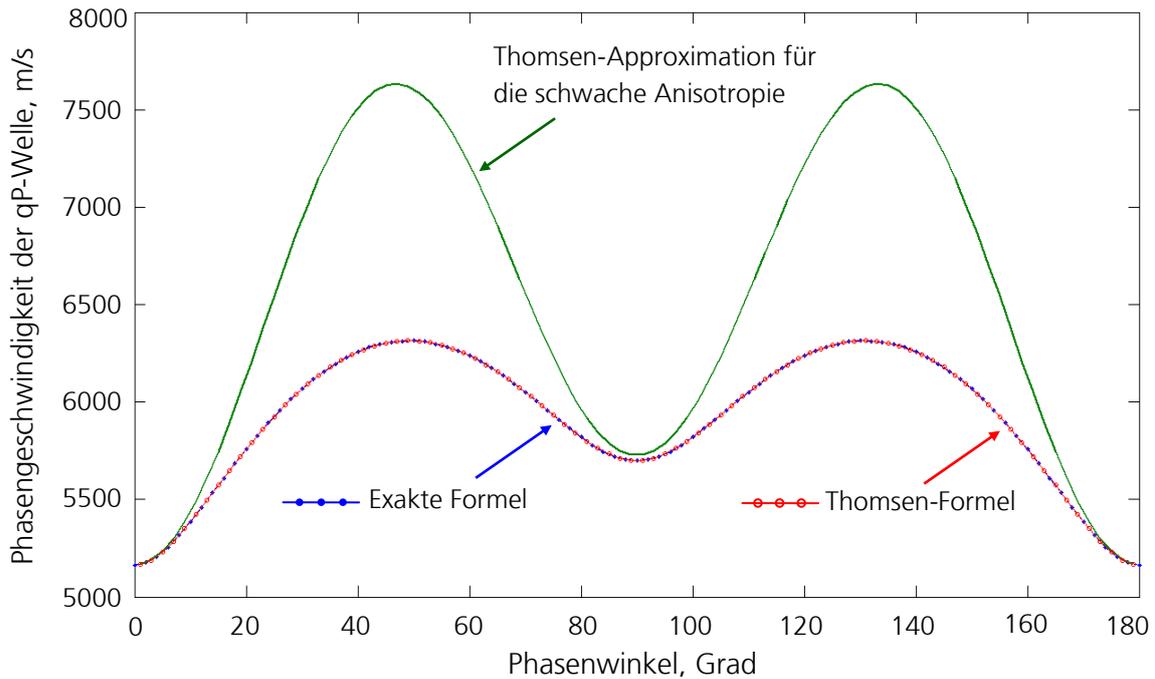
$$\theta_1^R = \arcsin(x_0 \cdot V_1) \quad \theta_2^T = \arcsin(x_0 \cdot V_2) \quad (36)$$

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 sondern nur numerisch bestimmt werden kann.

Eine der analytischen Lösungen kann man in [38] finden. Sie basiert auf der Thomsen-Approximation für den Fall der schwachen Anisotropie. Die Berechnung des Brechungswinkels läuft auf die Lösung einer quartischen Gleichung (37) hinaus.

$$\alpha_0 x_0 (\varepsilon - \delta) \sin^4 \theta + \alpha_0 x_0 \delta \sin^2 \theta - \sin \theta + \alpha_0 x_0 = 0 \quad (37)$$

*Slawinski* [38] verwendet z.B. die Thomsen-Approximation für die Beschreibung der Wellenausbreitung in der Erdkruste. Die austenitischen Stengelkristalle können jedoch nicht zu den schwach anisotropen Werkstoffen gezählt werden: z.B., ergibt sich für den austenitischen Werkstoff X8CrNi1910 [ $C_{11}$ =263 GPa,  $C_{13}$ =145 GPa,  $C_{33}$ =216 GPa,  $C_{44}$ =129 GPa,  $C_{66}$ =82 GPa, Dichte 8100 kg/m<sup>3</sup>] der  $\delta$ -Parameter zum Wert 1.8. Während die exakte Formel (19) und die Thomsen-Formel (26) die absolut gleichen Ergebnisse zeigen (Abb. 31), weist die Thomsen-Approximation eine deutliche Abweichung der Phasengeschwindigkeit der qP-Welle auf.



**Abb. 31: Richtungsabhängigkeit der Phasengeschwindigkeit einer qP-Welle im austenitischen Werkstoff X8CrNi1910**

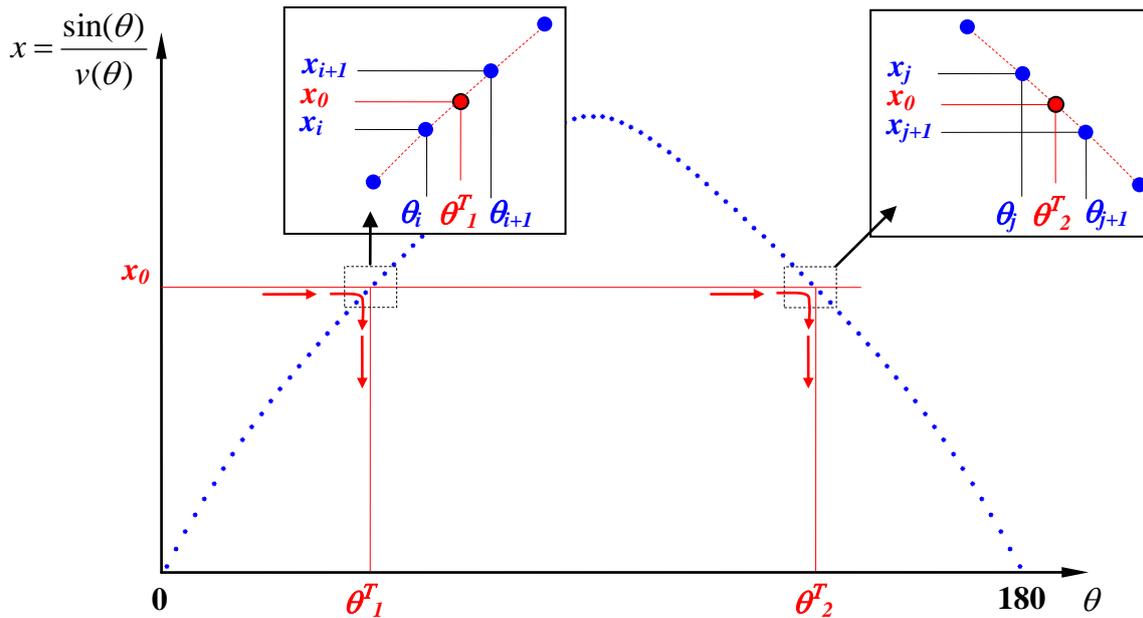
Anstatt analytischer Verfahren können zur Berechnung der Phasengeschwindigkeit in anisotropen Medien numerische Verfahren verwendet werden. Jede Funktion  $F = f(a)$  mit dem Funktionsargument  $a$  kann auch in einer Array-Form vorgegeben sein. Der Funktionswert  $F$  sowie der Funktionsargument werden 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.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden ein analytischer Ansatz zur Berechnung des Ray-Parameters und ein numerischer Ansatz zur Ermittlung des Brechungswinkels verwendet. Für den Phasenwinkelbereich von  $\theta_1 = 0^0$  bis  $\theta_n = 180^0$  mit vorgegebener Schrittweite  $\Delta\theta$  berechnet sich der entsprechende Ray-Parameter zu:

$$[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_i \ x_{i+1} \ \dots \ x_n] = f([\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_i \ \theta_i + \Delta\theta \ \dots \ \theta_n]) \quad (38)$$

wobei die Funktion  $f = \sin(\theta) / v(\theta)$  ist und die Phasengeschwindigkeit  $v(\theta)$  analytisch nach der exakten Formel (19-22) berechnet wird.

Die Ermittlung des Brechungswinkels erfolgt numerisch. Der Phasenwinkel  $\theta_1^T$  der gebrochenen Welle, der dem Ray-Parameter  $x_0$  entspricht, wird durch die kubische Spline-Interpolation bestimmt. Infolge der Symmetrie eines Stengelkristalls und der Sinus-Funktion existieren zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  zwei Phasenwinkel  $\theta_1^T$  und  $\theta_2^T$ , die dem Parameter  $x_0$  entsprechen (Abb. 32). Wie in 5.4.4 gezeigt wird, ist es wichtig (insbesondere für die qSV-Welle), beide Phasenwinkel in Betracht zu ziehen.



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

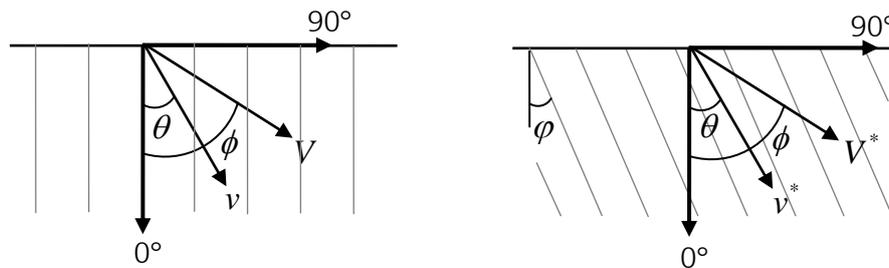
Die Bestimmung des Brechungs- bzw. Refraktionswinkels nach der exakten Formel ist analytisch nicht möglich, da die Abhängigkeit des Ray-Parameters vom Phasenwinkel zu komplex ist. Numerisch kann der Winkel relativ schnell und genau ermittelt werden. Die Genauigkeit der Winkelbestimmung hängt von der Abtastrate der Ausgangsfunktion  $x(\theta)$  ab (Tabelle 1).

Da die akustischen Eigenschaften der Stengelkristalle 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 Stengelkristalle besitzt, müssen die Arrays entsprechend der jeweiligen Symmetrieachse der Kristalle angepasst („gedreht“) werden (Abb. 33).

**Tabelle 1. Genauigkeit und Effizienz der Bestimmung des Brechungswinkels anhand der kubischen Spline-Approximation**

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

\* Berechnung erfolgte in MATLAB® R2010a

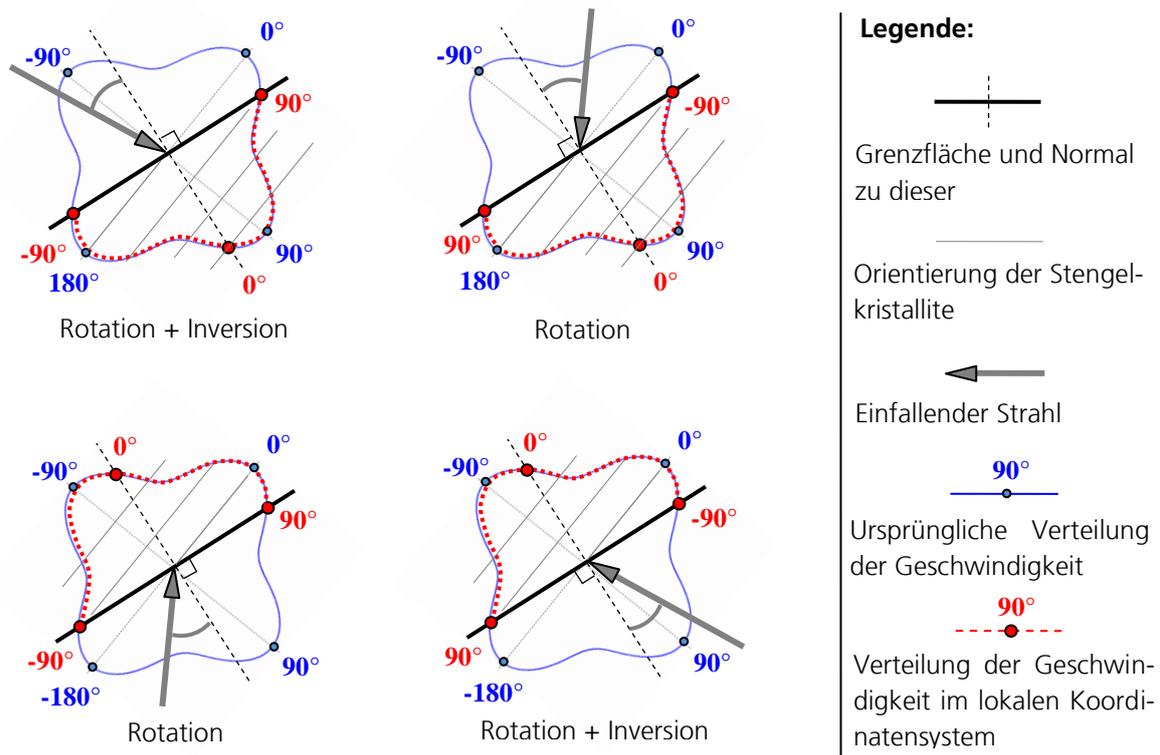


**Abb. 33: Die Phasengeschwindigkeit  $v^*$  und die Gruppengeschwindigkeit  $V^*$  können unmittelbar aus der Ausgangsvektoren  $v$  und  $V$  ermittelt werden**

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

$$v^*(\theta) = v(\theta - \phi) \quad V^*(\phi) = V(\phi - \phi) \quad (39)$$

Die Ausgangsvektoren  $v(\theta)$  und  $V(\phi)$  werden einmal nach den Formeln (19-22) für den Winkelbereich von  $-360^\circ$  bis  $360^\circ$  berechnet und für sämtliche 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. 34 erläutert das Prinzip der Rotation der ursprünglichen Vektoren beim Übergang zum lokalen Koordinatensystem, das auf die Grenzfläche bezogen ist.



**Abb. 34: Anpassung der Geschwindigkeitsverteilung (hier: die Phasengeschwindigkeit der qSV-Welle) zum lokalen, auf die Grenzfläche bezogenen Koordinatensystem**

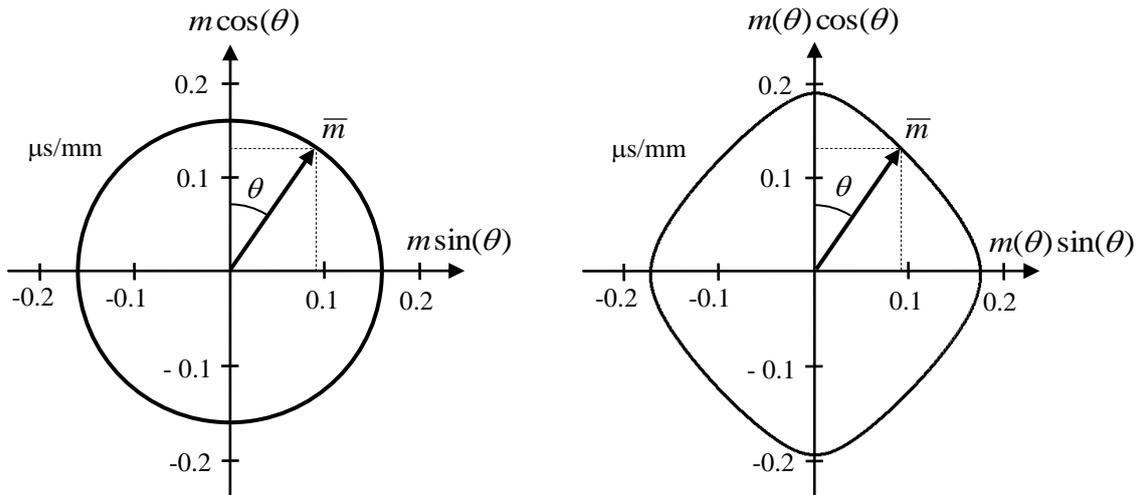
Der Ray-Parameter Vektor (34) muss für jede Grenzfläche neu berechnet werden: (35) gilt in diesem Fall nicht:

$$x^*(\theta) = \frac{\sin(\theta)}{v(\theta - \varphi)} \neq x(\theta - \varphi) \quad (40)$$

## 5.4.1 Grafische Darstellung des Brechungsgesetzes

### 5.4.1.1 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  $\theta$  von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  eine geschlossene Kurve – die Slowness-Fläche. Die Slowness-Fläche eines isotropen Werkstoffes ist ein Kreis mit dem Radius  $V_0^{-1}$  (wobei  $V_0$  eine konstante Schallgeschwindigkeit ist) (Abb. 35 links). Die Slowness-Fläche eines anisotropen Werkstoffes hat eine komplexere Form, da die Länge  $v^{-1}(\theta)$  des Radius-Vektors winkelabhängig ist (Abb. 35 rechts).



**Abb. 35: Die Slowness-Flächen der (quasi-)longitudinalen Welle im isotropen ferritischen Stahl (links) und im anisotropen austenitischen Werkstoff X8CrNi1910 (rechts)**

Der Quotient  $\frac{\sin \theta}{v(\theta)} = m(\theta) \sin \theta$  im Brechungsgesetz (30) hat mathematisch die Bedeutung der Projektion eines Slowness-Vektors auf die Trennfläche zwischen den Medien. Bezeichnen wir die Slowness-Projektionen der Slowness-Vektoren von einfallender, gebrochener bzw. reflektierter Welle durch  $x$  mit entsprechenden Indices  $I$ ,  $T$  und  $R$ , dann kann damit das Snellius'sche Brechungsgesetz (30) folgenderweise formuliert und geschrieben werden:

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

oder

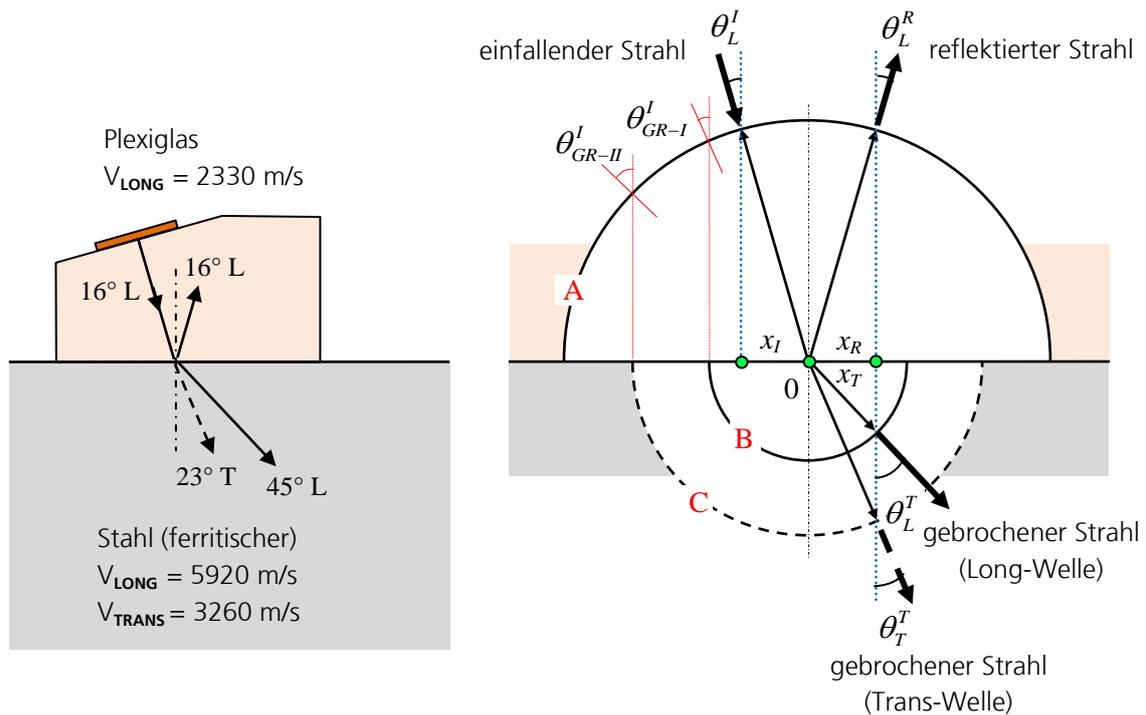
$$x_I = x_T = x_R = x_0 \quad (41)$$

Diese Definition ermöglicht eine anschauliche grafische Darstellung des Brechungsgesetzes. Als Beispiel dafür nehmen wir einen 45°-Winkelprüfkopf zur Anregung von Longitudinalwellen. Das Piezoelement des Prüfkopfes wird auf 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 dann unter dem Winkel 45° (Abb. 36 links). Infolge der Wellenumwandlung an der Trennfläche entsteht auch eine Transversalwelle, die sich unter dem Winkel von ca. 23° ausbreitet. Ein Teil der akustischen Energie wird an der Grenzfläche in „Plexiglas/Stahl“ in den Vorlaufkeil zurückreflektiert (Refraktionswinkel 16°).

In Abb. 36, 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. 36 nicht dargestellt.



**Abb. 36: Illustration des Brechungsgesetzes für die Grenzfläche „Plexiglas-Stahl“**

Die Projektion des Slowness-Vektors der Kurve A unter dem Einfallswinkel  $\theta_L^I$  auf die Trennfläche ist  $x_I$ . Nach der Formel (41) müssen die horizontalen Projektionen  $x_R$  und  $x_T$  der reflektierten bzw. gebrochenen Wellen der  $x_I$ -Projektion gleichwertig sein. Zeichnen wir dazu das Lot zur Grenzfläche im Punkt  $x_R = x_T$  und bestimmen die Kreuzungspunkte des Lots mit den Slowness-Kurven A, B und C. Werden an diesen Kreuzungspunkten die Radius-Vektoren gezeichnet, so entsprechen sie den Slowness-Vektoren der reflektierten L-Welle im Plexiglas und der gebrochenen L- und T-Wellen im Stahl. Die entsprechenden Winkel  $\theta_L^R$ ,  $\theta_L^T$  und  $\theta_T^T$  sind der Refraktionswinkel bzw. die Brechungswinkel.

Aus der Slowness-Fläche sind auch die Grenzwinkel einfach zu bestimmen: für den Übergang „Plexiglas-Stahl“ werden in Abb. 36 die Grenzwinkel der Longitudinal- ( $\theta_{GR-I}^I$ ) und der Transversal-Welle ( $\theta_{GR-II}^I$ ) angezeigt (der Grenzwinkel ist der Auftreffwinkel der aus dem oberen Me-

dium auf die Trennfläche einfallenden Longitudinalwelle, bei welchem die gebrochene L- bzw. T-Welle in unterem Medium zu einer Oberflächenwelle wird, d.h. der Brechungswinkel ist  $90^\circ$ ).

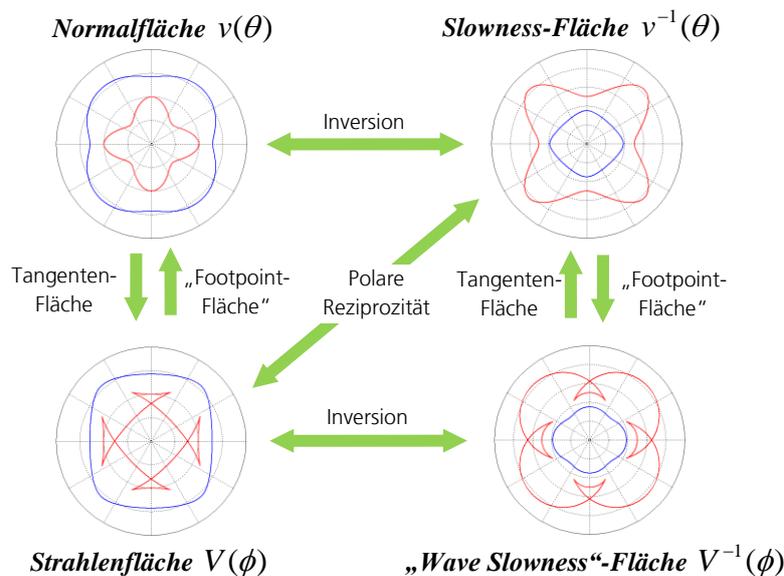
Die grafische Darstellung des Brechungsgesetzes anhand einer Slowness-Fläche (bzw. Slowness-Kurve) gestattet eine anschauliche Erklärung des Brechungsprozesses an einer Grenzfläche auch zwischen isotropen und anisotropen Medien (z. B. zwischen dem Grundwerkstoff und austenitischem Schweißgut) sowie zwischen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

### 5.4.1.2 Charakteristische Flächen eines anisotropen Mediums

Die Richtungsabhängigkeit der Schallausbreitung in einem anisotropen Medium kann man in Polarkoordinaten darstellen. In Anlehnung an die Slowness-Fläche, welche die Richtungsverteilung des Kehrwerts der Phasengeschwindigkeit darstellt, können folgende Flächen aufgebaut werden:

- *Normalfläche* – Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit  $v$  vom Phasenwinkel  $\theta$ ;
- *Strahlenfläche* – Abhängigkeit der Gruppengeschwindigkeit  $V$  vom Gruppenwinkel  $\phi$ ;
- *„Wave-Slowness“-Fläche* – Abhängigkeit des Kehrwerts der Gruppengeschwindigkeit  $V$  vom Gruppenwinkel  $\phi$ .

Zwischen den obengenannten Flächen existierten bestimmte geometrische Beziehungen (Abb. 37). Eine detaillierte Erklärung der Beziehungen ist in [36] zu finden. Die Konturen der Flächen in der Abbildung entsprechen den für den austenitischen Werkstoff X8CrNi1910 berechneten Richtungsabhängigkeiten der qP-Welle (blaufarbige Linie) und der qSV-Welle (rotfarbige Linie).

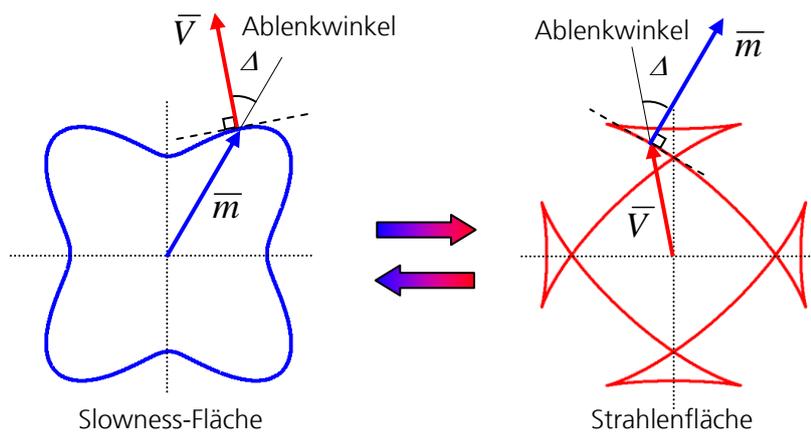


**Abb. 37: Beziehungen zwischen den charakteristischen Flächen eines anisotropen Mediums**

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 Slowness-Flächen gut illustriert werden.

Die Strahlenfläche und die Slowness-Fläche stehen in polarer Reziprozität zueinander [36]. 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. 38). Der Winkel zwischen den Vektoren entspricht dem Ablenkwinkel  $\Delta$ .



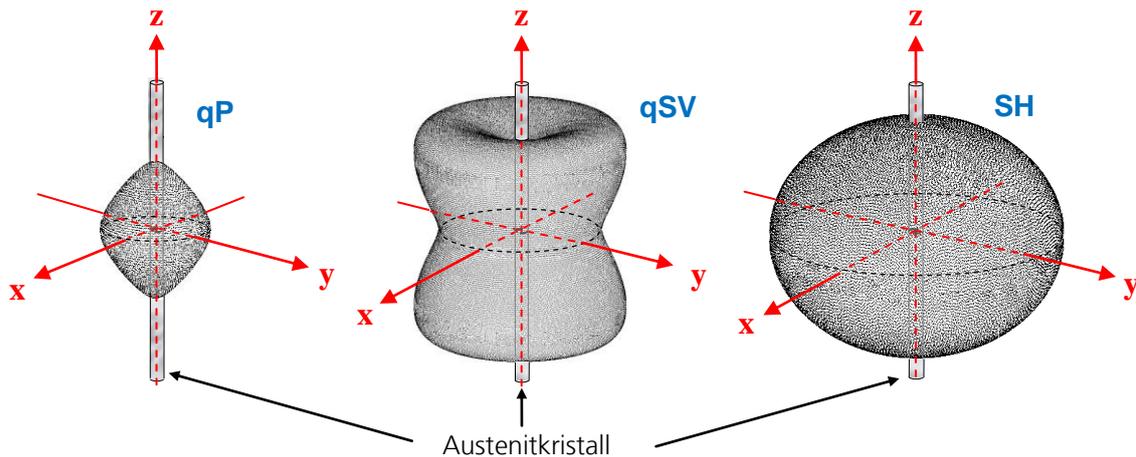
**Abb. 38: Slowness-Fläche und Strahlenfläche stehen in der polaren Reziprozität zueinander**

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, welche die Slowness-Fläche in dem dem Phasenwinkel entsprechenden Punkt berührt. Die Richtung der Energieausbreitung ist also senkrecht auf der Tangente.

### 5.4.1.3 Slowness-Oberflächen

In Analogie zur Slowness-Fläche, bildet der Slowness-Vektor  $\bar{m}$  bei Variation des Raumphasenwinkels  $\theta$  von 0 bis  $4\pi$  Steradian eine geschlossene Oberfläche – die Slowness-Oberfläche.

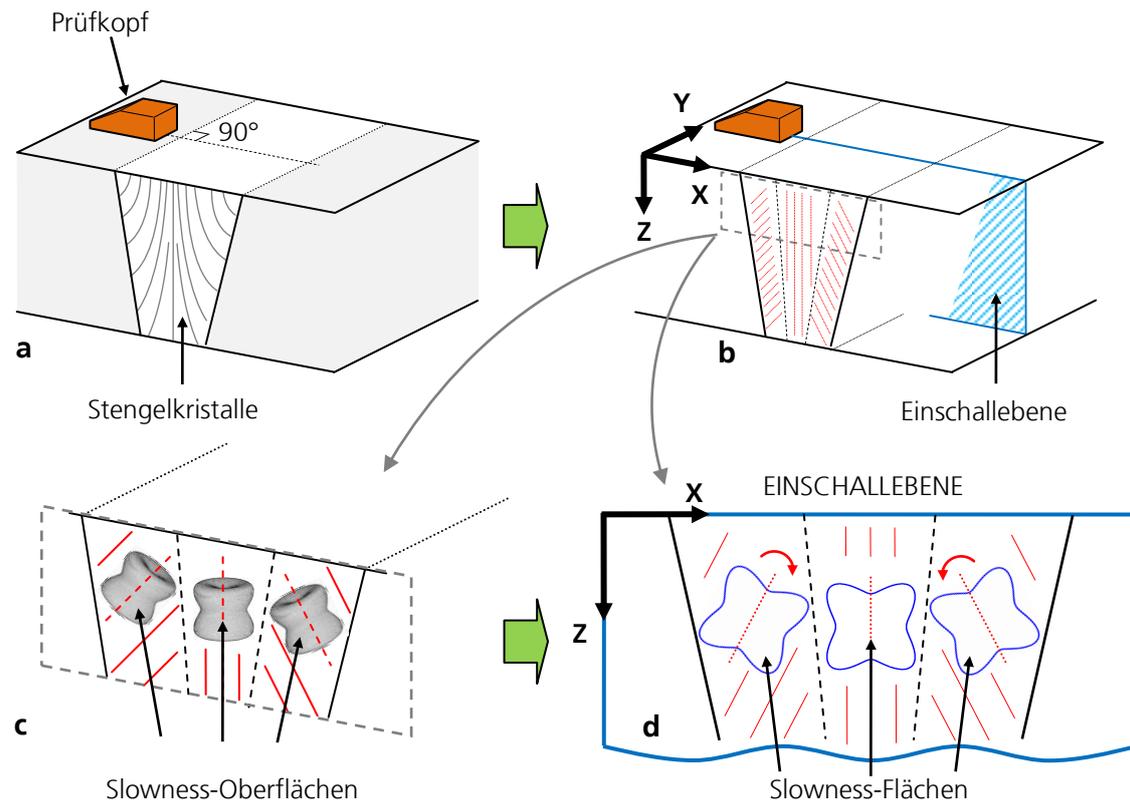
Da die transversal-isotropen austenitischen Stengelkristalle eine Symmetrieachse besitzen, stellen ihre Slowness-Oberflächen Rotationskörper dar. Die Rotationsachse entspricht damit der Wachstumsrichtung des Kristalls (Abb. 39).



**Abb. 39: Slowness-Oberflächen eines austenitischen Stengelkristalls**

Nehmen wir an, dass ein linearer Phased-Array-Ultraschallwandler normal zur Schweißnaht angeordnet ist (Abb. 40 a). Damit entsteht eine Einschallebene senkrecht zu den Schweißnahtflanken. Die Brechung des Schallbündels quer zu Einschallebene (Abb. 40 b) kann zunächst vernachlässigt werden.

Die zweite Annahme besteht darin, dass alle Stengelkristalle der Schweißnaht parallel zur Einschallebene angeordnet sind. Damit sind die Projektionen der Slowness-Oberflächen auf die Einschallebene immer dieselben und unterscheiden sich voneinander nicht durch die Form, sondern lediglich durch die Drehwinkel (Abb. 40 c und d). Die Rotation der Slowness-Flächen erfolgt nach (35).

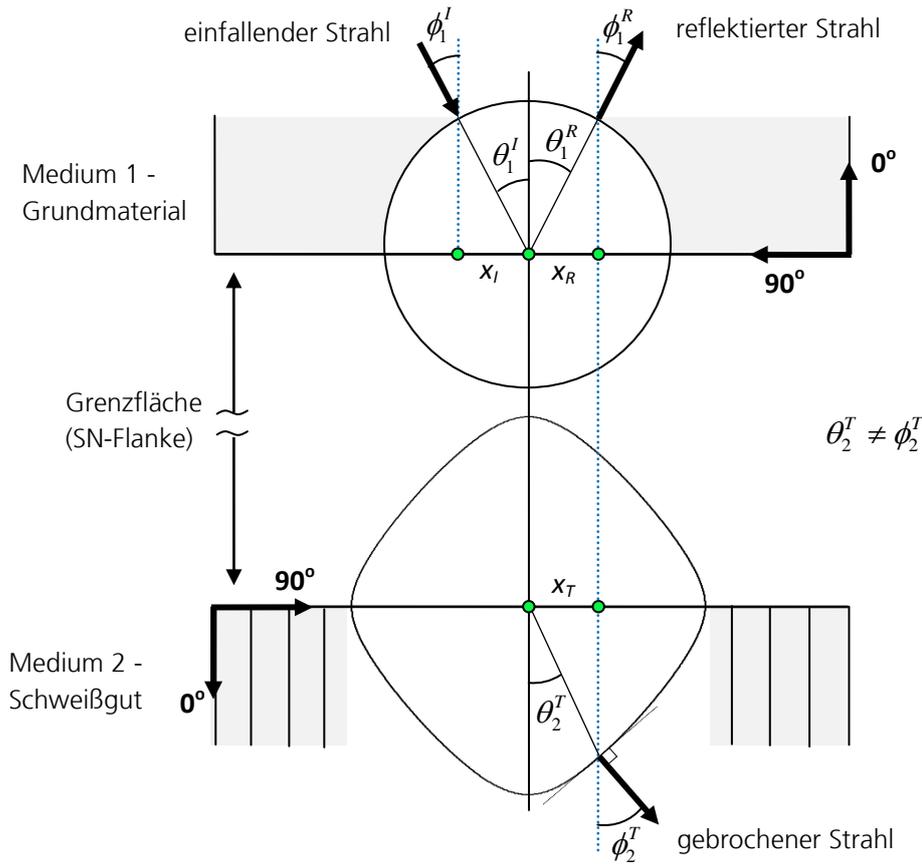


**Abb. 40: Slowness-Oberflächen und Slowness-Flächen der Stengelkristalle in transversal-isotropen Zonen der Schweißnaht (hierbei die qSV-Welle)**

#### 5.4.2 Schallbrechung an der Grenze „Grundmaterial-Schweißgut“

In Abb. 41 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. 41.

Nehmen wir an, dass aus dem isotropen Grundmaterial eine Welle unter einem Winkel  $\phi_1^I$  auf die Schweißnahtflanke fällt, in der die Stengelkristalle normal zu der Grenzfläche orientiert sind.



**Abb. 41: Illustration des Brechungsgesetzes an der Grenze Grundmaterial/Schweißgut für eine qP-Welle**

Da in isotropem Grundwerkstoff der Phasengeschwindigkeitsvektor und der Gruppengeschwindigkeitsvektor deckungsgleich sind und die gleiche Länge haben, kann der „Ray-Parameter“ wie folgt abgeleitet werden:

$$x_0 = \frac{\sin(\theta_1^I)}{V_1} = \frac{\sin(\phi_1^I)}{V_1} \quad (42)$$

Entsprechend dem Snellius'schen Gesetz für ein anisotropes Medium (38), müssen die Projektionen der Radius-Vektoren auf die horizontale Achse für die einfallende, reflektierte und gebrochene Welle gleich sein.

Somit kann die Gleichung (39) wie folgt umgeschrieben werden:

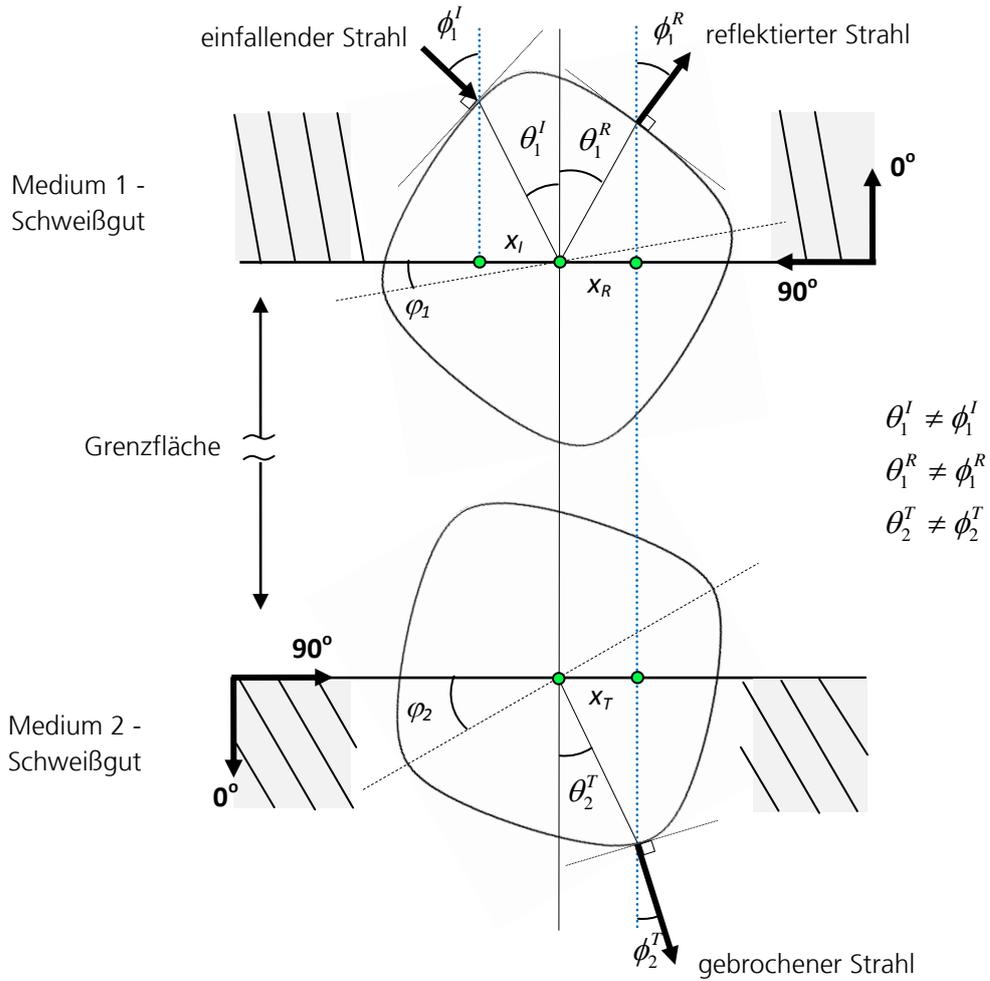
$$\left| \frac{\sin(\theta_1^I)}{V_1} \right| = \left| \frac{\sin(\theta_2^T)}{V_2(\theta_2^T)} \right| = \left| \frac{\sin(\theta_1^R)}{V_1} \right| \quad (43)$$

Die reflektierte Welle breitet sich in isotropem Grundmaterial unter dem Winkel  $\phi_1^R = \theta_1^R$  aus. Aus (40) folgt, dass der Reflexionswinkel gleich dem Einfallwinkel ist. Durch die Lösung der Gleichung (40) kann man den Refraktionsphasenwinkel  $\theta_2^T$  ermitteln. Danach werden nach (19) und (20) die Gruppengeschwindigkeit und der Gruppenwinkel bestimmt, unter welchen sich die gebrochene Welle in anisotropem Schweißgut ausbreitet. Gruppenwinkel  $\phi_2^T$  ist normal zur Berührungslinie mit der Slowness-Fläche im Medium 2 (siehe Abb. 41).

### 5.4.3 Schallbrechung an den Korngrenzen

Dasselbe Prinzip gilt für die Brechung der Ultraschallwelle an den Grenzen zwischen den Stengelkristallen. 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 Stengelkristalle.

In Abb. 42 bilden die Stengelkristalle des Mediums 1 einen Winkel  $(90^\circ - \varphi_1)$  bzw.  $(90^\circ + \varphi_1)$  mit der Grenzfläche, die Stengelkristalle des Mediums 2 - einen Winkel  $(90^\circ - \varphi_2)$  bzw.  $(90^\circ + \varphi_2)$ .



**Abb. 42: Illustration des Brechungsgesetzes an der Grenzfläche zwischen zwei transversal-isotropen Medien für eine qP-Welle**

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

$$|\vec{r}_1(\theta_1)| = \frac{1}{v(\theta_1 - \varphi_1)} \quad (44)$$

$$|\vec{r}_2(\theta_2)| = \frac{1}{v(\theta_2 - \varphi_2)} \quad (45)$$

wobei  $\vec{r}_1$  und  $\vec{r}_2$  die Radius-Vektoren der entsprechenden Slowness-Flächen sind. Die Winkel  $\theta_1$  und  $\theta_2$  sind von der Grenznormale aus abzutragen.

Entsprechend dem Snellius'schen Gesetz für anisotropes Medium, müssen der reflektierte Strahl und der gebrochene Strahl die Bedingung (38) erfüllen. Im Zusammenhang mit den Gleichungen (44) und (45) ergibt sich:

$$\left| \frac{\sin(\theta_1^I)}{V_1(\theta_1^I - \varphi_1)} \right| = \left| \frac{\sin(\theta_1^R)}{V_1(\theta_1^R - \varphi_1)} \right| = \left| \frac{\sin(\theta_2^T)}{V_2(\theta_2^T - \varphi_2)} \right| \quad (46)$$

Durch die Lösung der Gleichung (46) kann man den Refraktionsphasenwinkel  $\theta_2^T$  bzw. den Reflexionswinkel  $\theta_1^R$  bestimmen und die entsprechenden Gruppenwinkel berechnen. Die Gruppenwinkel sind normal zur Berührungslinie zu entsprechenden Slowness-Flächen (siehe Abb. 42), stehen also senkrecht auf der Tangente.

#### 5.4.4 Einige Bemerkungen zur Schallausbreitung im anisotropen Schweißgut

Die graphische Darstellung des Brechungsgesetzes anhand einer Slowness-Fläche ermöglicht anschaulich 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.

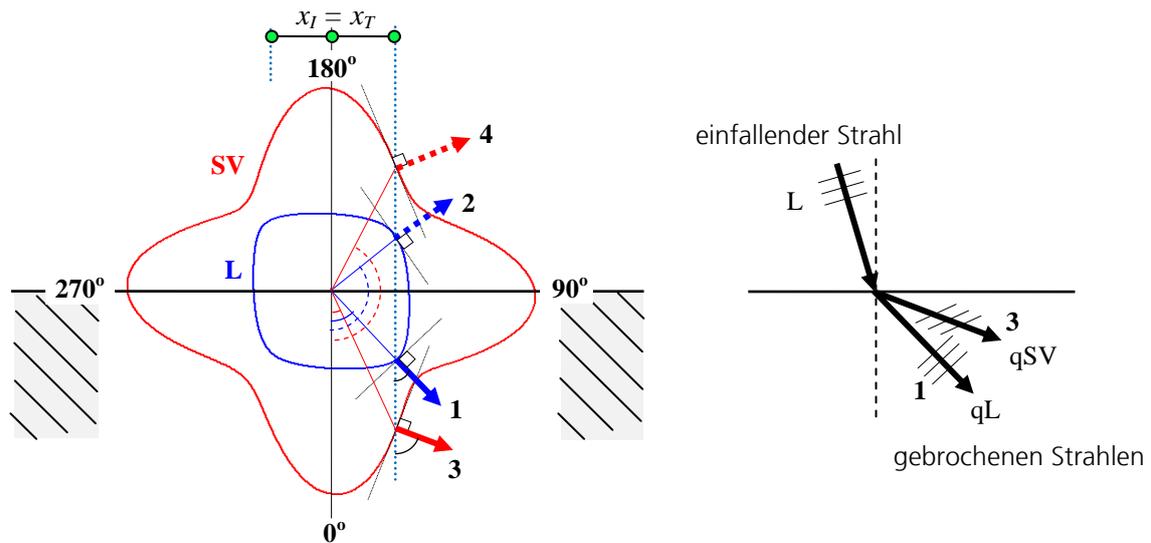
##### 5.4.4.1 Wellenumwandlung an Korngrenzen

In Analogie zu den isotropen Werkstoffen (Abb. 36), findet an den Grenzflächen der isotropen/anisotropen bzw. anisotropen/anisotropen Medien eine Wellenumwandlung statt.

In Abb. 43 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  $x_r = x_r$ . 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).

Da die Vektoren **2** und **4** nach oben von der Grenzfläche ausgerichtet sind (der Gruppenwinkel  $>90^\circ$ ), stellen sie imaginäre 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. 43: Wellenumwandlung in einem anisotropen Medium**

Die an den Gruppengeschwindigkeitsvektoren **1** und **3** eingezeichneten parallelen Striche (Abb. 43, rechts) sind normal zur Phasengeschwindigkeit und repräsentieren die Richtung der Polarisationsvektoren der Wellen: normal zum Vektor für die qL-Welle und kollinear dem Vektor für die qSV-Welle. In der Abbildung ist deutlich zu sehen, dass die Polarisationsrichtung der Wellen nicht genau parallel oder normal zur Ausbreitungsrichtung ist. Also, sind die gebrochenen Wellen *quasi*-longitudinal und *quasi*-transversal.

#### 5.4.4.2 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. 44). Der Ray-Parameter ist  $x_T$ . Der Ray-Parameter der gebrochenen qP- und qSV-Wellen ist  $x_T = x_T$ . Dem Ray-Parameter entsprechen vier Werte des Phasenwinkels und vier Werte des Gruppenwinkels (Vektoren **1**, **2**, **3** und **4** in der Abbildung). Da die Vektoren **2** und **4** nach oben von der Grenzfläche ausgerichtet sind (Gruppenwinkel  $>90^\circ$ ), stellen sie imaginäre Wellen dar und haben keine physikalische Bedeutung. Die Vektoren **1** und **3** präsentieren die gebrochenen qSV-Wellen.

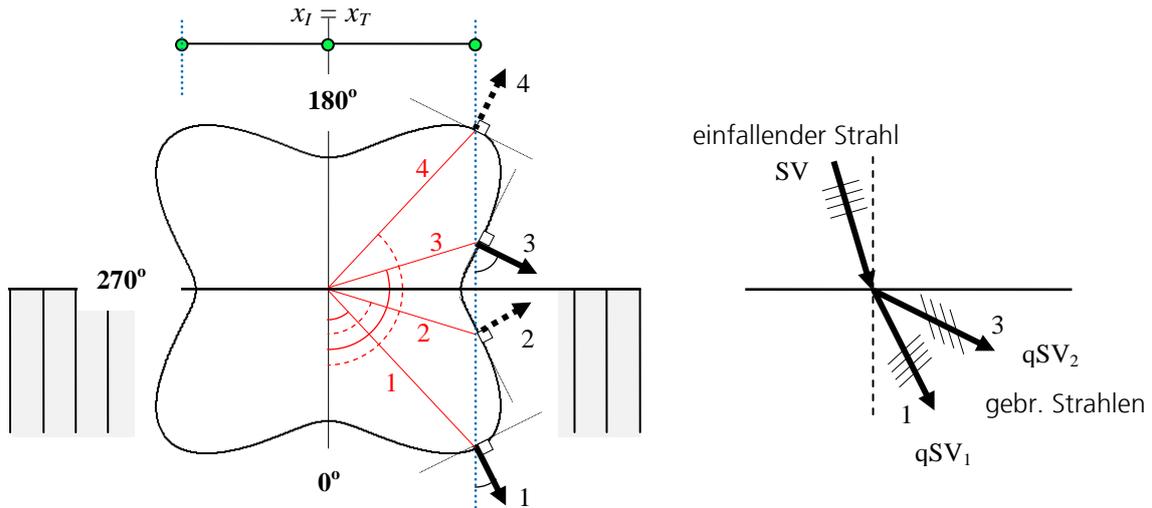


Abb. 44: Aufspaltung der quasi-transversalen Welle in einem anisotropen Medium

#### 5.4.4.3 Mögliche Ausbreitung der gebrochenen quasi-transversalen Welle

Dem Ray-Parameter  $x_T = x_I$  können zwei Phasenwinkel der gebrochenen qSV-Welle entsprechen (Abb. 45). 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. 45 stellt eine imaginäre Welle dar. Der Vektor **1** präsentiert die reale Richtung der gebrochenen qSV-Welle.

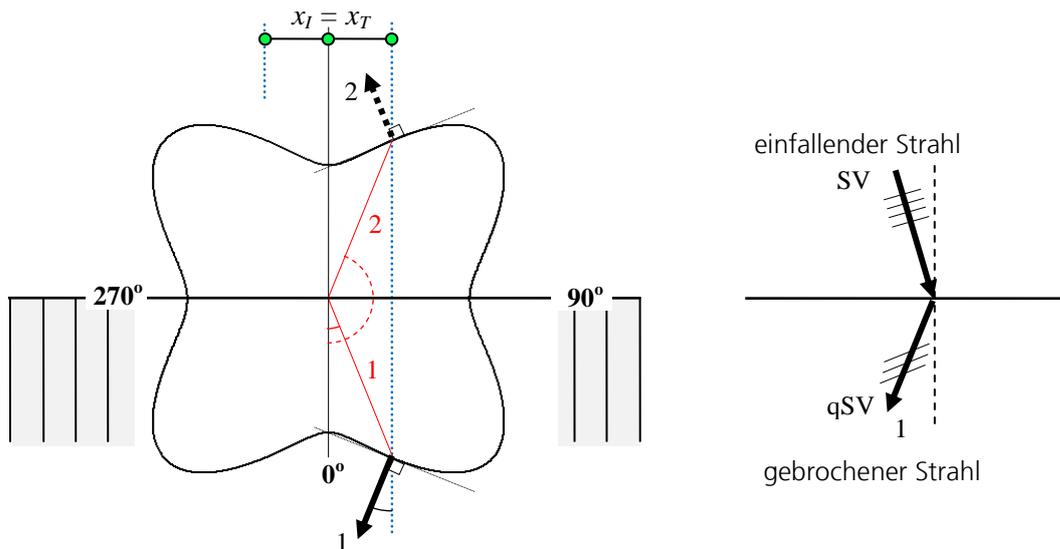


Abb. 45: Mögliche Ausbreitung der quasi-transversalen Welle in einem anisotropen Medium

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

$$0 \leq \theta^T \leq 180 \quad \text{und} \quad -90 \leq \phi^T \leq 90 \quad (47)$$

In einem isotropen Medium koinzidieren die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit. Dadurch läuft die Beziehung (47) auf ihre übliche Form (48) hinaus:

$$0 \leq (\theta^T = \phi^T) \leq 90 \quad (48)$$

## 5.5 Ray-Tracing Algorithmus zur 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 die Gefügestruktur und die elastischen 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 Stengelkristalle
- Berechnung der Ultraschalllaufzeiten von jedem Wandlerelement zu jedem Volumenpunkt
- Erstellung und Speicherung von Laufzeit Tabellen (s.g. Look-Up-Tabellen, LUTs) zur Rekonstruktion der Ultraschallbilder nach dem Sampling-Phased-Array-Prinzip. Verwendung von Look-Up-Tabellen gestattet im Folgendem die Rekonstruktion von Sektor-, Volumen- und Projektionsbilder in Echtzeit.

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

### 5.5.1 Eingangsparameter für die Simulation der Schallausbreitung durch anisotropes Mehr-Schicht-Modell

Es gibt insgesamt vierzehn Parametern (Abb. 46), die die konkrete Prüfsituation beschreiben und für die Simulation benötigt werden. Man kann diese drei Gruppen zuordnen:



Mediums „durchgeführt“. Beim „Durchgang“ des Strahles durch ein anisotropes inhomogenes Medium werden die Phänomene der Schallbrechung an den Grenzen und die Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit berücksichtigt.

Jeder Strahl entspricht der Normalenrichtung zur Strahlenfläche und präsentiert die Richtung, in welcher die akustische Energie sich ausbreitet. In jedem Punkt des Modellraums ist der Strahl charakterisiert durch die momentanen 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 in der Folge zu rekonstruierenden Bereiches entsprechen<sup>5</sup> ( $a=Z/\Delta Z$ ,  $b=X/\Delta X$ ,  $\Delta X$  und  $\Delta Z$  - Rastergröße) sind und  $N$  die Anzahl der PA-Elementen (Schallquellen) ist. Die Tabelle repräsentiert quasi das pixelierte Modell des Prüfobjektes. Ihre Zelle  $[a_i, b_i, K]$  enthält die Laufzeit, welche 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.

### 5.5.2.1 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. 47). Für den vorgegebenen Einschallwinkel  $\alpha$  im Prüfobjekt werden der entsprechende Winkel  $\beta$  und die 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 Randbegrenzung des Mediums. 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

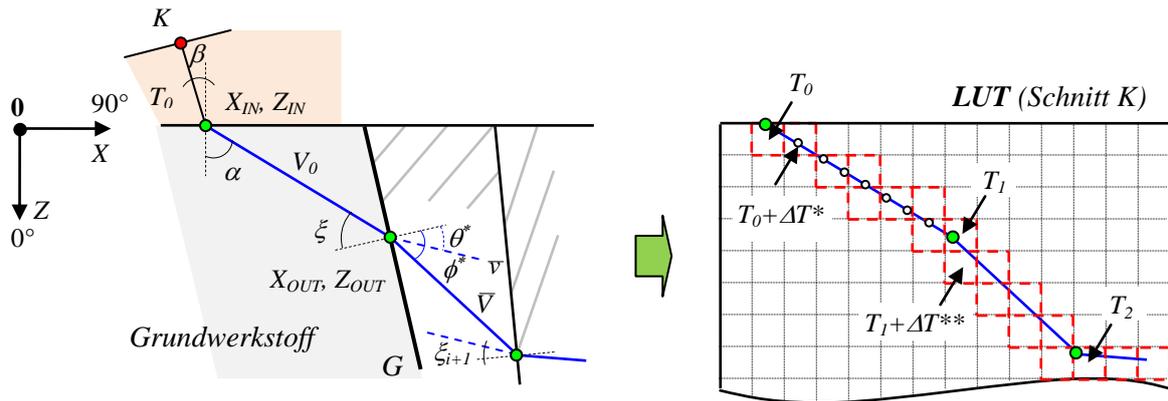
Schallgeschwindigkeit im isotropen Grundwerkstoff ist. Im allgemeinen Fall ist  $V$  die Gruppengeschwindigkeit der Welle entlang dieser Strecke. Der Strahl wird in die LUT übertragen. Die von

ihm getroffenen Zellen werden gleichmäßig ( $\Delta T^* = \frac{1}{2V} \min[\Delta X, \Delta Z]$ ) mit den Laufzeitwerten von

$T_0$  bis  $T_1$  ausgefüllt (Abb. 47).

---

<sup>5</sup> Siehe Abschnitt 4.1.2



**Abb. 47: Verfolgung eines Strahls durch das Modell einer inhomogenen Schweißnaht und Ausfüllen der Look-Up-Tabelle**

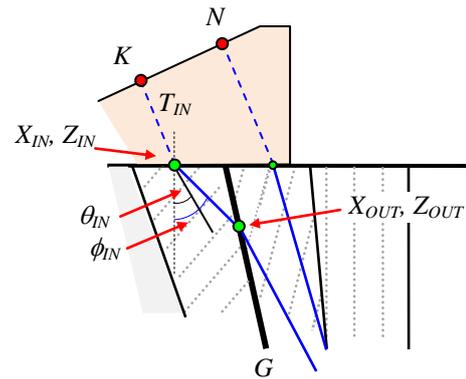
An der Grenze  $G$  bricht sich der Strahl. Man ermittelt den Auftreffwinkel  $\xi$  und berechnet den Ray-Parameter  $x_0 = \sin(\xi)/v$ , wobei  $v$  die Phasengeschwindigkeit der einfallenden Welle ist (im isotropen Grundwerkstoff  $v = V = V_0$ ). Die nach dieser Vorgehensweise berechneten Vektoren  $v(\theta)$  und  $V(\phi)$  werden entsprechend der Stengelkristallitenorientierung für lokales grenzbezogene Koordinatensystem angepasst (Abb. 34). Die Brechungswinkel und die Geschwindigkeiten der gebrochenen Welle werden, wie im Abschnitt 5.4 beschrieben (Abb. 33), ermittelt. Die so bestimmten Phasen- und Gruppenwinkel ( $\theta^*$ ,  $\phi^*$ ) müssen vom lokalen Koordinatensystem ins globale (Abb. 47 links) übertragen werden. Auf diese Weise wird der Strahl durch sämtliche Schichten des erstellten Modells der Naht „propagiert“. Der Gruppenwinkel bestimmt die Strahlausbreitungsrichtung in der aktuellen Schicht (d.h. die Koordinate der Kreuzungspunkte), die Gruppengeschwindigkeit bestimmt 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  $\phi^*$  nicht ermittelt werden kann (die gebrochene Welle nicht existiert, d.h.  $\phi^* < 0^\circ$  oder  $\phi^* > 90^\circ$ ).

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

### 5.5.2.2 Ray-Tracing Prozedur bei Anordnung des Wandlers am Schweißgut

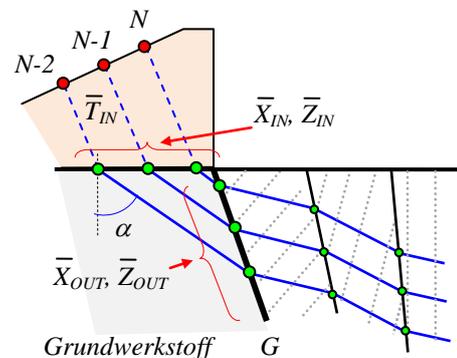
Wird der Prüfkopf an dem Prüfobjekt so angeordnet, dass der Austrittspunkt eines Strahles nicht im Grundwerkstoff, sondern in der anisotropen Naht befindet, ist die Prozedur der Bestimmung der Anfangsparameter des Strahles etwas komplizierter. Nach der Ermittlung von  $\beta$ ,  $T_{IN} = T_0$  und  $(X_{IN}, Z_{IN})$  (Abb. 47, Abb. 48) wird festgelegt, zu welcher transversal-isotropen Zone des Nahtmodells der Austrittspunkt gehört. Unter Beachtung der Kristallitenorientierung in dieser Schicht berechnet man das Brechungsgesetz für die Grenze „isotroper Vorlaufkeil – anisotropes Schweißgut“ und ermittelt die Anfangswerte der Phasen- und Gruppenwinkel  $\theta_{IN}$ ,  $\phi_{IN}$  und der Phasen- und Gruppengeschwindigkeit  $v_{IN}$ ,  $V_{IN}$  für den aktuellen Strahl. Weiterhin erfolgen die Strahlverfolgung und das Ausfüllen der Look-Up-Tabelle analog wie im Abschnitt 5.5.2.1 beschrieben.



**Abb. 48: Ermittlung der Anfangsparameter eines Strahls bei Anordnung des Wandlers am anisotropen inhomogenen Schweißgut**

### 5.5.2.3 Beschleunigung der 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. 49), ermöglicht eine Beschleunigung des Simulationsvorganges für einen PA-Wandler. Die von  $N$  verschiedenen Elementen ausgesendeten gleichorientierten Strahlen verlaufen parallel. Das Brechungsgesetz an jeder Grenze wird einmal berechnet und für alle  $N$  Strahlen angewandt. Dies ermöglicht, dass eine Schleife in dem Programmablauf (siehe Abb. A1-3 in Anlage 1) nicht mehr durchlaufen werden muss und beschleunigt damit den Simulationsvorgang. Die Unterschiede in der Länge der von den verschiedenen Strahlen durchlaufenen Strecken werden dabei jedoch 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 durchlaufenen Strecken sind Vektoren mit der Länge von  $N$  Elementen.



**Abb. 49: Parallelisierung der Ray-Tracing-Prozedur für einen PA-Wandler**

Diese Ausführung des Ray-Tracing-Algorithmus ist nur dann anwendbar, wenn alle  $N$  Strahlen anfangs parallel sind und es weiterhin bleiben. 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 in Abb. 48 dargestellten Fall muss man Strahl für Strahl, Element für Element berechnen.

Die Flussdiagramme des Simulationsvorganges für die Verfolgung eines Strahles durch ein anisotropes inhomogenes Medium in den Ausführungen „Anisotrop“ und „Anisotrop Parallelisiert“, sowie für den Fall eines isotropen Werkstoffes sind der Anlage 1 zu entnehmen.

### 5.5.3 Prinzipieller Aufbau der Simulationssoftware

Ein vereinfachtes generalisiertes Schema der Simulationsprogramme ist in Abb. 50 dargestellt. Es beinhaltet drei Typen von Komponenten.

#### Parameterdatensatz

Der Parameter-Datensatz ist eine Liste der Parameter, die man für die Simulation benötigt (siehe Abschnitt 5.5.1). Sämtliche 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 (beachte die Farbkodierung an den Modulen 3-5 in Abb. 50).

#### Wrappers

Eine Steuerfunktion (engl. *Wrapper*) bestimmt die Funktionsfolge und Programmschleifen und verwaltet den Datenaustausch zwischen den Berechnungsmodulen. Außerdem, 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 Rechengang 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.

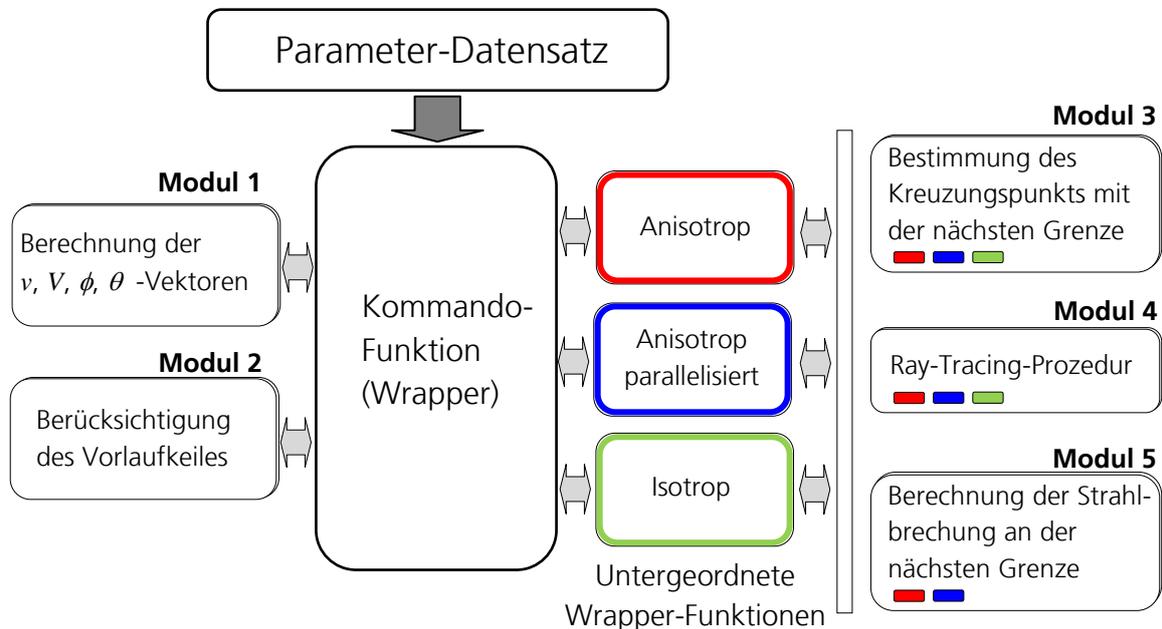


Abb. 50: Prinzipieller Gesamtaufbau der Ray-Tracing-Simulationssoftware

### Beschreibung der einzelnen Rechenmodule

- **Modul 1** – berechnet die Phasengeschwindigkeit, die Gruppengeschwindigkeit sowie den Gruppenwinkel der ausgewählten Wellen-Mode (qL, qSV oder SH) für alle Phasenwinkel von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  mit vorgegebener Winkelauflösung. Als Eingangsparameter werden die vorgegebene Dichte und Steifigkeitsmatrix der Stengelkristalle 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 TI-Zonen.
- **Modul 2** – berücksichtigt den Vorlaufkeil des Wandlers. Der Modul berechnet die Schallaustrittspunkte und Vorlaufzeiten im Keil für alle Winkel aus der vorgegebenen Winkelvariation. 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 – anisotropes Schweißgut“ und bestimmt die Anfangswerte von dem Phasen- und Gruppenwinkel sowie von der Phasen- und 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. Der Modul „propagiert“ den Strahl durch die aktuelle TI-Zone unter Nutzung des von Modul 5 berechneten Gruppenwinkels. Damit werden die betroffenen Zellen der Look-Up-Tabelle bestimmt, in denen die berechneten Laufzeitwerte gespeichert werden. 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.*

Der Modul bestimmt die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit sowie den Phasen- und Gruppenwinkel für gebrochene Strahlen. Dafür werden die Ergebnisse der Module 1 und 3 benutzt. Tritt eine Aufspaltung der gebrochenen Welle auf (siehe Abschnitt 5.4.4.2), so werden sämtliche sich aus dem vorgegebenen „Phase-Slowness“-Diagramm ergebenden Gruppenwinkel bestimmt.

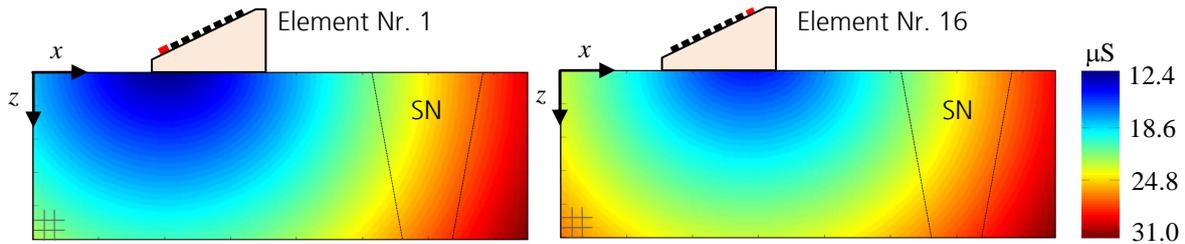
Die berechnete Phasengeschwindigkeit und der Phasenwinkel des gebrochenen Strahls werden nach der Transformation ins generalisierte Koordinatensystem für die nächste Iteration verwendet (Modul 3 und Modul 5).

Der Gruppenwinkel sowie die Gruppengeschwindigkeit werden vom Modul 3 und vom Modul 4 benutzt.

## 5.5.4 Simulationsergebnisse

### 5.5.4.1 Ultraschalllaufzeiten zur Berechnung von SPA-Ergebnisbildern

Die Aufgabe der Simulationssoftware ist die Ermittlung der Laufzeiten ausgehend von der modellierten Schallquelle bis zu jedem Punkt des räumlichen Objektmodells für die nachfolgend erfolgende SAFT-Rekonstruktion. Während des Simulationsvorganges werden die ermittelten Laufzeiten in einer Look-Up-Tabelle (LUT, Nachschlagetabelle) gespeichert (wie in Abb. 47 gezeigt). Jede Zelle der Tabelle entspricht einem Volumenelement des pixelierte Modells des zu rekonstruierenden Prüfobjekts und enthält die Laufzeit, mit welcher die elastische Welle von der Schallquelle dieses Volumenelement erreicht (Abb. 51).



**Abb. 51: Farbkodierte Laufzeiten für das erste und das letzte Element eines linearen PA-Wandlers mit Vorlaufkeil (hierbei: Werkstoff X6CrNi1810, (Quasi)-Longitudinale Welle,  $V_{GW}=5740$  m/s, Simulationsbereich  $50 \times 150$  mm, Rastergröße 0.2 mm)**

Eine Nachschlagetabelle 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 und damit die Messpositionen eines Einzelschwingerprüfkopfes bei Anwendung des konventionellen SAFT-Verfahrens bzw. die Messpositionen der individuellen Elemente eines linearen Phased-Array-Wandlers in der Sampling-Phased-Array-Prüftechnik.

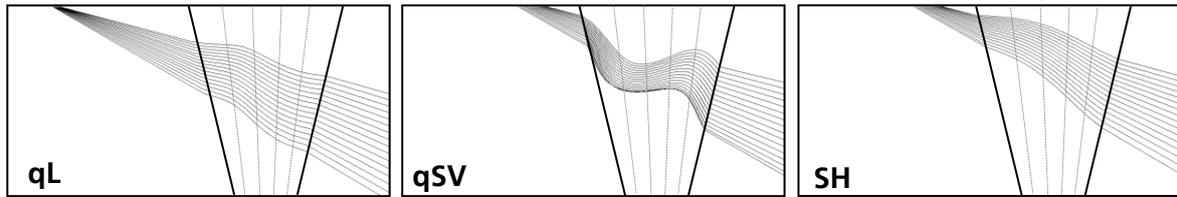
Dank der Nutzung der Look-Up-Tabelle beschleunigt sich die SAFT-Rekonstruktion. Die Rekonstruktion des Volumenpixels  $(a,b)$  nach dem Sampling-Phased-Array-Prinzip besteht in der Summierung der entsprechenden Samples von allen Laufzeitsignalen  $A_{SE}$ , die in der SPA-Informationsmatrix vorhanden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

$$R(a,b) = \sum_{S=1}^N \sum_{E=1}^N A_{SE} [T = LUT(a,b,S) + LUT(a,b,E)] \quad (49)$$

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

#### 5.5.4.2 Visualisierung des Schallbündels

Während der Strahlverfolgung werden auch die Schallbrechungspunkte an jeder transversal-isotropen Schicht des Nahtmodells gespeichert. Dies ermöglicht, das Schallbündel in seinem Gesamtverlauf durch die Schweißnaht darzustellen, um das Verständnis von der Ausbreitung der elastischen Wellen und von den begleitenden Beugungseffekten zu haben. In Abb. 52 wird die Schallausbreitung von drei Wellenarten durch das anisotrope inhomogene Schweißgut für dieselbe Prüfkopfposition dargestellt.



**Abb. 52: Visualisierung der Beugungseffekte bei Ausbreitung des Schallbündels durch die austenitische Schweißnaht: v.l.n.r. – quasilongitudinale Welle, vertikal- und horizontalpolarisierten (quasi-) transversalen Wellen**

Die Abbildung 52 bestätigt, dass die quasilongitudinale Welle qL und die horizontalpolarisierte transversale Welle SH in geringerem Maße von der Anisotropie und Inhomogenität beeinflusst werden, als die vertikalpolarisierte quasitransversale Welle qSV.



## **6. Iterative Bestimmung von unbekanntem akustischen Eigenschaften durch ein Optimierungsverfahren: „Gradient Elastic Constant Descent“-Methode (GECDM)**

### **6.1 Grundvoraussetzungen zur Anwendung der iterativen Bestimmung 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 projizierten HF-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 entstehende Phasenverschiebung eine inkohärente Summierung der Signale, was die Fokussierungsqualität vermindert. Die Voraussetzung, dass die realen Parameter für eine Rekonstruktion möglichst genau bekannt sein müssen, ist die Grundlage für die Methode, die unbekanntem Parameter durch iterative Anpassung der Größen zu bestimmen, welche dann die konstruktive und destruktive Interferenz im räumlichen Modell ohne Phasenfehler ermöglichen.

Als Axiom wird daher postuliert, dass die beste Fokussierung dann und nur dann erreicht wird, wenn die beeinflussenden Größen, welche eine kohärente/inkohärente Summierung bewirken, ihren realen, im Medium vorliegenden Werten entsprechen. Unter der besten Fokussierung ist zum einen zu verstehen, dass die Positionen der rekonstruierten Anzeigen von Reflektoren mit ihren realen Koordinaten in der Komponente übereinstimmen, und zum anderen, dass die Abmessungen der Anzeigen sich optimal den tatsächlichen Reflektorgrößen annähern und das rekonstruierte Bild – nicht zuletzt – auch die wenigsten Rekonstruktionsartefakte (die Folge der inkohärenten Addierung) aufweist.

Die zweite Forderung setzt voraus, dass man ein Kriterium hat, die Fokussierungsqualität quantitativ zu beschreiben. Als quantitative Größen dienen dementsprechend die Amplitude, Fläche und Positionsabweichung einer Anzeige und die Amplitude der Scheinanzeigen (Artefakte).

### **6.2 Das Prinzip der iterativen Bestimmung von akustischen Eigenschaften nach der GECDM anhand eines bekannten Referenzreflektors**

#### **6.2.1 Praktischer Bedarf der automatischen Bestimmung 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, beeinflussen 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. Die 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 zerstörender 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.

### **6.2.2 Allgemeines Prinzip der iterativen Bestimmung 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 Kristallit-Struktur durchzuführen.

Der Ansatz besteht in der inversen Anpassung der angenommenen Steifigkeitsmatrix. Da die elastischen Konstanten (Elemente der Matrix) die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit bestimmen (19-22), beeinflussen sie indirekt auch die SPA-Fokussierung. Als Optimierungskriterium dient dabei die ortstgetreue Rekonstruktion eines Modellreflektors im Kalibrier- bzw. Vergleichskörper, dessen genaue Lage und Größe bekannt sind. Dieser Kalibrierkörper ist optimal eine Verfahrensprobe, mit der die Schweißung qualifiziert wurde. Die Gefügestruktur der Referenznaht wird auch als bekannt betrachtet: sie kann zum Beispiel anhand eines Schlibfbildes ermittelt werden.

Zunächst erfolgt die Simulation der Wellenausbreitung mit angenommenen, im Allgemeinen daher falschen elastischen Konstanten und festgelegten Wert der Materialdichte als Startwerte. 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 der GECM-Methode werden die elastischen Konstanten im Folgenden iterativ solange angepasst (Abb. 53), bis die Anzeige im

Sektor-Bild ihre richtige Position (von IST nach SOLL) erreicht und die Amplitude sowie die Schärfe der Anzeige ihre optimalen Werte annehmen.

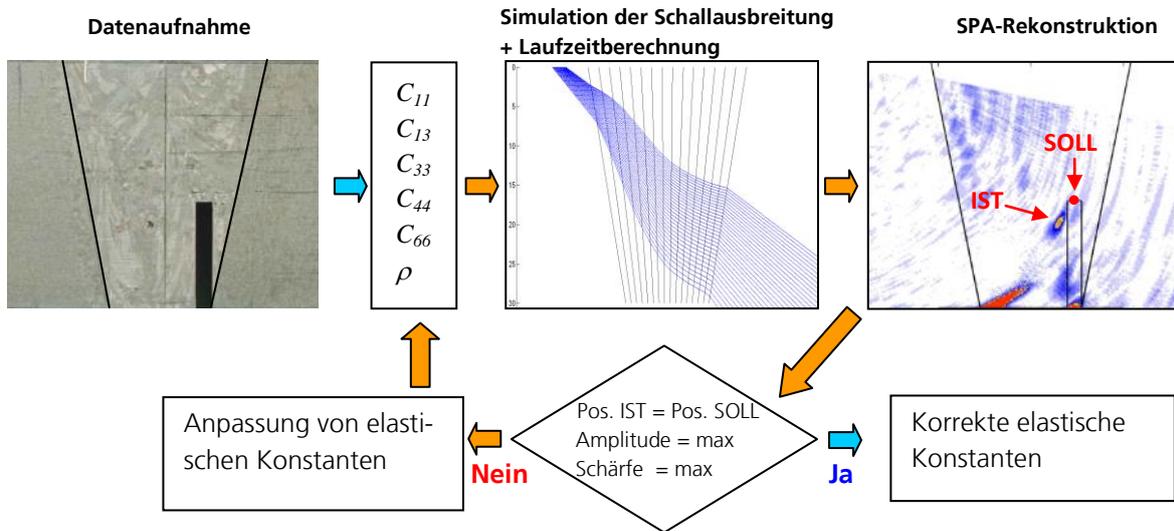


Abb. 53: Iterative „Gradient-Elastic-Constants-Descent-Methode“

### 6.2.3 „Descent Search“-Funktion

#### 6.2.3.1 „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  $L$  der Anzeige von der Soll-Position, und die Fokussierungsschärfe (-unschärfe)  $U$ , die gemeinsam die Qualität des Ergebnisses repräsentieren. Die „Descent-Funktion“ lautet:

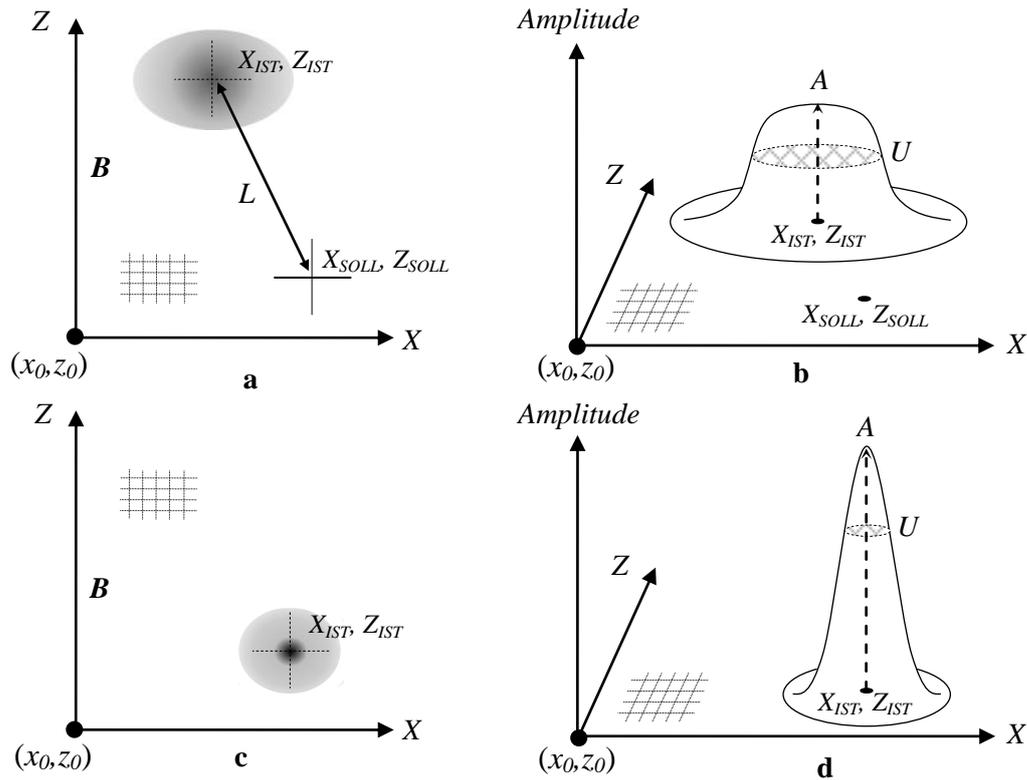
$$f_{DS}(C) = G_1 \cdot L + G_2 \cdot \frac{1}{A} + G_3 \cdot U \quad (50)$$

wobei  $L$  der Abstand zwischen der richtigen Position **Soll** ( $X_{SOLL}$  und  $Z_{SOLL}$ ) und der Position **Ist** ( $X_{IST}$  und  $Z_{IST}$ ) der Fehleranzeige in dem rekonstruierten Schnittbild ist:

$$L = \sqrt{(X_{SOLL} - X_{IST})^2 + (Z_{SOLL} - Z_{IST})^2} \quad (51)$$

Die Funktionsparameter werden in Abb. 54 erklärt.

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



**Abb. 54: Analyse einer Anzeige im ausgewählten Bildbereich: Position und Amplitudenprofile unfokussierter (a,b) und fokussierter (c,d) Anzeige (schematisch dargestellt)**

Der „Descent Search“-Algorithmus funktioniert nach folgendem Prinzip: 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 („Threshold“)  $A_{TR}$ , wobei sämtliche Punkte mit Amplitudenwerten unter dem Schwellenwert in der Bildanalyse keine Berücksichtigung finden. Diese Werte werden zu 0 gesetzt:

$$B_{ij} = \begin{cases} B_{ij} & \text{wenn } B_{ij} \geq A_{TR} \\ 0 & \text{wenn } B_{ij} < A_{TR} \end{cases} \quad (52)$$

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 so genannten Massenschwerpunktes des analysierten Bereiches bestimmt. Für diese Bestimmung wird die Momentenfunktion verwendet. Besteht der Bereich  $B$  aus  $m \times n$  Punkten, berechnet man die  $x$ -Koordinate und  $z$ -Koordinate des Massenschwerpunktes als:

$$x_{ist} = x_0 + \left( \frac{\sum_{i=1}^m (i \cdot \sum_{j=1}^n B_{ij})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij}} \right) \cdot \Delta x \quad (53)$$

$$z_{ist} = z_0 + \left( \frac{\sum_{j=1}^n (j \cdot \sum_{i=1}^m B_{ij})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij}} \right) \cdot \Delta z \quad (54)$$

wobei  $x_0$  und  $z_0$  die Koordinaten des ausgewählten Bereiches im übergeordneten Koordinatensystem,  $\Delta x$  und  $\Delta z$  – 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.

$$A = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij}}{N} \quad (55)$$

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

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

$$U = |B_1| \cdot \Delta x \cdot \Delta z \quad B_1 = \{B : B_{ij} \geq k \cdot A\} \quad (56)$$

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 Mittelwertamplitude  $A$  darstellt. Zum Beispiel entspricht der Wert  $k=0.5$  der Halbwerts-Methode bei konventioneller Ultraschallprüfung [27].

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 im Rahmen dieser Dissertation mit folgenden Werten eingesetzt:  $G_1=1$  (für die Positionsabweichung der Anzeige),  $G_2=1000$  (für die Anzeigeamplitude),  $G_3=1$  (für die Anzeigeunschärfe).

### 6.2.3.2 „Descent Search“-Funktion als nichtanalytisch berechenbare Funktion der Steifigkeitsmatrix

Die elastischen Konstanten beeinflussen 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 nichtanalytisch berechenbare 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) eine 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  $f_{DS}$ .

## 6.2.4 Minimierung der „Descent“-Funktion

### 6.2.4.1 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:

$$\vec{c}^{(i+1)} = \vec{c}^{(i)} + \lambda_{DS}^{(i)} \mathbf{d}^{(i)} \quad (57)$$

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

Die Komponente  $\mathbf{d}^{(i)}$  der Gleichung (29) ist der negative Gradient der Funktion  $f_{DS}$ :

$$\mathbf{d}^{(i)} = -\nabla f_{DS}(\vec{c}^{(i)}) = -(\bar{k}_1 \frac{\partial}{\partial C_{11}} + \bar{k}_2 \frac{\partial}{\partial C_{13}} + \dots + \bar{k}_5 \frac{\partial}{\partial C_{66}}) f_{DS} \quad (58)$$

Hierbei sind  $\bar{k}_1, \bar{k}_2, \dots, \bar{k}_5$  die Einheitsvektoren des fünf-dimensionalen Raums, in dem die Descent-Funktion als Funktion der Argumente  $[C_{11} \ C_{13} \ C_{33} \ C_{44} \ C_{66}]$  definiert ist.

Der Suchvorgang läuft mit einer dynamischen Schrittweite  $\lambda$ , die bei jedem Iterationsschritt angepasst wird. Dadurch reduziert sich die Anzahl der Iterationen, in welchen der Minimalwert der Descent-Funktion ermittelt werden kann.

$$\lambda^{(i+1)} = \arg \min_{\lambda} [f_{DS}(\bar{c}^{(i)} - \lambda_{DS} \nabla f_{DS}(\bar{c}^{(i)}))] \quad (59)$$

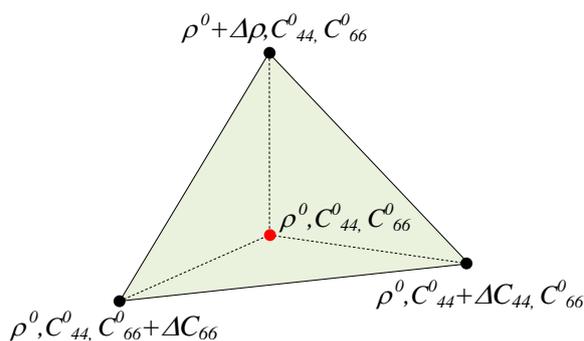
Der Iterationsprozess wird abgebrochen, wenn der Unterschied der Funktions-Werte bei zwei aufeinander folgenden Iterationen kleiner als die vorgegebene Toleranz  $\varepsilon$  ist.

$$|f_{DS}(\bar{c}^{(i+1)}) - f_{DS}(\bar{c}^{(i)})| \leq \varepsilon \quad (60)$$

### 6.2.4.2 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 [86]. Im Unterschied zum Gradienten-Verfahren ist der Simplex-Algorithmus eine Direktsuch-Methode, die weder einen analytischen noch einen numerischen Gradienten verwendet. Der Algorithmus basiert auf der Modifizierung des Simplex, welche zunächst um den Ausgangsvektor  $\bar{c}^{(0)}$  angeordnet 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  $n+1$  Elementen. Die Start-Simplex-Menge besteht aus dem Ausgangsvektor  $\bar{c}^{(0)}$  und  $n$  Vektoren, die durch Inkremente der Funktionsargumente erzeugt werden. Der Inkrement-Wert ist ein Parameter des Simplex-Algorithmus.



**Abb. 55: Dreidimensionales Start-Simplex der „Descent“-Funktion für die SH-Welle**

Als Beispiel wird in Abb. 55 das Start-Simplex für den Fall der horizontalpolarisierten Transversalwelle dargestellt. Da die Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten der SH-Welle nur von der Dichte  $\rho$  und von zwei elastischen Konstanten  $C_{44}$  und  $C_{66}$  abhängen, hat die „Descent“-Funktion also nur drei Argumente. Das Simplex stellt sich als ein Tetraeder dar. Die Simplexe der „Descent“-Funktion für die Fälle der qL-Welle bzw. der qSV-Welle sind fünfdimensional und können daher grafisch nicht dargestellt werden.

Während der Iterationen wird der am schlechtesten liegende Punkt (wobei  $f_{DS}$  ihren maximalen Wert im Vergleich mit anderen Eckpunkten besitzt) des Simplex ausgenommen

und durch einen neuen Punkt ersetzt. Der Minimierungsvorgang der „Descent“-Funktion von  $n$  Argumenten nach dem Nelder-Mead-Algorithmus läuft wie folgt ab [87]:

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

$$\begin{aligned}\vec{c}_1 &= \arg \min\{ f_{DS}(\vec{c}) : \vec{c} \in \hat{S}^{(i)} \} \\ \vec{c}_{n+1} &= \arg \max\{ f_{DS}(\vec{c}) : \vec{c} \in \hat{S}^{(i)} \}\end{aligned}\tag{61}$$

3. Es wird das Zentrum  $M$  der  $n$  besten Punkte bestimmt, das als weiteres Transformationszentrum dient:

$$M = \frac{\sum_{k=1}^n \vec{c}_k}{n}\tag{62}$$

4. Es werden auch die Punkte  $A_1, A_2, B_1, B_2, C$  und  $D$  (Abb. 56) bestimmt. Abhängig von den Beziehungen zwischen den „Descent“-Funktionswerten in diesen Punkten wird das Simplex  $\hat{S}^{(i)}$  nach der  $i$ -ten Iteration entweder extrahiert, kontrahiert, gespiegelt oder geschrumpft (Simplex  $\hat{S}^{(i+1)}$  in Abb. 56).

$$\begin{aligned}A_{1,2} &= M \pm \alpha \cdot (\vec{c}_{n+1} - M) & \hat{S}^{(i+1)} &= \{\vec{c}_1 \quad \vec{c}_2 \quad \vec{c}_3 \quad \dots \quad A_{1,2}\} \\ B_{1,2} &= M \pm \beta \cdot (M - \vec{c}_{n+1}) & \hat{S}^{(i+1)} &= \{\vec{c}_1 \quad \vec{c}_2 \quad \vec{c}_3 \quad \dots \quad B_{1,2}\} \\ C &= 2 \cdot M - \vec{c}_{n+1} & \hat{S}^{(i+1)} &= \{\vec{c}_1 \quad \vec{c}_2 \quad \vec{c}_3 \quad \dots \quad C\} \\ D_k &= \vec{c}_1 + \frac{\vec{c}_{k+1} - \vec{c}_1}{2}, \quad k = 1 \dots n & \hat{S}^{(i+1)} &= \{\vec{c}_1 \quad D_1 \quad D_2 \quad \dots \quad D_n\}\end{aligned}\tag{63}$$

Hierbei sind  $\alpha$  und  $\beta$  die Parameter des Nelder-Mead –Algorithmus.

5. Der Suchvorgang wird abgebrochen, wenn die Simplexmenge  $\hat{S}$  auf das vorgegebene Maß geschrumpft ist: der Abstand zwischen den Simplex-Ecken muss kleiner als der Toleranzwert  $\varepsilon$  sein.

$$\forall (a,b) \in \hat{S} : \|\vec{c}_a - \vec{c}_b\| \leq \varepsilon\tag{64}$$





## 7. Experimentelle Validierung der SPA-Technik mit inverser Phasenanpassung und iterativer Bestimmung der elastischen Eigenschaften nach GECDM

Für die Validierung der in den Kapiteln 5 und 6 beschriebenen Algorithmen wurden geschweißten austenitische Testkörper aus den Testkörperbibliotheken des Fraunhofer IZFP und der Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart ausgewählt und mittels des Sampling-Phased-Array-Verfahrens geprüft. Die Testkörper besitzen sowohl künstliche als auch natürliche Fehler in der Schweißnaht sowie in der Wärmeeinflusszone und im Grundwerkstoff.

Der Validierungsvorgang beinhaltet die folgenden Arbeitsschritte:

- Auswahl der Testkörper
- Auswahl der Prüfköpfe und Vorlaufkeile
- Laboraufbau der Messtechnik (SPA-Prüfsystem, 3-Achsenmanipulator)
- Datenaufnahme nach dem Sampling-Phased-Array-Prinzip
- Rekonstruktion der Ergebnisbilder mit Berücksichtigung der Werkstoffanisotropie und – Inhomogenität (zweidimensionale Sektor-Bilder und B-Bilder, dreidimensionalen Volumenbilder) und iterativer Anpassung der akustischen Eigenschaften
- Quantitative Auswertung der Anzeigen: Lage und Ausdehnung
- Vergleich der aus den Ultraschallbildern ermittelten Werte mit den tatsächlichen Lagen und Größen der Materialungängen

### 7.1 Auswahl der Testkörper

Für die Validierung der Rechenvorgänge (Simulation der Schallausbreitung, Laufzeitberechnung, iterative Suche der Eigenschaften) wurden folgende Testkörper mit künstlich eingebrachten Materialfehlern ausgewählt (Abb. 58):

#### TK I

Der Testkörper ist in Rahmen des IZFP-Projektes *Austenit II* [57] verwendet worden und wurde speziell für das Projekt im *Welding Institute (Cambridge, England)* hergestellt. Der Testkörper besteht aus zwei Schichten Grundmaterial und einer Schicht Schweißgut (Breitspaltschweißnaht, Werkstoff X8CrNi1910), wobei die Stengelkristalle senkrecht zur Plattennormale gezüchtet wurden. Die elastischen Eigenschaften des Schweißgutes wurden nach der Testkörperfertigung an-

hand drei verschiedener Verfahren (Impuls-Echo-Verfahren, Stab-Resonanzmessungen und Resonanzspektroskopie) ermittelt und miteinander verglichen [56].

Das Probestück enthält eine durchgehende Nut  $1.5 \times 13$  mm im Schweißgut.

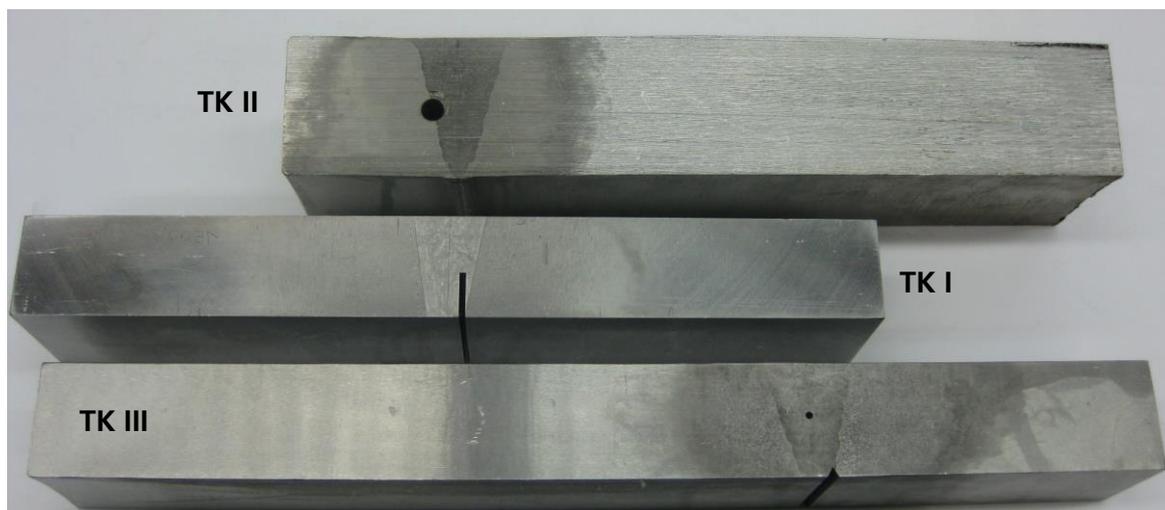
Der Dreischicht-Testkörper mit den ermittelten elastischen Konstanten ist für die Validierung der simulierten Schallausbreitung in einem anisotropen homogenen Medium sowie für die Validierung des GECDM-Algorithmus geeignet.

## TK II

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

## TK III

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



**Abb. 58: Geschweißte austenitische Testkörper mit eingebrachten künstlichen Fehlern**

Neben den Testkörpern mit künstlichen Fehlern wie Zylinderbohrungen und Nuten wurden für die Untersuchungen auch geschweißte austenitischen Testkörper mit realen Fehlern aus der Testkörperbibliothek der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart ausgewählt [88]. Die Testkörper weisen Spannungskorrosionsrisse im Grundwerkstoff und in der Wärme-Einfluss-Zone (WEZ) auf. Die tatsächlichen Größen, Lagen und Form der Fehler wurden anhand der Sicht- (Schliffbilder), Farbeindring- und Durchstrahlungsprüfung ermittelt.

Insgesamt sind mehr als 30 Testkörper mit den Schweißnähten verschiedener Bauform mittels des Sampling-Phased-Array-Verfahrens geprüft worden. In Abb. 59 sind drei von den getesteten austenitischen Testkörpern dargestellt.



Engspaltschweißnaht. Riss unten



V-Naht. Riss unten

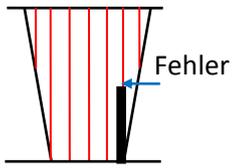
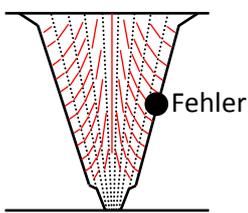
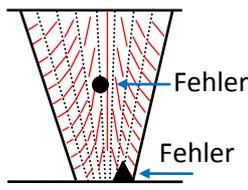


X-Naht. Risse oben und unten

**Abb. 59: Geschweißte Testkörper mit Spannungskorrosionsrissen.  
Austenitischer Werkstoff 1.4948 (X 6 Cr Ni 1810, 304 H)**

Die verwendeten Testkörper werden in der Tabelle 2 beschrieben. Unter bekannten elastischen Eigenschaften des Grundmaterials in der Tabelle versteht man, dass die Dicke des Testkörpers bekannt ist und dadurch die Schallgeschwindigkeit im Grundwerkstoff gemessen werden kann. Die Gefügestruktur der Testkörper wurde anhand der Schlibfbilder ermittelt.

**Tabelle 2: Zusammenstellung der verwendeten Testkörper**

Bezchn.	Werkstoff	Gefüge / vorh. Fehler	Elast. Eigensch.		Bestimmungszweck
			GW	SN	
TK I	X8CrNi1910		+	+	Validierung der Schallausbreitungssimulation für den Fall „isotrop“-„anisotrop homogen“-„isotrop“. Validierung der iterativen GECDM (durch Vergleich der Ergebnisse mit tatsächlichen Werten).
TK II	unbekannt		+	-	Validierung der Schallausbreitungssimulation für den Fall „isotrop“-„anisotrop inhomogen“-„isotrop“. Nachweis der Funktionalität des GECDM-Algorithmus.
TK III	unbekannt		+	-	Validierung der iterativen Suche GECDM
TK A TK B TK C	X6CrNi1810	Schweißnähte verschiedener Bauform mit inhomogener anisotroper Gefügestruktur und realen Spannungskorrosionsrissen.	+	-	Nachweis der Funktionalität der SPA-Methode mit inverser Phasen Anpassung an realen Fehlern durch Vergleich der Ultraschall-Ergebnisse mit den Schliiffbildern: quantitative Aussage über die Lage, Abmessungen und Form der rissartigen Fehler.
Legende: GW – Grundwerkstoff, SN – Schweißnaht, +/- bekannt oder messbar / unbekannt					

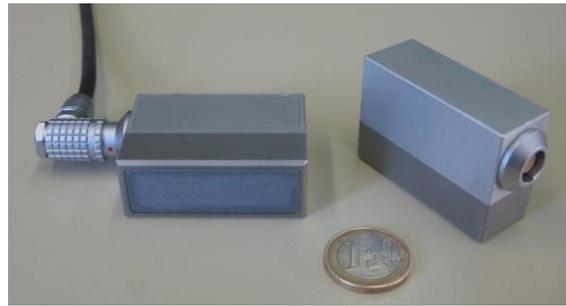
## 7.2 Auswahl der Prüfköpfe

Ultraschallmessungen und Prüfexperimente im Laufe des Projektes wurden mit handelsüblichen Phased Array Prüfköpfen von Firmen „Sonaxis“ und „Olympus NDT“ durchgeführt (Abb. 60 links).

Für die Schrägeinschallung wurden Vorlaufkeile sowohl für die longitudinale (weiter: LW) als auch für transversale Wellen (weiter: 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. 60: Phased-Array-Ultraschallwandler**

Außerdem, wurden für die Messungen auch die Prüfköpfe verwendet, die speziell für die Ultraschall-Tomographie-Verfahren entwickelt worden sind (Abb. 60 rechts).

Die Elemente der Prüfköpfe sind weiter als auf die jeweils angeregte Wellenlänge voneinander entfernt (ca.  $1.7 \lambda$  für die Longitudinal-Welle bzw.  $3 \lambda$  für die Transversal-Welle im Stahl). Die Anwendung der verteilten Aperturen führt, wie schon in Kapitel 4.2 hervorgehoben, zur Erhöhung des Auflösungsvermögens bei der Rekonstruktion der Prüfergebnisse nach dem SPA-Prinzip.

Die verwendeten Prüfköpfe besitzen integrierte Plexiglaskeile und sind für Schrägeinschallung vorgesehen. Der Hersteller von den Prüfköpfen mit verteilten Aperturen ist die Firma „Acoustic Control Systems“ (Moskau, Russland) [89].

Die Kennwerte der für die Ultraschallmessungen verwendeten Ultraschallwandler sind in Tabelle 3 aufgeführt.

**Tabelle 3: Parameter der Ultraschallwandler**

Sensorbezeichnung	Prüffrequenz, 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

### 7.3 Aufbau des Systemprototyps

Die beschriebene Sampling-Phased-Array-Technik wird durch spezielle Hardware- und Softwaremodule realisiert. Die Ultraschall-Hardware besteht aus folgenden Modulen (Abb. 61):

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

Das Prüfobjekt wird mittels eines Dreiaachsen-Manipulators abgetastet. Die ortsbezogene Datenaufnahme wird 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) durchzuführen.

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

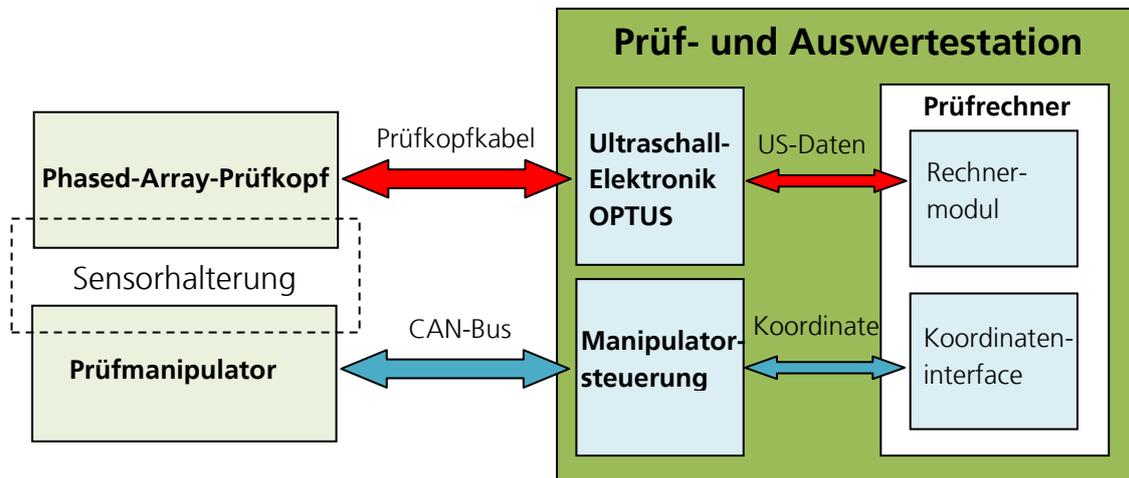


Abb. 61: Blockschaftbild des Ultraschallprüfsystems

### 7.3.1 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 in Abb. 62 dargestellte Prüf- und Auswertestation ist ein moderner, leistungsstarker Industrierechner, in dem der Rechnermodul integriert wird und der eine schnelle Rekonstruktion der Ultraschallprüfergebnisse ermöglicht. 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. 62: 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. Sämtliche Ultraschalldaten werden mit ihrer Ortsposition abgespeichert, so dass sowohl zweidimensionale Projektionsbilder als auch ein dreidimensionales Volumenbild erstellt werden können.

### 7.3.2 „Sampling Phased Array“-Ultraschallelektronik OPTUS

Das Ultraschall-Frontend OPTUS (Abb. 63) 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. Die OPTUS-Elektronik erfüllt alle Anforderungen der EN-12668-1 „Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung - Teil 1: Prüfgeräte“ [90]. Die technischen Daten der OPTUS-Elektronik sind in der Anlage 2 zu entnehmen.



**Abb. 63: Ultraschall-Elektronik-Frontend OPTUS**

### 7.3.3 Dreiachsen-Prüfmanipulator

Abb. 64 zeigt das Prüfsystem mit einem 3-Achsenmanipulator sowie mit speziellen doppelkardanischen Sensorhalterungen für die Ultraschallprüfung an leicht gekrümmten Oberflächen.



**Abb. 64: 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 Tauch- als auch in Kontakttechnik. Die Information über die aktuelle Prüfkopfposition wird während der Prüfung von dem Koordinateninterface in Echtzeit ausgelesen und an die OPTUS-Steuerung sowie das Rekonstruktionsmodul übermittelt.

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

Die Prüfsoftware des Ultraschallprüfsystems beinhaltet die Module zur Steuerung der einzelnen Hardwarekomponenten (US-Elektronik, Manipulatorsteuerung, Koordinateninterface) im manuellen und automatischen Betrieb. Sie übernimmt die Kontrolle über den Gesamtprüfprozess sowie die Parametrisierung der 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, wobei die akustischen Wellen sich 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. So erfolgt die Rekonstruktion der zwei- und dreidimensionalen Ergebnisbilder auch in Echtzeit. Die gespeicherten Prüfergebnisse können nach Abschluss der Prüfung geladen und dargestellt werden.

Die Kommunikation zwischen den Softwaremodulen während der Prüfung von austenitischen Schweißnähten ist in der Abb. 65 dargestellt.

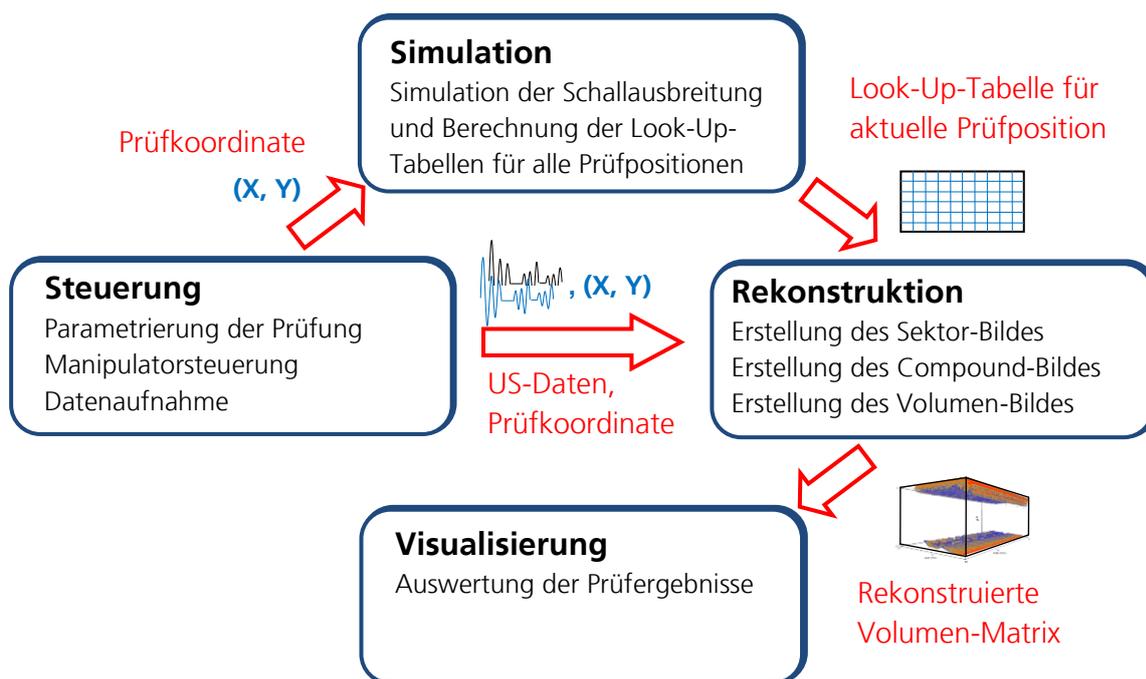


Abb. 65: Kommunikation der Softwaremodule

Die Besonderheit der Prüfsoftware ist ihre Fähigkeit, die gemessenen Ultraschalldaten während der Messung, d. h. on-line, dreidimensional darzustellen (Abb. 66).

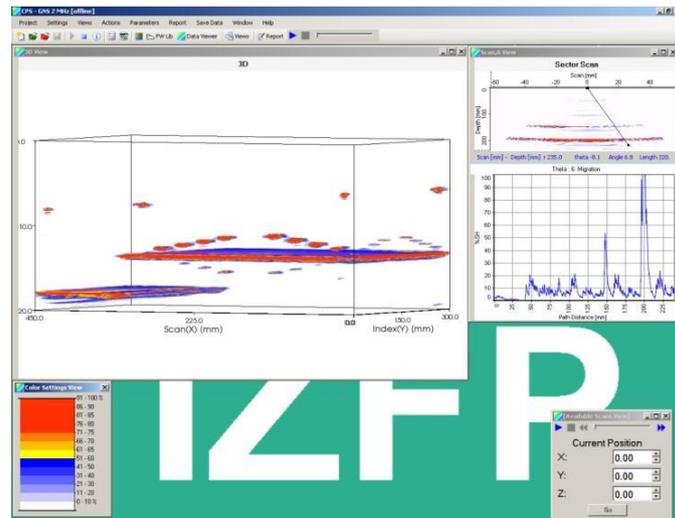


Abb. 66: 3D-Visualisierung der US-Prüfergebnisse im Sampling Phased Array Betrieb mit der Prüf- und Auswertungssoftware des Fraunhofer-IZFP

## 7.5 Durchführung der Messungen und die Rekonstruktion der Ergebnisbilder

An den ausgewählten Testkörpern wurden die Prüfköpfe mittels des 3-Achsen-Manipulators quer zur Schweißnaht verfahren (Abb. 67). Die Einschallrichtung wurde aus Sicht der Algorithmen-Validierung so ausgewählt, dass das Schallbündel den größten Teil des anisotropen inhomogenen Schweißgutes erfasst.

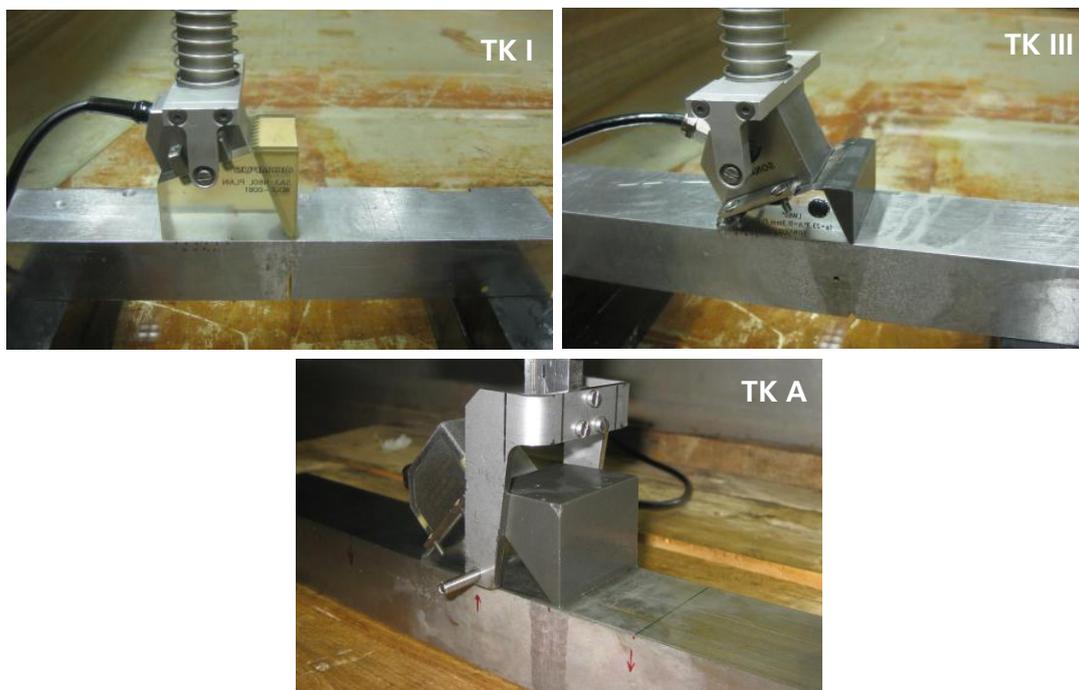
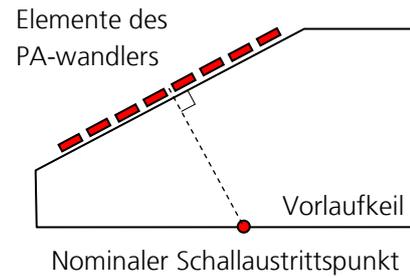


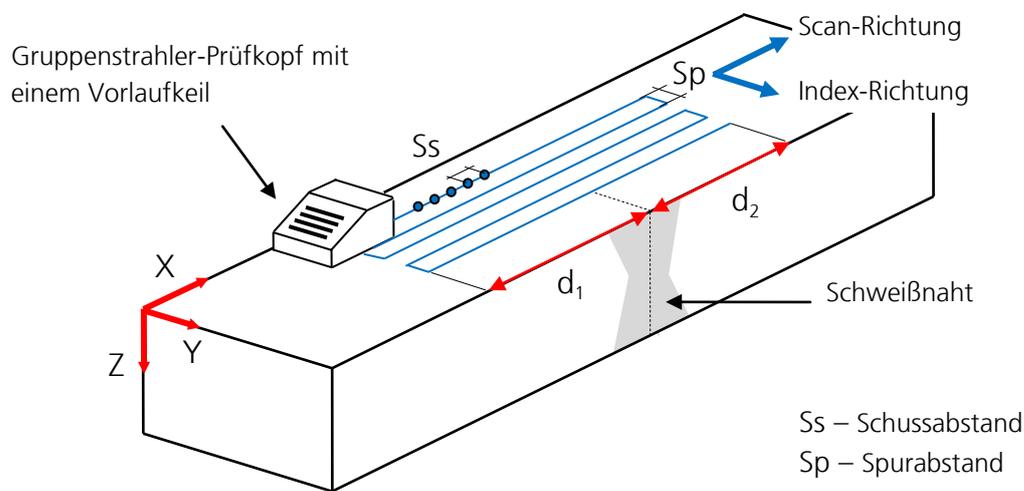
Abb. 67: Abtasten der austenitischen Testkörper

Der Abstand zwischen dem nominalen Schallaustrittspunkt des Prüfkopfs und der Schweißnahtmitte liegt zwischen 0 und 35 mm. Als nominaler Schallaustrittspunkt des Gruppenstrahler-Wandlers dient die Projektion der Aperturmitte unter dem Nominalwinkel des Keiles auf die Kontaktfläche (Abb. 68).

Mit einem Schussabstand von 1 mm und einem Spurbabstand von 2 mm wurden die Ultraschalldaten nach dem Sampling-Phased-Array-Prinzip aufgenommen (Abb. 69).



**Abb. 68: Nominaler Schallaustrittspunkt des Phased-Array-Prüfkopfes**



**Abb. 69: Schematische Abbildung der Prüfpositionen**

Zur Rekonstruktion der Ergebnisbilder wurden für alle Testkörper die entsprechenden Modelle der Schweißnahtgefüge erstellt, die anhand der Schliiffbilder ermittelt wurden.

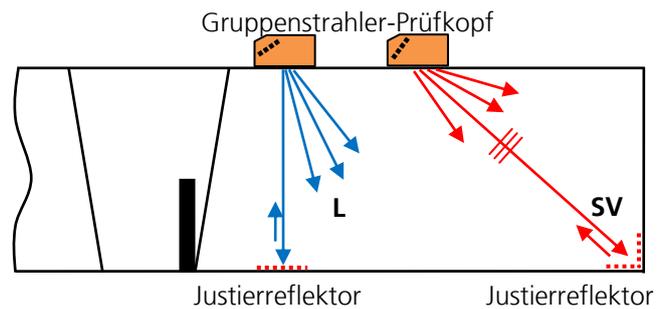
Für alle Messpositionen wurde die Simulation der Schallausbreitung durchgeführt, die Look-Up-Tabelle mit den Laufzeiten von jedem Prüfkopfelement zu jedem Volumenpunkt berechnet und die entsprechenden Sektor-Bilder rekonstruiert. Die Sektor-Bilder sind anschließend in einem Compound-B-Bild überlagert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

An den Testkörpern mit künstlichen Fehlern (TK I – TK III) wurden die elastischen Konstanten nach der GECDM-Methode (siehe Kapitel 5) bestimmt. Für eine ausgewählte Messposition wurde die Simulation der Schallausbreitung 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 die iterative Anpassung der elastischen Eigen-

schaften genutzt. Die Prozedur wurde für andere Messpositionen wiederholt und die Ergebnisse von zwei Suchvorgängen wurden miteinander verglichen (beim Testkörper TK I - auch mit den vorher ermittelten Werten [56]). Die Erstellung der Ergebnisbilder wurde unter Nutzung der optimierten elastischen Konstanten durchgeführt.

An Testkörpern mit realen Fehlern (TK A – TK C), wobei die rissförmigen Reflektoren ausgedehnt sind und für die iterative Anpassung der elastischen Eigenschaften (GECDM, siehe Kapitel 6) nicht benutzt werden können, wurden die elastischen Konstanten festgelegt. Diese Testkörper sind aus dem Werkstoff 1.4948 (X 6 CrNi 1810) hergestellt. Für die Simulation der Schallausbreitung wurden die elastischen Konstanten des ähnlichen Werkstoffes 1.4301 (X 5 CrNi 1810) angenommen, die im Rahmen des Forschungsprojektes Austenit-I [56] ermittelt wurden:  $C_{11}=241$  GPa,  $C_{13}=138$  GPa,  $C_{33}=240$  GPa,  $C_{44}=112$  GPa,  $C_{66}=72$  GPa,  $\rho=7820$  kg/m<sup>3</sup>.

Für die Simulation der Schallausbreitung ist neben der Gefügestruktur und den elastischen Konstanten der Naht auch die Schallgeschwindigkeit im Grundwerkstoff notwendig. Weil die Geometrie (u. a. die Wanddicken) der Testkörper bekannt ist, wurden für die Ermittlung der Schallgeschwindigkeit das Rückwandecho (für die longitudinale Welle) beziehungsweise das Kantenecho der Testkörper (Winkelspiegeleffekt für die transversale Welle) zur Justierung genutzt (Abb. 70). Die gemessenen Werte der Schallgeschwindigkeit im Grundwerkstoff für die Testkörper sind in der Tabelle 4 zusammengestellt.



**Abb. 70: Justierung der Schallgeschwindigkeit der Longitudinal- und der Transversalwelle im Grundwerkstoff des austenitischen Testkörpers**

**Tabelle 4: Gemessene Schallgeschwindigkeitswerte der akustischen Wellen im Grundmaterial**

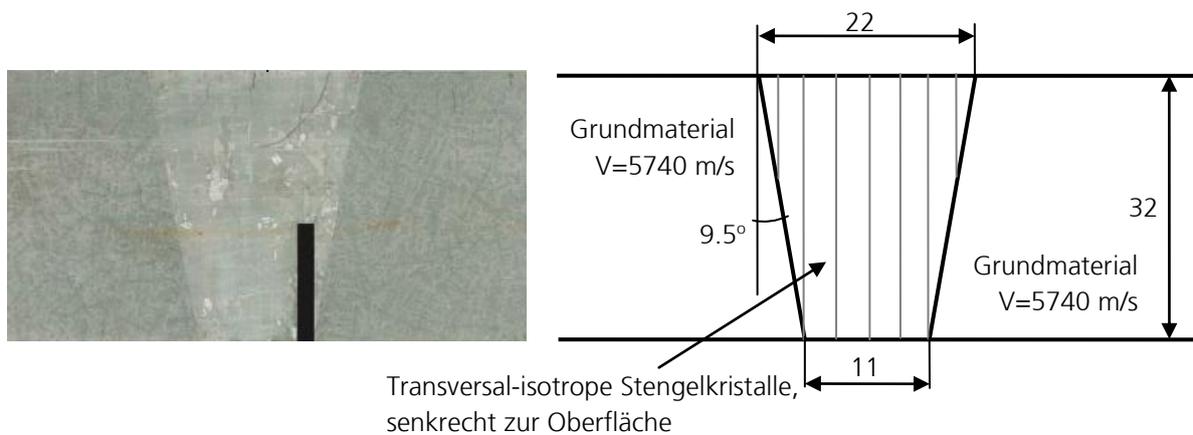
Pos.	Kennzeichnung	Wanddicke	Schallgeschwindigkeit der Longitudinal-Welle	Schallgeschwindigkeit der Transversal-Welle
1.	TK I	32.0 mm	5740 m/s	3400 m/s
2.	TK II	40.0 mm	5680 m/s	3320 m/s
3.	TK III	32.0 mm	5640 m/s	3300 m/s
4.	TK A	32.0 mm	5740 m/s	3400 m/s
5.	TK B	32.0 mm	5700 m/s	3320 m/s
6.	TK C	34.5 mm	5720 m/s	3300 m/s

## 7.6 Prüfergebnisse an einer austenitischen Schweißnaht mit künstlichen Fehlern

### 7.6.1 Schweißnaht mit homogener Struktur (3-Schicht-Modell)

#### Beschreibung des Testkörpers

Der Testkörper TK I enthält eine Breitspaltschweißnaht mit senkrecht zur Oberfläche verlaufenden Stengelkristallen. Die gemessene Schallgeschwindigkeit im isotropen Grundmaterial betrug 5740 m/sec. In die Schweißnaht ist eine künstliche Nut 1.5×13 mm eingebracht (Abb. 71, links).



**Abb. 71: Das Schlibbild und angenommenes Modell des Testkörpers TK I**

Da alle Stengelkristalle in der Schweißnaht gleich orientiert sind, kann sie als ein 3-fach geschichteter Werkstoff betrachtet werden. Das entsprechende Modell wird in Abb. 71 rechts dargestellt. Als Ausgangswerte für die GECD-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/m<sup>3</sup>.

Mittels der GECDM wurden dann die elastischen Konstanten für zwei Prüfpositionen ermittelt und miteinander verglichen. Als Referenzreflektor für den Suchvorgang wurde die Deckfläche der künstlichen Nut verwendet. Die Ergebnisse der GECDM (wobei der 5 MHz –Phased-Array-Prüfkopf von Fa. Olympus, quasilongitudinale Welle, Nominalkeilwinkel  $20^\circ$ , Nominalbrechungswinkel im C-Stahl  $60^\circ$  verwendet wurde) für beide Messpositionen sind in der Tabelle 5 zusammengestellt.

**Tabelle 5: Ergebnisse des GECDM-Suchvorganges im Vergleich mit anderen Messverfahren**

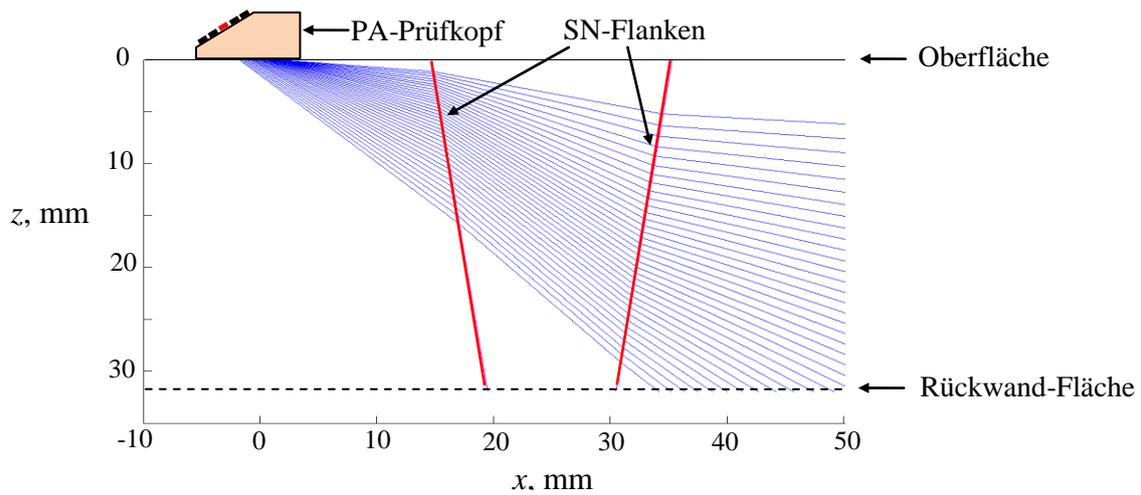
Elastische Konstante	Im Rahmen des Forschungsprojektes [56] ermittelten Werte, GPa		Nach der GECDM ermittelten Werte, GPa (Toleranz der Suche 0.5 GPa)	
	Impuls-Echo und Resonanzmessungen	Akustische Resonanzspektroskopie	Abstand 25 mm von der SN-Mitte	Abstand 35 mm von der SN-Mitte
$C_{11}$	229.6	221.1	225	223.5
$C_{13}$	141.4	128.1	132.5	135
$C_{33}$	217.4	217.4	215	216.5
$C_{44}$	118.5	118.5	118	121
$C_{66}$	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 irrelevant.

Aus der Tabelle 5 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) bestätigt.

Basierend auf den ermittelten elastischen Konstanten und auf 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.

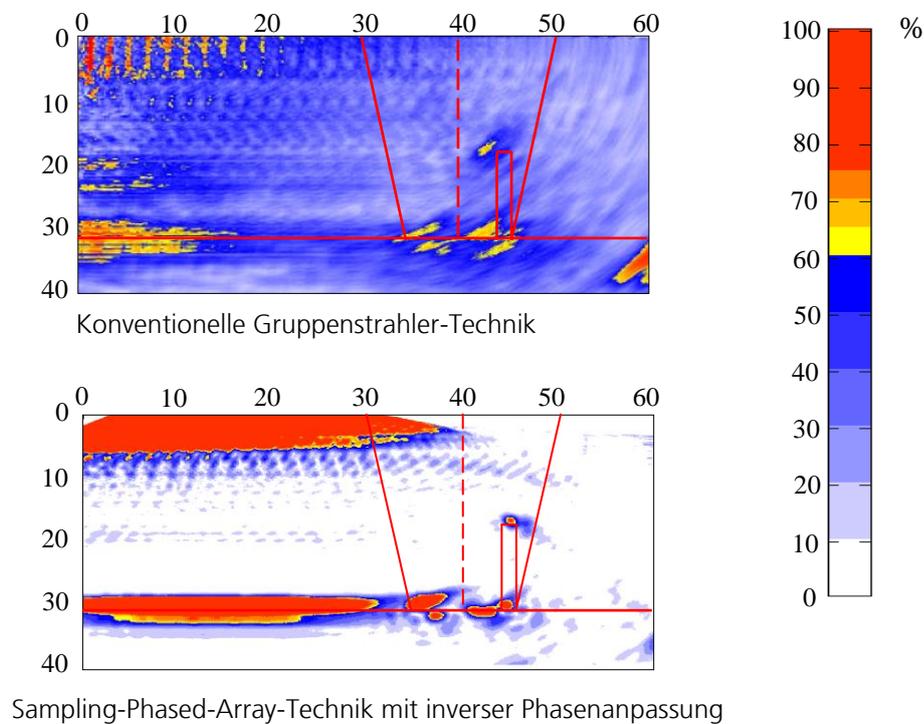
Da die Schweißnaht als ein 3-Schicht-Werkstoff angenommen ist, wobei jede Schicht als transversal-isotrop betrachtet wird, entsteht die Schallbrechung nur an den Schweißnahtflanken. Innerhalb des Grundmaterials und des Schweißgutes breiten sich die Strahlen linear aus (Abb. 72).



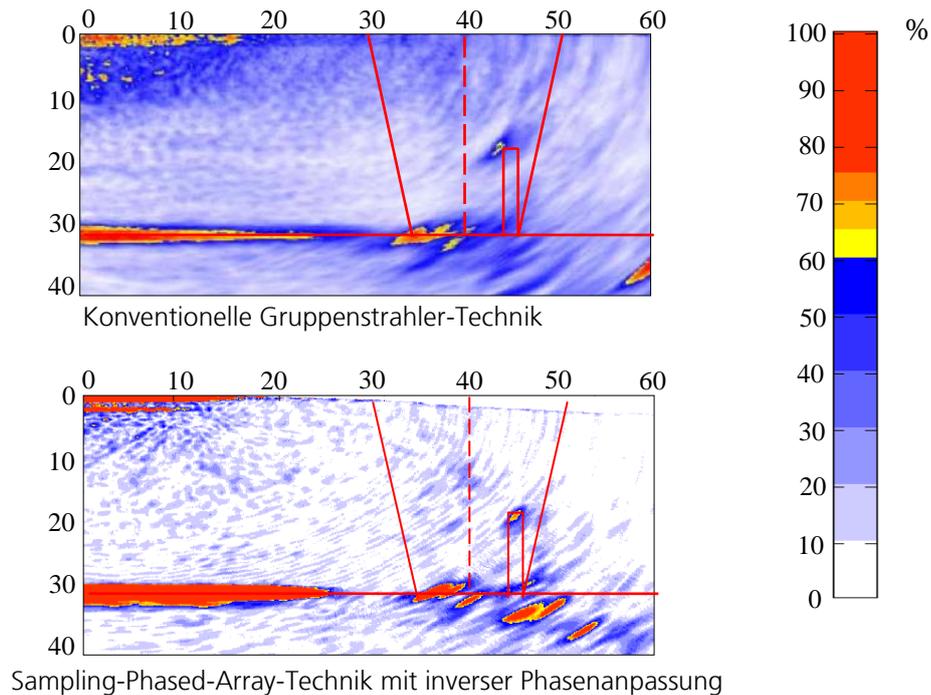
**Abb. 72: Ray-Tracing-Simulation der Ausbreitung der quasilongitudinalen Welle im Testkörper TK I.**

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. 73 und Abb. 74 werden die Prüfergebnisse der SPA-Technik mit inverser Phasen Anpassung in Form der Compound-B-Bilder im Vergleich mit den Ergebnissen der konventionellen Gruppenstrahler-Technik dargestellt.



**Abb. 73: Compound-B-Bilder vom Testkörper TK I. Prüfpositionen 0-40 mm von der SN-Mitte. Prüfkopf: Sonaxis ME16-LMP4, 3.5 MHz, Elementabstand 1.3 mm, Vorlaufkeil 60 LW**



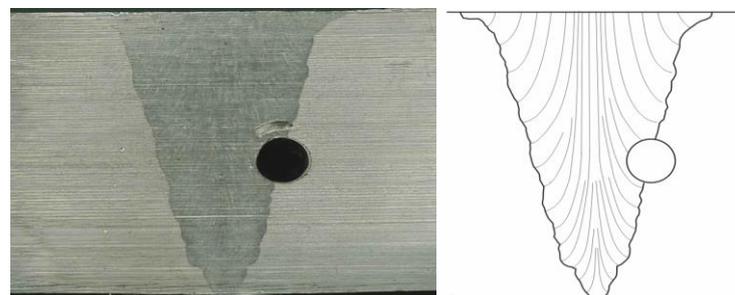
**Abb. 74: Compound-B-Bilder vom Testkörper TK I. Prüfpositionen 0-40 mm von der SN-Mitte. Prüfkopf: Olympus 5L16-A3, 5 MHz, Elementabstand 1.2 mm, Vorlaufkeil 60 LW**

## 7.6.2 Schweißnaht mit inhomogener Struktur (Mehr-Schicht-Modell)

### Beschreibung des Testkörpers

Der Testkörper TK II enthält eine V-förmige Breitspaltschweißnaht. Die gemessene Schallgeschwindigkeit im isotropen Grundmaterial betrug 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. 75). In die Schweißnaht ist eine zylindrische Bohrung  $\varnothing 6\text{mm}$  eingebracht.

Die Schweißnaht im Testkörper TK II wird als ein 9-fach geschichteter Werkstoff betrachtet. Das entsprechende Modell wird in Abb. 76 dargestellt.

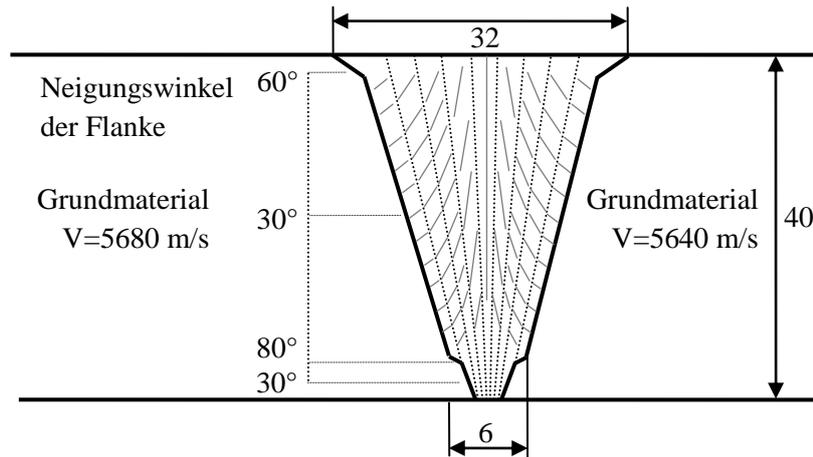


**Abb. 75: Das Schlibbild (l.) und die Konturen der Stengelkristalle (r.) vom Testkörper TK II**

Als Ausgangswerte für die GECDM wurden die Eigenschaften des austenitischen Monokristalls X8CrNi1910 angenommen, die in Rahmen der vorherigen F&E-Projekte [56, 57] zerstörender-

weise bestimmt wurden:  $C_{11}=263$  GPa,  $C_{13}=145$  GPa,  $C_{33}=216$  GPa,  $C_{44}=129$  GPa, Dichte  $8100$  kg/m<sup>3</sup>. Als Referenzreflektor für den Suchvorgang wurde die Zylinderbohrung verwendet und als Datensatz wurden die Ultraschalldaten angenommen, welche mittels eines 5 MHz PA-Prüfkopfes von Fa. Olympus (quasilongitudinale Welle, Elementabstand 1.2 mm, Nominalbrechungswinkel im C-Stahl 60°) ermittelt wurden.

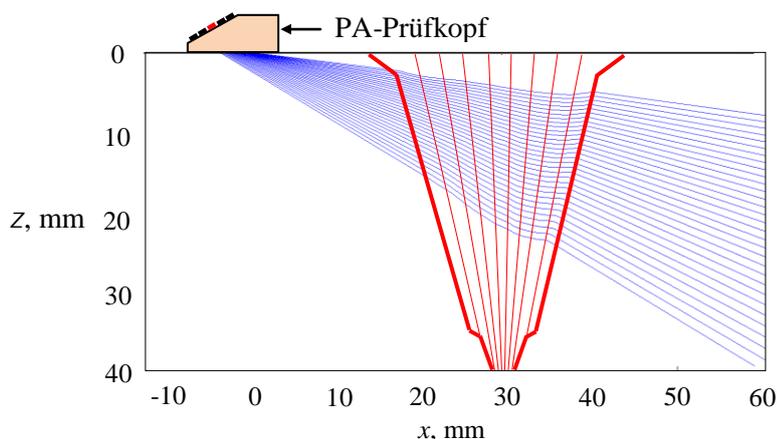
Mittels der GECDM wurden dann folgende Werte der Steifigkeitsmatrix für den Testkörper TK II ermittelt:  $C_{11}=318$  GPa,  $C_{13}=122.5$  GPa,  $C_{33}=167$  GPa,  $C_{44}=105$  GPa.



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

**Abb. 76: Das angenommene Modell des Testkörpers TK II**

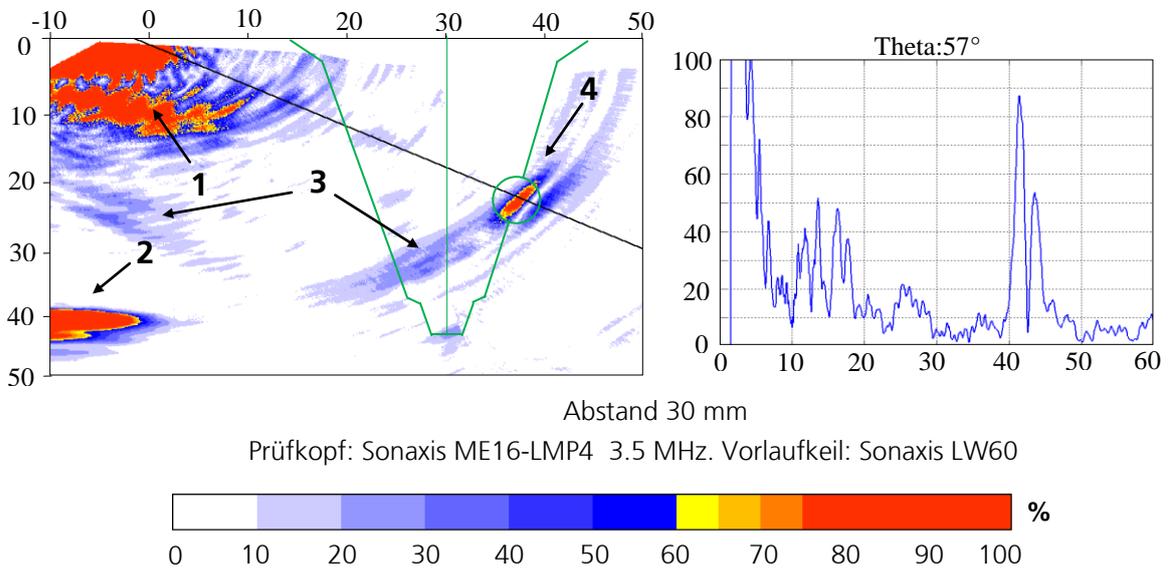
Die simulierte Schallausbreitung vom mittleren Element des PA-Prüfkopfes für die auf 30 mm von der SN-Mitte entfernte Prüfposition ist in Abb. 77 dargestellt. Die mehrfache Brechung an Zonengrenzen führt zur Schalbündelbeugung.



**Abb. 77: Ray-Tracing-Simulation der Schallausbreitung (qL-Welle) im Testkörper TK II**

Die Einkopplfläche des Testkörpers ist zweidimensional gekrümmt, was während des Abtastens zu Ankopplungsverlusten führt. Deswegen wurde die Messung am TK II nur in einer Prüfposition

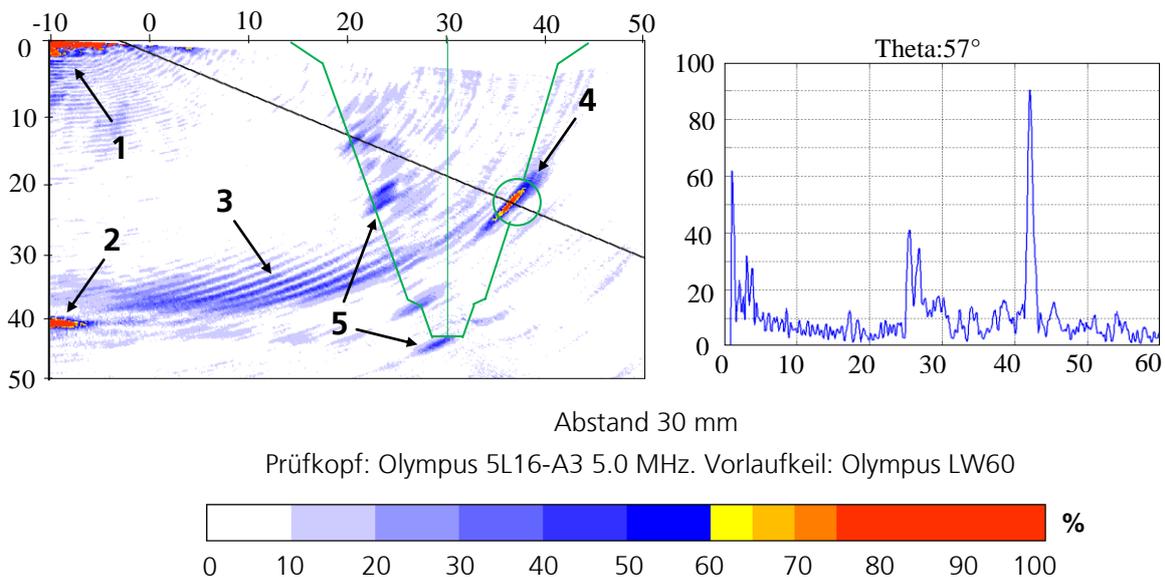
durchgeführt. In Abb. 78 - Abb. 79 werden die Prüfergebnisse der SPA-Technik mit inverser Phasenanpassung in der Form der rekonstruierten Sektor-Bilder und entsprechenden A-Bilder dargestellt.



**Abb. 78: Sektor- und A-Bild vom Testkörper TK II, 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 Signalen von der vorderen Schweißnahtflanke.



**Abb. 79: Sektor- und A-Bild vom Testkörper TK II, rekonstruiert nach dem SPA-Prinzip mit inverser Phasenanpassung. Prüffrequenz 5 MHz, quasilongitudinale Welle**

In Abb. 79 erkennt man, dass sich das Auflösungsvermögen des SPA-Verfahrens mit der Frequenzsteigerung verbessert. Noch dazu reduziert sich die Sendeimpuls-Einfluss-Zone, die mit der Impulslänge in Zusammenhang steht. Andererseits, nimmt bei höheren Frequenzen der Pegel der von den Stengelkristallen rückgestreuten Signale zu (der hellblau Bereich zwischen den SN-Flanken in der Abbildung 79).

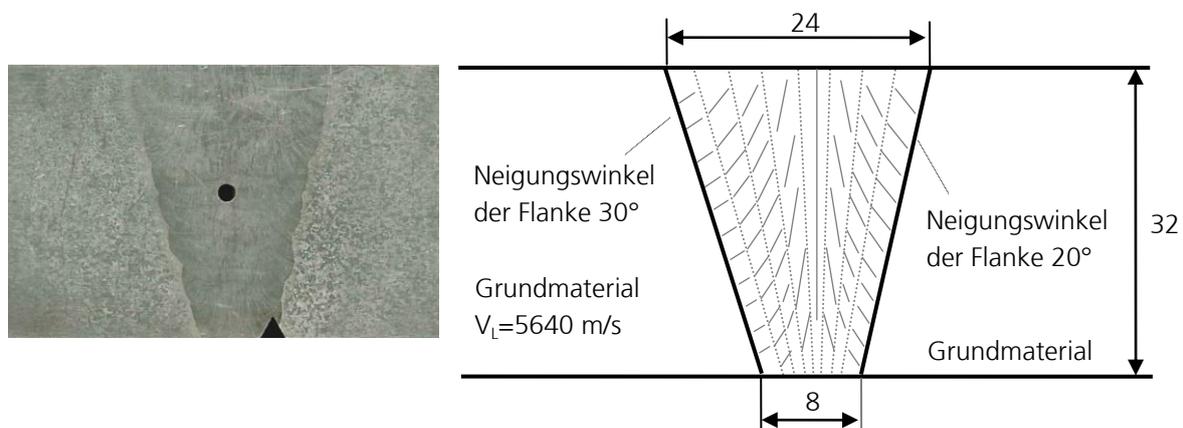
Anhand des Testkörpers TK II wurde der Algorithmus der iterativen Phasenanpassung sowie die iterative Suche der elastischen Konstanten für ein inhomogenes anisotropes Medium validiert: der künstliche Reflektor (Bohrung) wird in der Abbildung ortsgetreu dargestellt, die entsprechende Anzeige besitzt maximale Amplitude und Schärfe.

### 7.6.3 Schweißnaht mit inhomogener Struktur und zwei Fehlern

#### Beschreibung des Testkörpers

Der Testkörper TK III 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 durchgehend eine zylindrische Bohrung  $\varnothing 2\text{mm}$  und eine Dreiecks-Nut  $2.5 \times 3\text{mm}$  eingebracht (in Abb. 80, links).



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

**Abb. 80: Das Schlichtbild und angenommene Modell des Testkörpers TK III**

Die Schweißnaht im Testkörpers TK II wird als ein 8-fach geschichteter Werkstoff betrachtet. Das entsprechende Modell ist in Abb. 80, rechts dargestellt.

Als Startwerte für die GECDM wurden die elastischen Eigenschaften des austenitischen Monokristalls X8CrNi1910 [56, 57] 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  $8100 \text{ kg/m}^3$ .

Anhand der GECDM mit einer Suchtoleranz von 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.

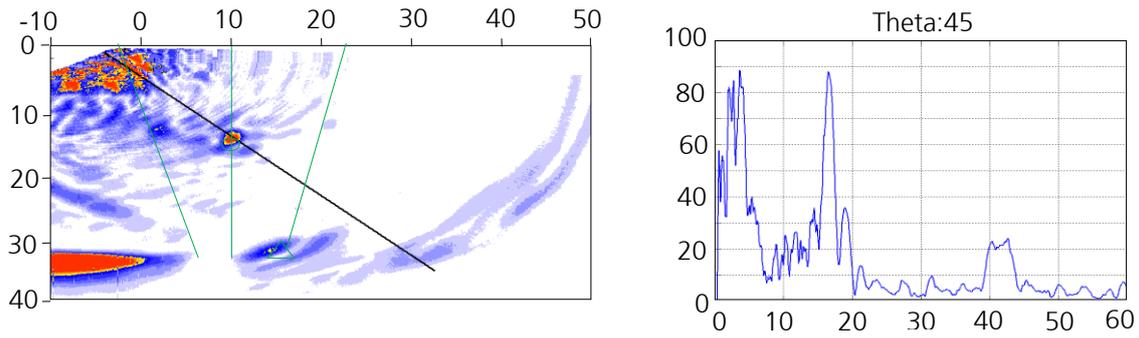
Die Ergebnisse der GECDM (5 MHz PA-Prüfkopf von Fa. Olympus, quasilongitudinale Welle, Nominalbrechungswinkel im C-Stahl  $60^\circ$ ) sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

**Tabelle 6: Ergebnisse des GECDM-Suchvorganges [GPa] am Testkörper TK III**

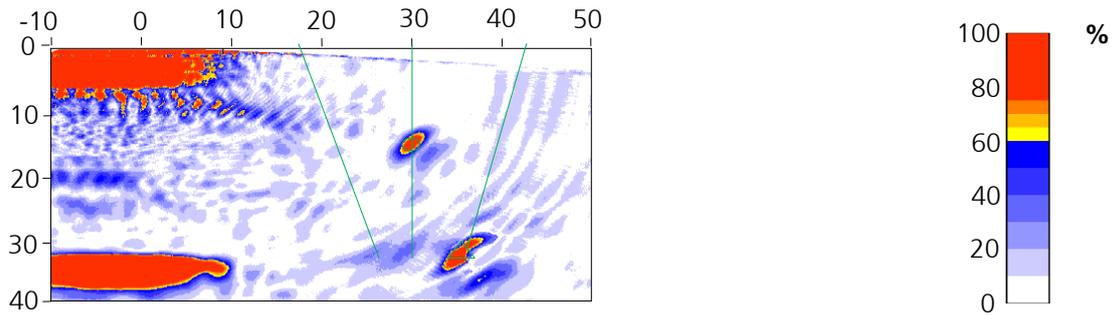
Elastische Konstante	Prüfposition 25 mm von der SN-Mitte		Prüfposition 35 mm von der SN-Mitte	
	Bohrung	Dreieck-Nut	Bohrung	Dreieck-Nut
$C_{11}$	318	320	312	316
$C_{13}$	122.5	120	125	127
$C_{33}$	167	163	168.5	170
$C_{44}$	105	108.5	108	102

Die Prüfergebnisse der SPA-Technik mit inverser Phasen Anpassung sind in Abb. 81 und Abb. 82 dargestellt.

Anhand des Testkörpers TK III wurde bewiesen, dass die Ergebnisse der auf zwei unterschiedlichen Referenzreflektoren basierenden GECDM-Suchvorgänge 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.

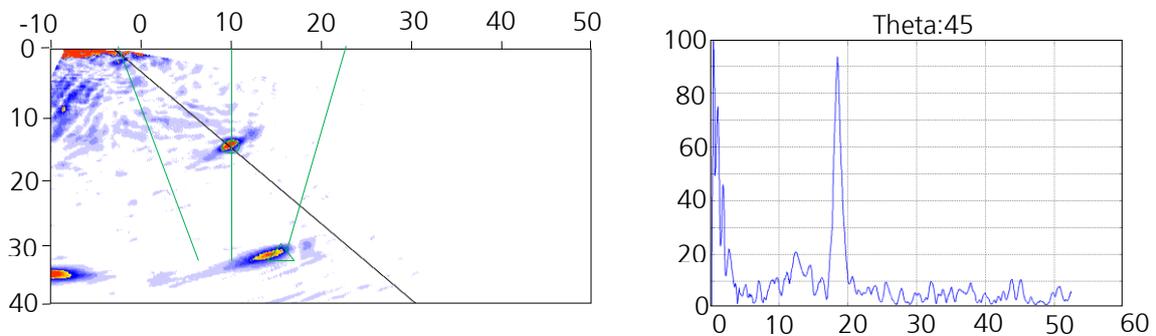


Sektor-Bild und A-Bild für die Prüfposition 10 mm von der SN-Mitte

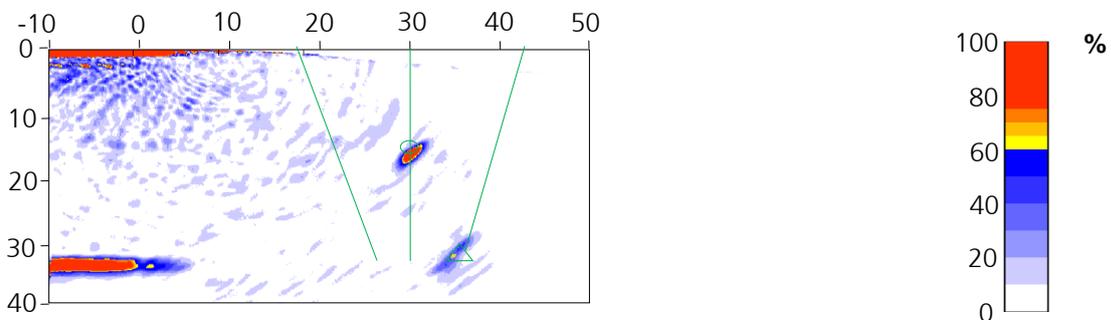


Compound-B-Bild für die Prüfpositionen -10-30 mm von der SN-Mitte

**Abb. 81: SPA-Prüfergebnisse vom Testkörper TK III.  
Prüfkopf: Sonaxis ME16-LMP4 3.5 MHz. Vorlaufkeil: Sonaxis LW60**



Sektor-Bild und A-Bild für die Prüfposition 10 mm von der SN-Mitte



Compound-B-Bild für die Prüfpositionen 20-40 mm von der SN-Mitte

**Abb. 82: SPA-Prüfergebnisse vom Testkörper TK III.  
Prüfkopf: Olympus 5L16-A3, 5.0 MHz. Vorlaufkeil: Olympus LW60**

## 7.7 Prüfergebnisse an einer austenitischen Schweißnaht mit realen Fehlern

Die Testkörper aus dem austenitischen Werkstoff 1.4948 (X 6 CrNi 1810) wurden aus der Bibliothek der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart ausgewählt. Sie besitzen Schweißnähte verschiedener Formen. In der Wärme-Einfluss-Zone sind Spannungskorrosionsrisse vorhanden.

Als das Ziel der SPA-Messungen an diesen Testkörpern wurde gefordert, die Fähigkeit der inversen Phasen Anpassung zu dokumentieren, die ausgedehnten Materialfehler orts- und formgetreu darzustellen und die Fehlerabmessungen maximal präzise zu bestimmen. Für die Erreichung des besseren Auflösungsvermögens wurden für die Messungen Prüfköpfe mit kleiner Wellenlänge ausgewählt: der 5 MHz –Prüfkopf 5L16-A3 von Olympus und die 4 MHz –Prüfköpfe mit verteilten Aperturen von ACSYS.

Für die Simulation der Schallausbreitung wurden anhand der Schliffbilder die entsprechenden Modelle der Gefügestruktur erstellt. Als elastische Eigenschaften der Stengelkristalle wurden die Konstanten des austenitischen Werkstoffes 1.4301 (X 5 CrNi 1810) festgelegt.

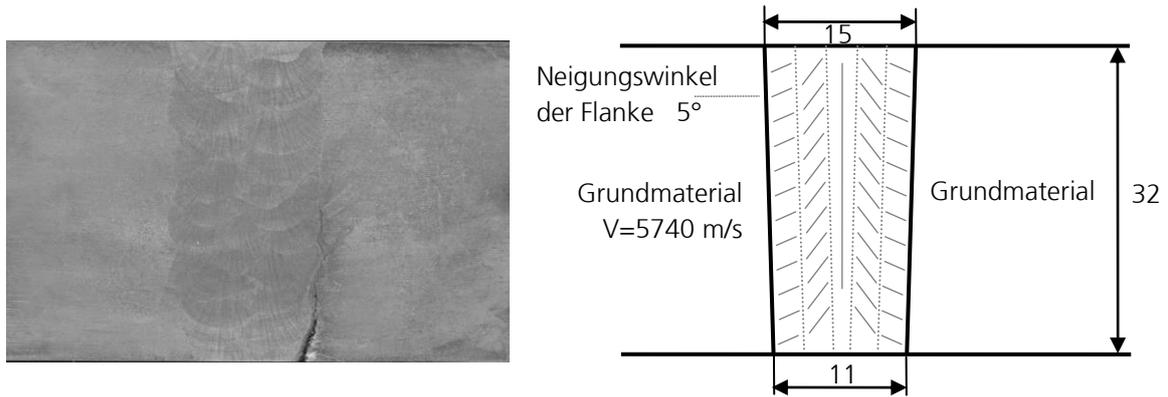
Aus dem Vergleich der Schliffbilder folgt, dass die Gefügestruktur an beiden Seiten der ausgewählten Testkörper ähnlich ist. Darüber hinaus wurde angenommen, dass die Anordnung der Stengelkristalle entlang der Naht als unveränderlich betrachtet werden kann. Andererseits, variieren die vorhandenen Spannungskorrosionsrisse sowohl in der Form als auch in der Ausdehnung.

Die durch die SPA-Technik ermittelten Größen, Lagen und Form der Fehler wurden mit den Ergebnissen der Schliffbilder und der Farbeindringprüfung verglichen. Man muss aber erwähnen, dass die beiden obengenannten ZfP-Verfahren Oberflächenverfahren sind. Die Fehlerform und – Ausdehnung kann nur an den Testkörperoberflächen ( $Y=0$  und  $Y=Y_{\max}$  in Abb. 69) bestimmt werden. Im Gegensatz dazu, können bei der Ultraschallprüfung die Ränder des Prüfobjektes nicht getestet werden, da der Ultraschallprüfkopf / Keil eine gewisse Breite hat. Die in den folgenden Abbildungen dargestellten Compound-B-Bilder von den Testkörpern TK A – TK C entsprechen daher der mittleren Schicht jedes Testkörpers ( $Y = 0.5 Y_{\max}$  in Abb. 69).

### 7.7.1 Testkörper mit einer Engspaltschweißnaht

Der Testkörper TK A enthält eine Engspaltschweißnaht. Die gemessene Schallgeschwindigkeit im isotropen Grundmaterial beträgt 5740 m/sec. Im Basismaterial in der Wärmeeinflusszone gibt es einen Spannungskorrosionsriss.

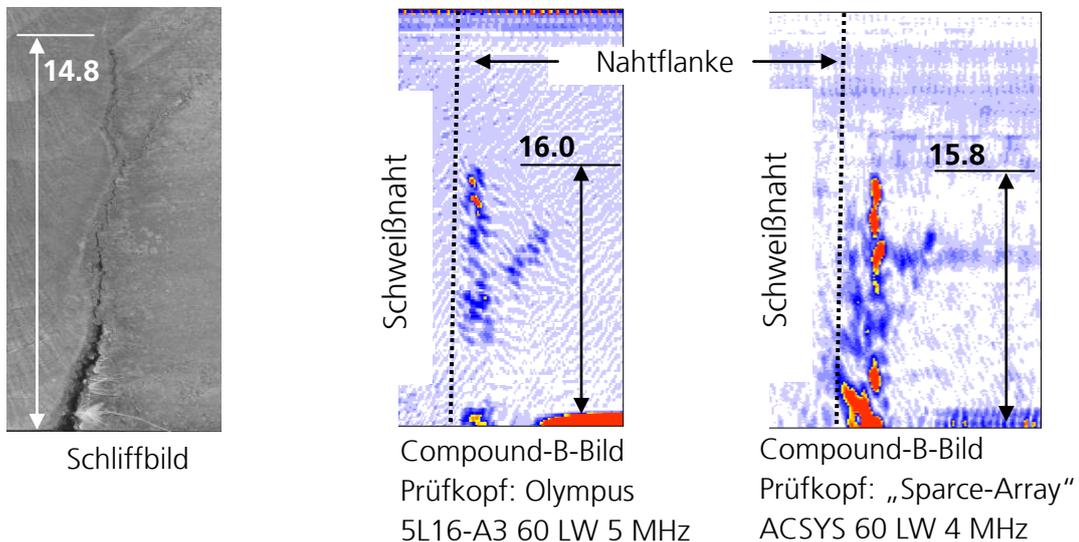
Das Schweißgut des Testkörpers wird als 5-fach geschichteter transversal-isotroper Werkstoff betrachtet (Abb. 83).



Orientierung der Stengelkristalle (v.l.n.r.):  $80^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $-80^\circ$

**Abb. 83: Schliffbild und angenommenes Modell des Testkörpers TK A**

Die Ergebnisse der Sampling-Phased-Array-Rekonstruktion mit inverser Phasen Anpassung zeigen, dass die Form des rekonstruierten Fehlers im Compound-B-Bild und in dem Schliffbild übereinstimmt (Abb. 84). Die Abweichung der ermittelten Tiefenausdehnung ist eine Folge davon, dass die Größe des Risses entlang der Schweißnaht variiert und die Bilder verschiedenen Stellen entsprechen. Das Schliffbild der Seitenansicht und das Ultraschallbild der Mitte des Testkörpers sind nicht identisch. Der aufgewiesene Unterschied ist jedoch vergleichbar mit der Wellenlänge.



**Abb. 84: Ergebnisse der SPA-Rekonstruktion eines Risses im Testkörper TK A im Vergleich mit seinem Schliffbild**

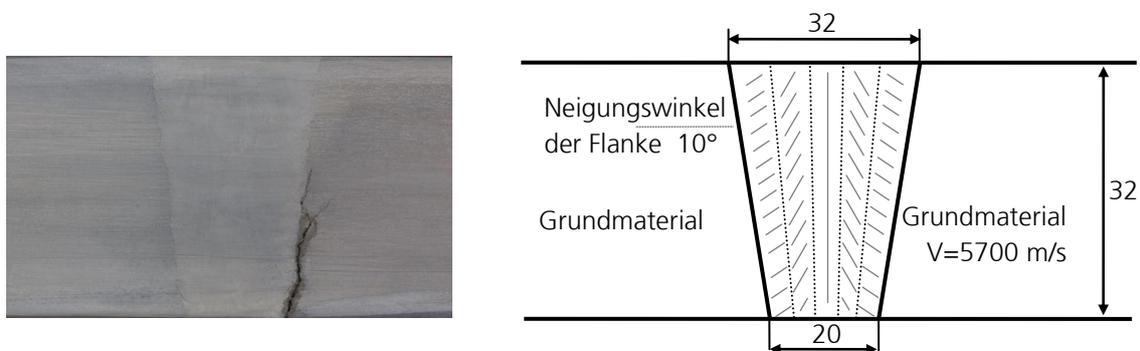
Das „Sparse Array“ von der Fa. „ACSYS“ weist das bessere Fokussierungsvermögen (Abb. 84 rechts) auf, als der konventionelle PA-Prüfkopf von der Fa. „Olympus“ (Abb. 84, Mitte).

## 7.7.2 Testkörper mit einer V-förmigen Breitspaltschweißnaht

Der Testkörper TK B enthält eine V-förmige Breitspaltschweißnaht. Die gemessene Schallgeschwindigkeit der longitudinalen Welle im isotropen Grundmaterial betrug 5700 m/sec. Im Basismaterial in der Wärmeeinflusszone gibt es einen Spannungskorrosionsriss von der unteren Seite des Testkörpers.

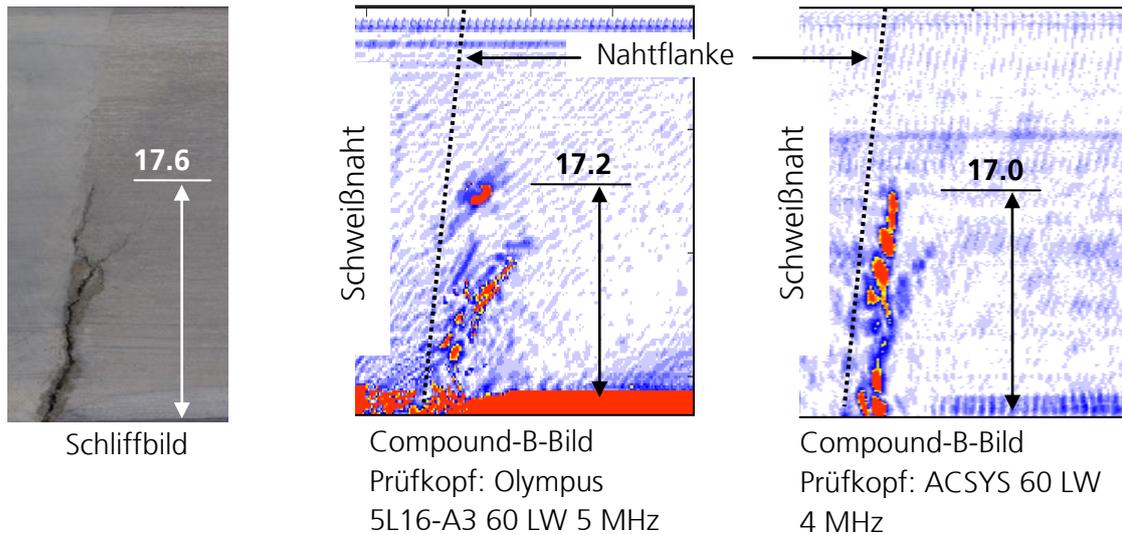
Das Schweißgut des Testkörpers wird als 5-fach geschichteter transversal-isotroper Werkstoff betrachtet (Abb. 85). Die Ergebnisse der Sampling-Phased-Array-Rekonstruktion sind in Abb. 86 dargestellt. In rekonstruierten Bildern kann man sehen, dass die Rückwandanzeige bei der Verwendung eines Arrays mit verteilten Aperturen (Abb. 85 rechts) im Vergleich zu konventionellem Phased-Array (Abb. 85 Mitte) eine deutlich geringere Amplitude besitzt.

Da die Elemente eines Sparse-Arrays relativ weit voneinander entfernt sind, empfangen sie die von einem Punktrefektor sich ausbreitenden Wellen unter einem breiteren Empfangswinkelbereich, als die Elemente eines konventionellen Phased-Array-Wandlers. Die Rückwand, als eine ausgedehnte Quelle der sekundären Wellen, weist bei der Reflektion der elastischen Wellen eine ausgeprägte Richtcharakteristik auf, die bei der Rekonstruktion eines Sektorbildes berücksichtigt werden sollte (siehe Abschnitt 8.1.1). Die Ultraschallbilder, die in diesem Kapitel dargestellt sind, wurden ohne Inbetrachtung der PA-Elemente-Richtcharakteristik rekonstruiert.



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

**Abb. 85: Das Schlifffbild und angenommene Modell des Testkörpers TK B**

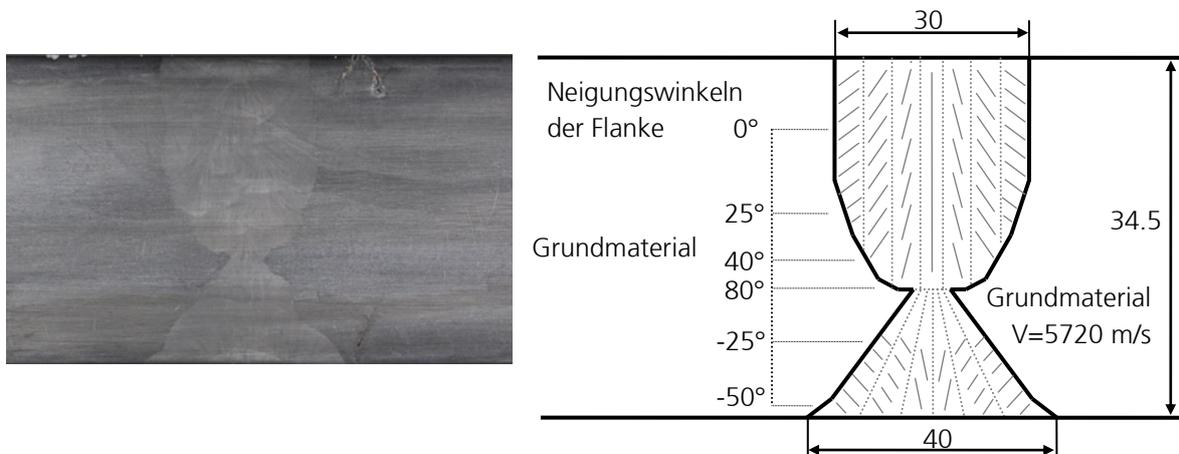


**Abb. 86: Ergebnisse der SPA-Rekonstruktion eines Risses im Testkörper TK B im Vergleich mit seinem Schliffbild**

### 7.7.3 Testkörper mit einer X-förmigen Breitspaltsschweißnaht

Der Testkörper TK C enthält eine X-förmige Breitspaltsschweißnaht. Die gemessene Schallgeschwindigkeit der longitudinalen Welle im isotropen Grundmaterial beträgt 5720 m/sec. Im Basismaterial in der Wärmeeinflusszone gibt es zwei Spannungskorrosionsrisse von der unteren und von der oberen Seite des Testkörpers ausgehend.

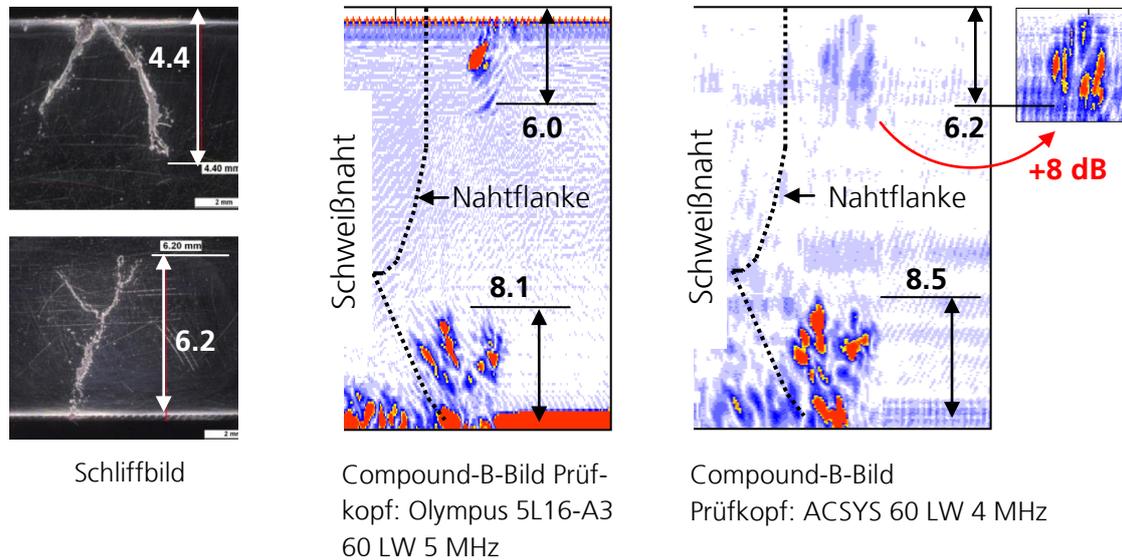
Das Schweißgut des Testkörpers besteht aus zwei Segmenten. Diese Segmente werden als 7-fach (oben) bzw. als 6-fach (unten) geschichteter transversal-isotroper Werkstoff (Abb. 87 rechts) betrachtet.



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. 87: Das Schliffbild und angenommenes Modell des Testkörpers TK C**

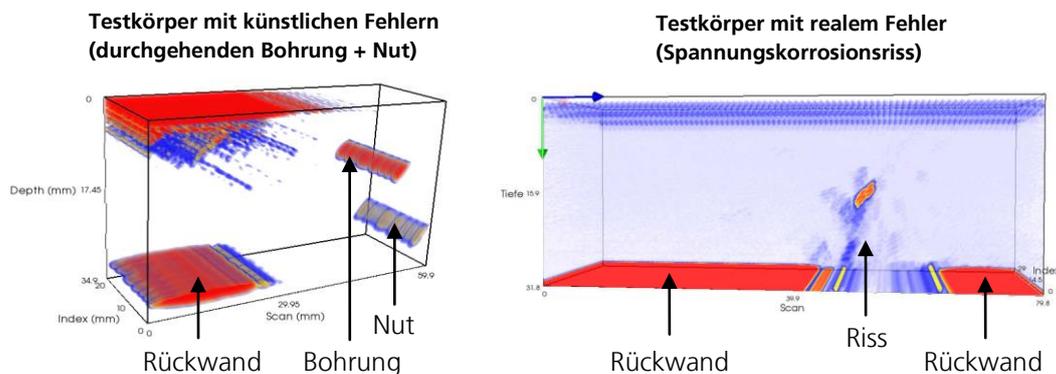
Die Ergebnisse der SPA-Rekonstruktion mit inverser Phasen Anpassung sind in Abb. 88 dargestellt. Die schwache Anzeige von dem oberen Riss, die für ein Array mit verteilten Aperturen rekonstruiert wurde (Abb. 88 rechts), ist wiederum die Folge der nichtberücksichtigten Richtcharakteristik der Wandler-Elemente. Der Riss wird aber durch die Multiplikation des Ultraschallbildes um den Offline-Verstärkungskoeffizienten  $K > 1$  nachweisbar (in Abb. 88 - +8 dB).



**Abb. 88: Ergebnisse der SPA-Rekonstruktion eines Risses im Testkörper TK C im Vergleich mit seinem Schliffbild**

### 7.8 Dreidimensionale Darstellung der Prüfergebnisse

Die rekonstruierten B-Bilder von verschiedenen Messspuren werden in einem Volumenbild zusammengestellt (Abb. 89). Die dreidimensionale Darstellung gestattet einen schnellen umfassenden Überblick der Prüfergebnisse mit gleichzeitiger vorläufiger Bewertung – schneller Aussage über Art, Lage und Anzahl der Fehler im Prüfobjekt sowie der annähernden Abschätzung ihrer Dimensionen. Die genaue Aussage über Lage, Form und Abmessungen des Fehlers sowie über seinen Verlauf im Raum erfolgt durch Benutzung von Projektionsbildern – B-, C- und D-Scans. Dreidimensionale Volumenbilder werden in Echtzeit rekonstruiert.



**Abb. 89: Beispiel der dreidimensionalen Darstellung von Ultraschallprüfergebnissen**



## 8. Mögliche Wege für die Weiterentwicklung der Technik der inversen Phasenanpassung

### 8.1 Weiterentwicklung der Ray-Tracing-Simulation und Bildrekonstruktion

#### 8.1.1 Berücksichtigung der Schallfeldenergieverteilung bei der Ultraschallbildrekonstruktion

Der in der vorliegenden Arbeit umgesetzte Ansatz der Ultraschallbildrekonstruktion nach dem Sampling Phased Array Prinzip impliziert keine Berücksichtigung der Energieverteilung des Schallfeldes sowie keine Beeinflussung der Schallfeldamplitude bei der Schallbrechung an den Grenzflächen.

Auch eine quasi-punktuelle Quelle wie das Element eines Phased Array Wandlers verfügt über eine bestimmte Richtcharakteristik. Die Intensitätsverteilung des Schallfeldes eines solchen Punktwandlers unter einem Winkel  $\alpha$  kann für die Longitudinal-Welle als  $\chi(\alpha) = \cos(\alpha)$  beschrieben werden [91].

Wird bei der Überlagerung der Schallfelder im Rekonstruktionsalgorithmus die Intensitätsverteilung berücksichtigt, verbessert sich die Qualität des rekonstruierten Bildes.

Weitere Faktoren, die die Energieverteilung der Ultraschallwelle beeinflussen, sind die Transmissionskoeffizienten bei der Brechung der akustischen Wellen an den Grenzflächen zwischen den Medien mit sich unterscheidenden elastischen Eigenschaften. Ein Transmissionskoeffizient stellt das Verhältnis der Intensität der die Grenzfläche transmittierten Welle zur Intensität der einfallenden Welle vor. Mit anderen Worten, beschreibt der Koeffizient die Schwächung der Welle, die während der Schallbrechung stattfindet. Den analytischen Ansatz für die Berechnung des Transmissionskoeffizienten in anisotropen Medien ist in *Connoly* [64] erläutert.

Bei der SPA-Rekonstruktion besteht die Möglichkeit der Berücksichtigung der Intensitätsabweichung der akustischen Welle im Pixel  $i, j$  in der Multiplikation ihrer Amplitude mit dem Kompensationskoeffizient  $K^{-1}$ :

$$B(i, j) = B(i, j) + A_{mm}(t) \cdot K^{-1} \quad K = \chi_m \cdot \chi_n \cdot \prod_{d=1}^S k_d \quad (65)$$

Hierbei sind  $\chi_m$  und  $\chi_n$  die Richtcharakteristiken des Senders  $m$  bzw. des Empfängers  $n$  unter dem Anregungs- / Empfangswinkel,  $k_d$  ist der Transmissionsfaktor an der  $d$ -ten von  $S$  getroffenen Grenzflächen.

### 8.1.2 Inbetrachtung weiterer Wellenmoden bei der Ultraschallbildrekonstruktion

Das vom Ultraschallwandler aufgenommene Ultraschallsignal (A-Bild) repräsentiert eine Superposition von allen am Wandler angekommenen Schallwellen. Hierbei überlagern sich nicht nur die direkt von der Bauteilgeometrie, sowie von Materialungängen reflektierten Wellen, sondern auch die Wellen, die durch die Umwandlungen und/oder durch die mehrfache Reflektion an den Grenzflächen entstehen. Diese Signalanteile enthalten zusätzliche Amplituden- und Phaseninformation, die bei der Bildrekonstruktion mit nur einem angenommenen Wellenmode verloren gehen. Würde diese Information aus dem Zeitsignal extrahiert und bei der Bildrekonstruktion berücksichtigt, verbessert sich das Nachweisvermögen der SPA-Technik.

#### Berücksichtigung der von einem Punktwandler mitangeregten SV-Wellen

Neben der longitudinalen Welle werden von einem Punktwandler auch transversale Wellen und Oberflächenwellen mitangeregt (Abb. 90), deren Intensität in manchen Raumrichtungen sogar höher als die Intensität der L-Welle ist. Die Maxima der Amplitude der Transversalwelle liegen unter den Winkeln

$$\alpha_{SV} = \pm \arcsin(V_{SV}/V_L),$$

wobei  $V_{SV}$  und  $V_L$  die Schallgeschwindigkeiten der transversalen bzw. der longitudinalen Welle im Material sind. Die angeregten und empfangenen Transversal-Wellen können unter Umständen zusätzliche Information über Materialungängen im Prüfobjekt liefern und sollen bei der Bildrekonstruktion berücksichtigt werden.

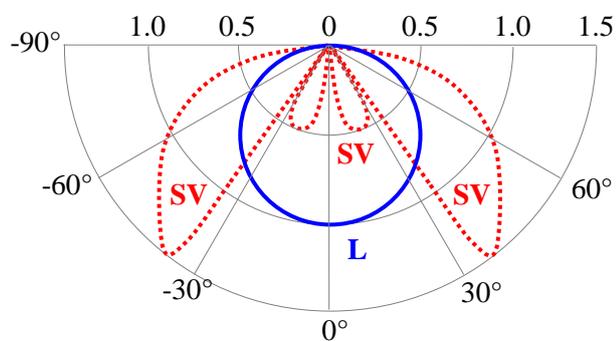


Abb. 90: Richtcharakteristik eines US-Punktwandlers

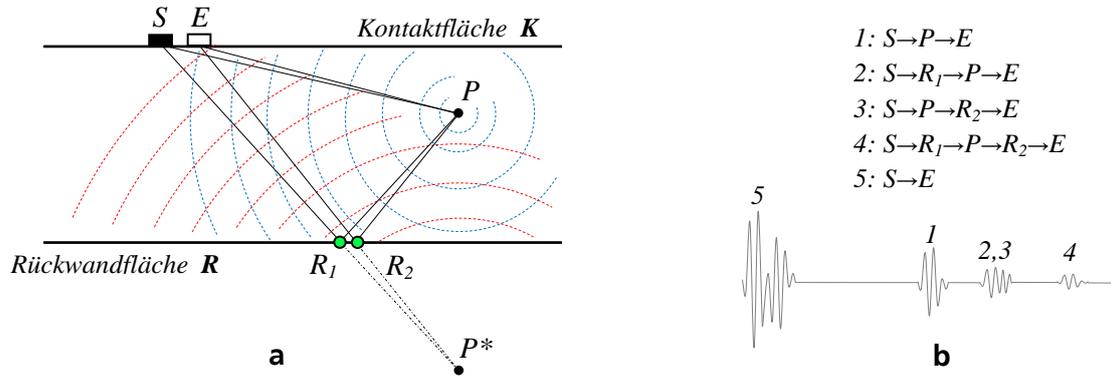
#### Berücksichtigung der Mehrfachreflektion

Nehmen wir an, dass es in einem durch zwei unendliche Flächen begrenzten Raum einen Punktreflektor  $P$  gibt (Abb. 91 a) und an einer der Kontaktfläche  $K$  die Schallquelle  $S$  (Sender) und der Schallempfänger  $E$  angeordnet sind, deren Richtcharakteristiken divergent sind.

Nach der Ankunft der vom Sender angeregten Schallwelle im Punkt  $P$  stellt ein Punktreflektor nach dem Huygens'schen Prinzip eine Quelle sekundärer Wellen (blaue Wellenfront in der Abbildung 91) dar. Einerseits, wird diese Welle vom Empfänger direkt erfasst. Andererseits, kommt eine zweite Wellenfront nach der Reflektion von der Rückwandfläche  $R$  zum Empfänger (rote Linien in der Abbildung). Die von der Rückwand reflektierte Welle kann als die von einer virtuel-

len Quelle  $P^*$  erzeugte Welle betrachtet werden, wobei  $P^*$  dem gegen die Fläche  $R$  gespiegelten Punkt  $P$  entspricht.

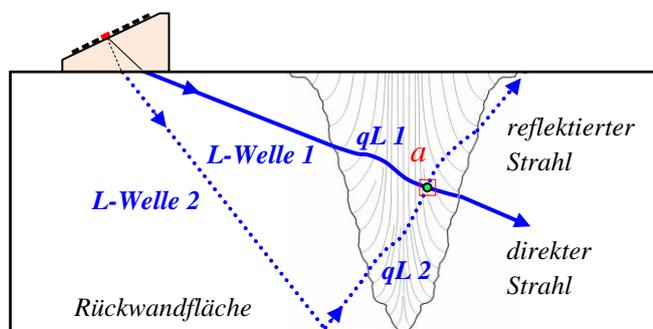
Unter der Bemerkung, dass die primäre Welle vom Sender den Punkt  $P$  sowohl direkt als auch über die Umlenkung (Punkt  $R_1$ ) erreichen kann, entsprechen dem Punktrefektor  $P$  im empfangenen Signal vier Oszillationen mit unterschiedlichen Ankunftszeiten (Abb. 91b).



**Abb. 91: Empfang der diffragierten Wellen von einem Punktrefektor: Ausbreitungsprinzip (a) und ein typisches Laufzeitsignal am Empfänger (b)**

Die Berücksichtigung der Signale 2-4 (Abb. 91b) in der SPA-Rekonstruktion soll ihren Informationsinhalt und damit das Nachweisvermögen des Verfahrens verbessern. So kann es zum Beispiel sein, dass das durch die Umlenkung entstandene Signal eine höhere Amplitude aufweist als das Signal der direkten Einschallung / direkten Reflektion von der Materialungänge.

Die Erweiterung des Ray-Tracing-Algorithmus für die Berücksichtigung der von der Rückwand reflektierten Wellen erfolgt durch die Erstellung einer zweiten Look-Up-Tabelle  $LUT_{II}$ , die die Laufzeiten der reflektierten Wellen von den PA-Elementen zu jedem Volumenpixel enthält. Die Laufzeit vom Sender zur Rückwandfläche wird in der Look-Up-Tabelle  $LUT_I$  gespeichert. Die auftreffende Welle wird von der Rückwand reflektiert. Der Reflektionswinkel nach dem allgemeinen Brechungsgesetz ausgerechnet. Der reflektierte Strahl verläuft zur oberen Fläche. Die entsprechenden Laufzeiten werden in der Look-Up-Tabelle  $LUT_{II}$  gespeichert. Also entsprechen jedem Volumenpixel  $a$  (Abb. 92) zwei Laufzeitwerte, die jeweils in der  $LUT_I$  und in der  $LUT_{II}$  gespeichert werden.



**Abb. 92: Ray-Tracing mit Berücksichtigung der reflektierten Wellen**

So werden beispielsweise bei der Rekonstruktion eines Sektor-Bildes  $B$  in den Bildpixel  $i, j$  vier Samples des Zeit-

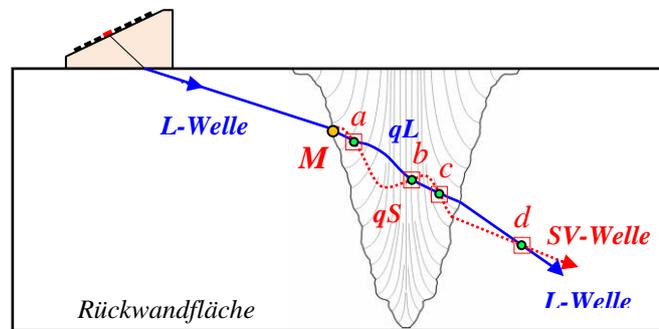
signals  $A_{mn}$  hinzugefügt, die den Laufzeiten  $t_1 - t_4$  vom Sender  $m$  zu dem Pixel und zum Empfänger  $n$  entsprechen:

$$\begin{aligned}
 B(i, j) &= B(i, j) + A_{mn}(t_1) + A_{mn}(t_2) + A_{mn}(t_3) + A_{mn}(t_4) \\
 t_1 &= LUT_I(i, j, m) + LUT_I(i, j, n) \\
 t_2 &= LUT_{II}(i, j, m) + LUT_I(i, j, n) \\
 t_3 &= LUT_I(i, j, m) + LUT_{II}(i, j, n) \\
 t_4 &= LUT_{II}(i, j, m) + LUT_{II}(i, j, n)
 \end{aligned}
 \tag{66}$$

Als Illustration zur Formel (66) dient die Abb. 91, wobei  $S \equiv m$  und  $E \equiv n$ . Die Laufzeiten  $t_1 - t_4$  entsprechen den Signalen 1-4 im Zeitsignal  $A_{mn}$  in rechtem Teil der Abbildung.

### Berücksichtigung der umgewandelten Wellen

Neben den von der Rückwandfläche reflektierten Wellen kann man bei der SPA-Rekonstruktion auch die umgewandelten Wellen berücksichtigen. In Abb. 93 entsteht infolge der Wellenumwandlung der angeregten longitudinalen Welle an der Schweißnahtflanke (Punkt  $M$ ) die vertikalpolarisierte quasi-transversale Welle  $qS$ . Diese Welle breitet sich durch das Schweißgut aus und geht durch dieselben Pixel  $a, b, c$  und  $d$ , wie die gebrochene quasi-longitudinale Welle  $qL$ . Für die Inbetrachtung der umgewandelten Wellen muss durch eine entsprechende Ray-Tracing-Prozedur eine separate Look-Up-Tabelle erstellt werden.



**Abb. 93: Ray-Tracing mit Berücksichtigung der Wellenumwandlung.**

Die Wellenumwandlung kann sowohl an der Nahtflanke bzw. an der Rückwandfläche, als auch an den Stengelkristalliten stattfinden.

### 8.1.3 Beschleunigung des Rechenganges durch effiziente Grafikprozessoren

Das Prinzip des Ray-Tracing-Algorithmus der Schallausbreitung in einem anisotropen inhomogenen Medium besteht in der Verfolgung des Strahlenganges von der Ultraschallquelle durch das pixelierte Modell des Prüfobjektes mit Berücksichtigung des Brechungsgesetzes an den möglichen Grenzflächen. Jedem Pixel, durch das die Ultraschallwelle durchgeht, wird ein entsprechender Laufzeitwert zugeordnet. Die Erfahrung zeigt, dass zur „Abdeckung“ aller Pixel des Prüfmodells die Strahlen mit einer Winkelauflösung von etwa 0.1-0.2 Grad (je nach Modell- und Pixeldimensionen) verlaufen sollen. Also beträgt die Gesamtzahl der Strahlen von allen Pha-

sed-Array-Elementen über mehrere tausende. Zum Beispiel, für einen 16-elementigen Gruppenstrahler und beim Winkelbereich von  $10^\circ$  bis  $80^\circ$  ist die Anzahl der zu berechnenden Strahlen gleich  $16 \cdot (80 - 70) / 0.1 = 9600$ .

Der Fakt, dass die Ausbreitung einzelner Strahlen voneinander unabhängig ist, lässt den Rechenprozess parallelisieren. Besonders eignen sich für solche parallele Rechenaufgaben Grafikprozessoren (GPU). Eine Grafikprozessor-Engine besitzt heutzutage bis zu 3072 Recheneinheiten (*Shader-Prozessoren* oder *CUDA-Kerne*) [92], die die Rechenprozesse parallel ausführen können. Anwendung der Grafikprozessoren bei solchen nicht sequentiellen Programmabläufen wie Ray-Tracing-Prozedur gestattet eine signifikante Beschleunigung des Rechenvorganges.

## 8.2 Weiterentwicklung des GECDM-Algorithmus

Das der GECD-Methode zugrunde liegende Prinzip basiert auf iterativer Optimierung der nicht-analytischen mehrparametrischen Descent-Search-Funktion  $f_{DS}$  (siehe Kapitel 6), die die Fokussierungsqualität bei der SPA-Rekonstruktion quantitativ charakterisiert. Als Funktionsargumente dienen die Dichte der Kristalle und die Elemente der Steifigkeitsmatrix – die elastischen Konstanten. Die Gefügestruktur der Schweißnaht (d.h., die Inhomogenität des Mediums) wird damit als bekannt betrachtet. Während des Suchvorganges werden die Parameter der Anzeige (Lage, Schärfe und Amplitude) von einem künstlichen Referenzreflektor bewertet.

Die Funktionalität des GECDM-Algorithmus wurde bei experimenteller Validierung (Kapitel 7, Abschnitt 7.6) der entwickelten Prüftechnik bestätigt. Der Bedarf nach einem bekannten Referenzreflektor für die Durchführung der Strukturaufklärung beschränkt jedoch die praktische Anwendbarkeit der GECDM. Da in realen Prüfobjekten in der Regel keine künstlichen Ungängen eingebracht werden dürfen, muss in der Praxis ein Justierkörper mit Referenzreflektor hergestellt werden, der ähnlich dem Prüfobjekt geschweißt ist und dadurch gleiche elastische Eigenschaften und die Nahtstruktur aufweist. Die iterative Anpassung der elastischen Konstanten erfolgt dann an diesem Justierkörper. Die ermittelten Eigenschaften des Justierkörpers werden auf das Prüfobjekt „übertragen“ unter Annahme, dass die Anisotropie und Inhomogenität des Prüfgegenstandes in verschiedenen Prüfpositionen unverändert sind und demjenigen des Justierkörpers entsprechen (bzw. sich nur unbedeutend davon unterscheiden). Diese Prüfstrategie kann für automatisch geschweißte Verbindungen eingesetzt werden, wobei sich die Schweißparameter bei nacheinander folgenden Schweißvorgängen nur unbeachtlich ändern können. Die Gefügestruktur solcher Nähte wird damit reproduzierbar und entspricht der Nahtstruktur des Referenzkörpers.

Um auf einen Justierkörper bzw. auf einen Referenzreflektor verzichten zu können, muss die Descent-Search-Funktion auf „natürlichen“ Reflektoren basieren, die in jedem Prüfkörper vorhanden sind, wie z.B. auf Befunden selbst („Autofocusing“) oder auf Geometrieanzeigen (z.B. Nahtflanke oder Rückwandecho). Eine mögliche technisch-algorithmische Lösung zu diesem Thema basiert auf dem Einsatz von zwei Ultraschallsensoren, die nach dem SE-Prinzip funktionieren [93]. Die Prüfköpfe werden am Prüfobjekt so angeordnet, dass die Schweißnaht durchgeschallt wird. Als Referenzanzeige für die GECDM dient in diesem Fall der Sendepuls eines der Sensoren, der sich durch anisotrope inhomogene Nahtgefüge ausbreitet.

Noch eine mögliche Anwendung des iterativen GECDM-Algorithmus wäre die Ermittlung der Gefügestruktur bei festgelegten Werten der Steifigkeitsmatrix und der Dichte.

Die erwähnten möglichen Wege der Weiterentwicklung des GECDM-Algorithmus werden unten beschrieben.

### 8.2.1 Ermittlung von akustischen Eigenschaften einer austenitischen Schweißnaht im SE-Betrieb

Prinzipielle Messanordnung wird in Abb. 94 dargestellt. Eine Ultraschallquelle (Sender  $S$ ) und mehrere Ultraschallempfänger  $E_1 - E_N$  werden am Prüfobjekt so angeordnet, dass die vom Sender erzeugte Ultraschallwelle durch den anisotropen inhomogenen Gegenstand ausbreitet und von Empfängern erfasst wird. Je nach Zugänglichkeit können die Ultraschallwandler sowohl auf beiden (Abb. 94a) als auch auf einer Seite des Prüfobjektes (Abb. 94b) angeordnet werden (in der Abbildung 94 ist  $d$  die Objektdicke). Die Empfangscharakteristik jedes Empfängers ist ungerichtet. Dadurch können sie die akustischen Signale von verschiedenen Richtungen empfangen. Zur Anregung/Empfang der akustischen Wellen können Ultraschallwandler unterschiedlicher Konstruktion und Wirkungsart verwendet werden: ein Einzelschwinger, ein Gruppenstrahler, ein EMUS-Prüfkopf (elektromagnetisch angeregter Ultraschall), eine Luftultraschallquelle, eine Leistungsschallsonotrode, eine Schwingpulenerreger, ein Laserstrahl und andere. Außerdem, kann man eine Kombination aus den erwähnten Wandlern benutzen.

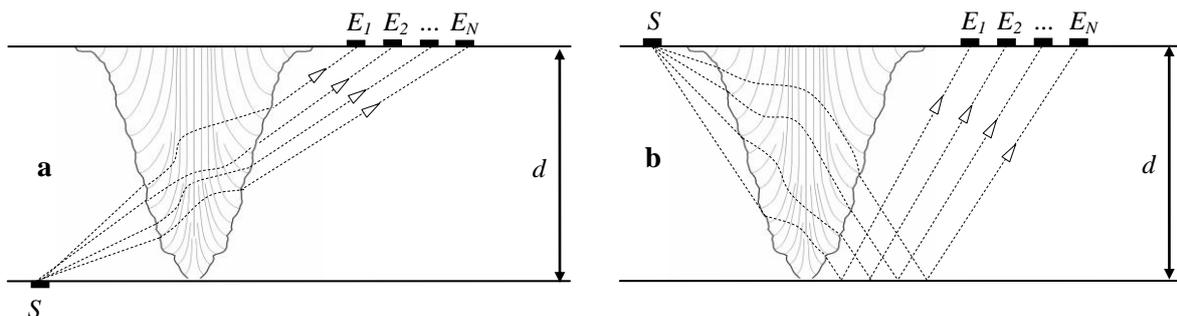
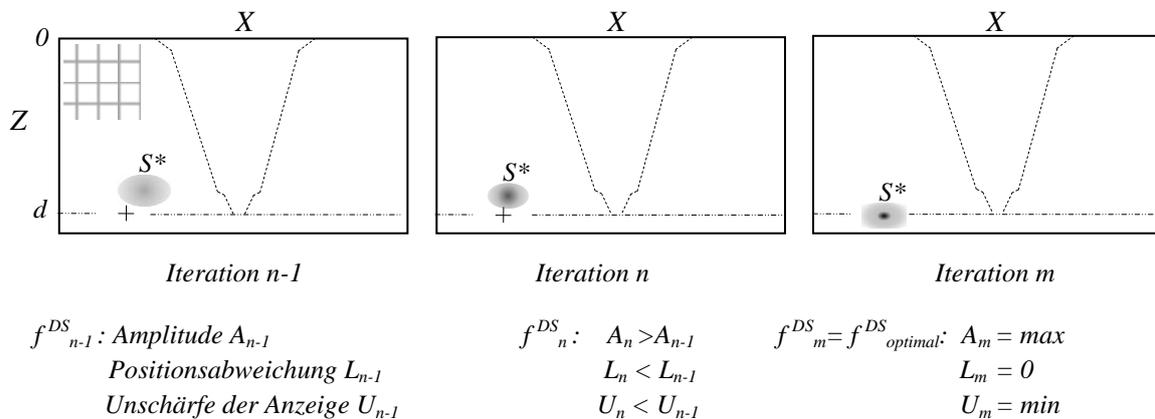


Abb. 94: Messanordnung bei Ermittlung der elastischen Eigenschaften im SE-Betrieb

Der Empfangsvorgang von Wandlern  $E_I - E_N$  beginnt mit der Erzeugung der Schallwelle vom Sender  $S$ . Die empfangenen Laufzeitsignale werden verstärkt, abgetastet, gespeichert und für die nachfolgende Rekonstruktion des tomografischen Sektor-Bildes genutzt.

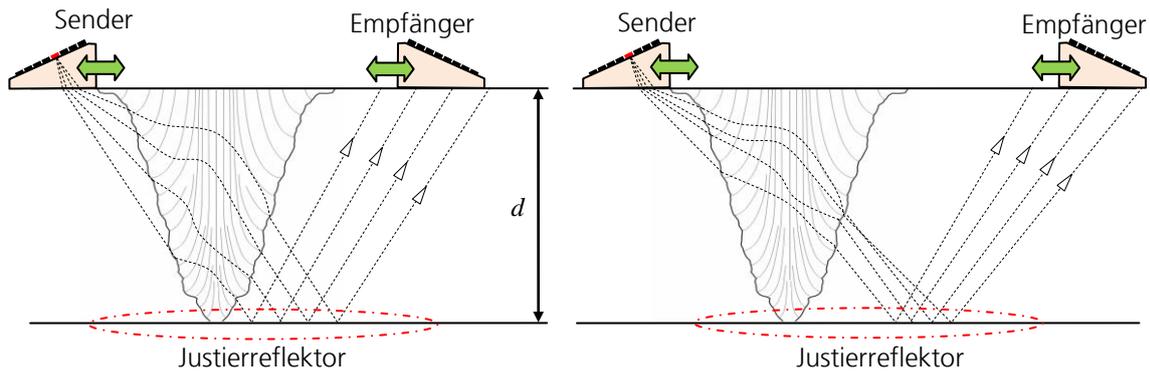
Beim zweiseitigen Zugang (Abb. 94a) wird der Wert der DS-Funktion an der rekonstruierten Anzeige  $S^*$  bestimmt, die im Sektor-Bild dem Sendepuls vom Sender  $S$  entspricht (siehe Abb. 95). Der iterative Vorgang wird wie in Kapitel 6 beschrieben ausgeführt. Die elastischen Konstanten werden als korrekt bestimmte betrachtet, wenn sich die Anzeige  $S^*$  im Sektor-Bild in richtiger Position befindet (Positionsabweichung = 0), fokussiert ist (Unschärfe = min) und ihre maximale Amplitude besitzt.



**Abb. 95: Iterative Ermittlung der elastischen Eigenschaften nach der GECDM anhand der Anzeige  $S^*$  vom Sender**

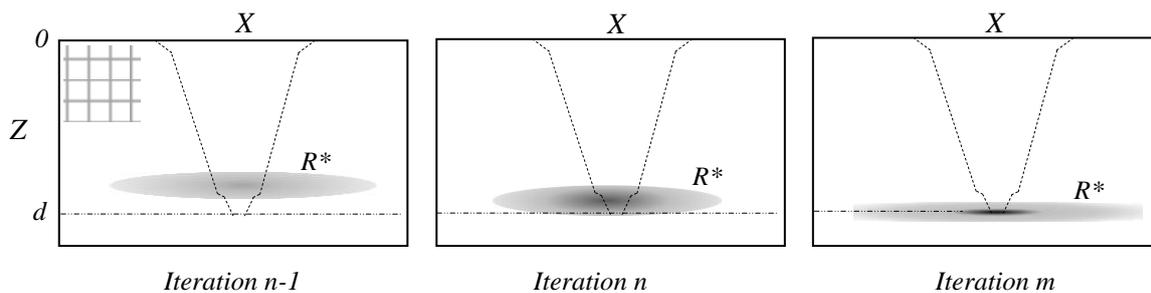
Beim einseitigen Zugang (Abb. 94a) dient die Rückwandfläche des Prüfgegenstands als der Referenzreflektor für die GECDM. Die sich durch die Schweißnaht ausbreitenden und von der Rückwandfläche reflektierten elastischen Wellen dienen sowohl der Strukturaufklärung der Schweißnaht, als auch als Eingangsdaten für die anschließende SPA-Rekonstruktion.

Durch die Verschiebung des Senders oder Empfängers oder beider Sensoren auf der Oberfläche des Prüfobjektes wird der Informationsinhalt der Ultraschallsignale für die Strukturaufklärung variiert und durch Redundanz erhöht. Die Überlagerung von Messergebnissen von sämtlichen Messpositionen innerhalb einer Prüfspur gestattet die Rekonstruktion des Compound-B-Bildes.



**Abb. 96: Benutzung der Rückwandfläche als Justierreflektor für die GECDM**

Die Descent-Search-Funktion charakterisiert die Lage, die Form und die Amplitude der Rückwandanzeige  $R^*$  im rekonstruierten Ultraschallbild (Abb. 97). Bei den korrekt eingesetzten Werten elastischer Konstanten muss die Rückwandfläche eine geradlinige stufenlose Anzeige darstellen, welcher Position der tatsächlichen Objektdicke  $d$  entspricht.



**Abb. 97: Iterative Ermittlung der elastischen Eigenschaften nach der GECDM anhand der Anzeige  $R^*$  von der Rückwandfläche**

Die Verwendung eines Compound-B-Bildes zur Strukturaufklärung der Schweißnähte hat einige Vorteile im Vergleich zur Auswertung der Sektor-Bilder, die in einer lokalen Position der Ultraschallwandler aufgenommen werden:

1. Bei der Rekonstruktion des Compound-B-Bildes wird die gesamte Naht abgedeckt;
2. Bei der Veränderung der gegenseitigen Positionierung des Senders und des Empfängers erhöht sich der Informationsinhalt und die Genauigkeit der GECD-Methode

**Festgelegte (konstante) Größe:** Gefügestruktur  $S$

**Anzupassende Größe:** Steifigkeitsmatrix  $C$ , Dichte  $\rho$

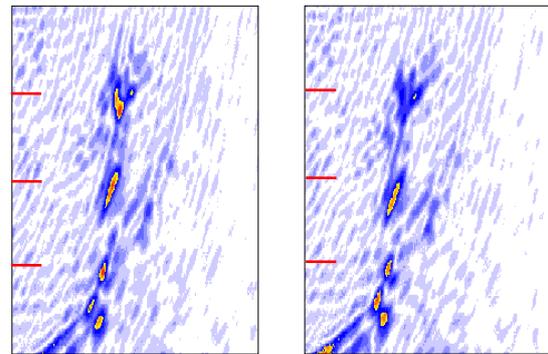
**Suchkriterien:** Position, Amplitude und Gleichmäßigkeit der Anzeige vom Sender oder der Rückwandechoanzeige im Sektor-Bild bzw. im Compound-B-Bild

### 8.2.2 „Autofocusing“

Die Idee der automatischen Fokussierung („Autofocusing“) besteht in automatischer Bewertung der Fokussierungsqualität auf vorhandene Befunde in rekonstruierten Ultraschall-Ergebnisbildern. Als Qualitätskriterien dienen die Schärfe und die Amplitude einer vorhandenen Anzeige. Für ausgedehnte Anzeigen kann zusätzlich die Kontur der Anzeige bewertet werden.

Abb. 98 zeigt die Transformation der Rissanzeige in dem Compound-B-Bild bei einer Veränderung der Werte der elastischen Konstanten um 10%.

Die unten stehenden Qualitätskriterien einer solchen rissartigen Anzeige dienen als Argumente der Descent-Search-Funktion  $f_{DS}^A$ , die iterativ optimiert wird, wie es im Abschnitt 6.2.2 beschrieben ist, mit Ausnahme der Anzeigeposition.



a. Korrekte elastische Konstanten  $C$       b.  $C^*=C+\Delta C$ ,  
 $\Delta C=0.1C$

**Abb. 98: Darstellung eines Risses im Compound-B-Bild: korrekte Werte der Steifigkeitsmatrix (a) und geänderte Werte (b)**

- Festgelegte (konstante) Größe:**      Gefügestruktur  $S$ .
- Anzupassende Größe:**                      Steifigkeitsmatrix  $C$ , Dichte  $\rho$ .
- Suchkriterien/Referenz:**                      Schärfe, Amplitude und Kontur der Fehleranzeige  
im Sektor-Bild oder im Compound-B-Bild

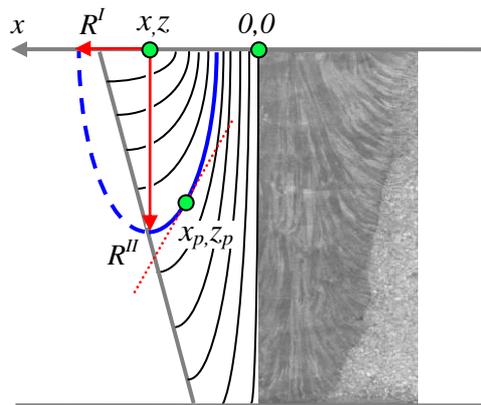
### 8.2.3 Ermittlung der Gefügestruktur einer Schweißnaht mit angenommenen akustischen Eigenschaften der Stengelkristalle

Die Ausbreitung der elastischen Wellen in einem anisotropen inhomogenen Medium wird sowohl von der Anisotropie (nämlich von den elastischen Konstanten), als auch von seiner Inhomogenität beeinflusst. Eine fehlerhafte Eingabe dieser beiden Medumeigenschaften bestimmt die Qualität der inversen Phasen Anpassung. Deren möglichst korrekte Annahme oder Ermittlung ist die Voraussetzung für die effiziente Anwendung der GECD-Methode. Die im Kapitel 6 beschriebene nichtanalytische mehrparametrische Descent-Search-Funktion verwendet die Steifigkeitsmatrix der Stengelkristalle als Argument, während die Inhomogenität des Mediums angenommen wird.

Im Prinzip kann eine iterative Ermittlung der Gefügestruktur benutzt werden, wenn *vica versa* die elastischen Konstanten angenommen (festgelegt) werden und die Struktur aufgeklärt werden soll. Dafür muss die Gefügestruktur mathematisch beschrieben und parametrisiert werden, um als Argument der Descent-Search-Funktion eingesetzt zu werden. Ein Beispielkonzept ist nachstehend aufgeführt.

Während des Schweißprozesses erstarrt die Schmelze zunächst an den Nahtflanken. Die Stengelkristallite entstehen normalerweise senkrecht zu den Flanken. Der Kristallitenverlauf entspricht der Wärmeabflussrichtung. Die Gefügestruktur einer „typischen“ austenitischen

Schweißnaht sieht wie in Abb. 99 aus. Die Stengelkristallite können anhand einer Schar von Ellipsen beschrieben werden, deren Parameter (Radien  $R^I$  und  $R^{II}$ , Position  $z_0$  des Zentrums) vom Abstand  $x$  von der Nahtmitte z.B. wie folgt abhängen:



$$\begin{aligned} R^I(x) &= (a + bx)x \\ R^{II}(x) &= (c - 1)x - \sqrt{x} + d \\ z(x) &= ex \end{aligned} \quad (67)$$

**Abb. 99: Beschreibung der Gefügestruktur als eine Ellipsen-Schar**

Jeder Volumenpunkt  $x_p, z_p$  wird einer entsprechenden Ellipse zugeordnet. Ein Stengelkristallit ist entsprechend der Tangente zur Ellipsenkurve in diesem Punkt orientiert. So kann die Orientierung der Stengelkristalle in jedem Volumenpixel für angenommenen Parametersatz  $[a \ b \ c \ d \ e]$  bestimmt werden. Anschließend erfolgt eine Simulation der Schallausbreitung, Rekonstruktion und Bewertung des rekonstruierten Ergebnisbildes wie im Kapitel 6 beschrieben. Die Descent-Search-Funktion  $f_{DS}^S$  verfügt über die Parameter  $a - e$  als Argumente. Durch die Optimierung dieser Funktion können die Parameterwerte so angepasst werden, dass die Ellipsenkurven maximal der realen Nahtstruktur entsprechen und damit die beste Übereinstimmung mit einer realen Nahtstruktur und dadurch eine optimale Fokussierungsqualität erreicht wird.

**Festgelegte (konstante) Größe:** Steifigkeitsmatrix  $C$ , Dichte  $\rho$

**Anzupassende Größe:** Gefügestruktur  $S$

**Suchkriterien/Referenz:** Referenzreflektor, „Autofokussing“, Rückwandecho

### 8.2.4 Beschleunigung der iterativen Suche durch Kaskadenausführung

Die iterative Optimierung der Descent-Search-Funktion nach der Simplex-Methode bzw. nach der Gradient-Methode kann wesentlich beschleunigt werden, indem die Iterationen nicht in einem Suchvorgang mit einer vorgegebenen Toleranz erfolgen, sondern in einer Kaskade der Suchvorgänge mit stufenweise zunehmender Präzision. Das Suchgebiet verringert sich damit von Kaskade zur Kaskade. Der letzte Suchvorgang erfolgt mit gewünschter Genauigkeit, aber nur innerhalb eines relativ kleinen Bereiches des Raums, der während der vorherigen Suchvorgänge ermittelt und präzisiert wurde, was eine wesentliche Beschleunigung des Suchvorganges gestattet.

Schematisch wird die Idee in Abb. 100 illustriert. Die Optimierung der Funktion  $f_{DS}$  mit gewünschter Toleranz  $\varepsilon$  erfolgt in  $n$  nacheinander folgenden Kaskaden: während der  $i$ -ten Kaskade ( $1 < i < n$ ) wird der Extremum-Punkt  $X_i^{\min} \approx \min(f_{DS})$  grob bestimmt (mit einer Toleranz  $\varepsilon_i \gg \varepsilon$ ) und das Suchgebiet für den nächsten Vorgang auf  $X_i^{\min} \pm \varepsilon_i$  beschränkt. Innerhalb dieses erfolgt der nächste Suchvorgang  $i+1$  mit einer Toleranz  $\varepsilon_{i+1} < \varepsilon_i$ . Der Extremum-Punkt wird von Kaskade zur Kaskade präzisiert. Die letzten drei ermittelten Punkten und Suchgebiete werden in Abb. 100 dementsprechend mit der schwarzen, roten und blauen Farbe dargestellt.

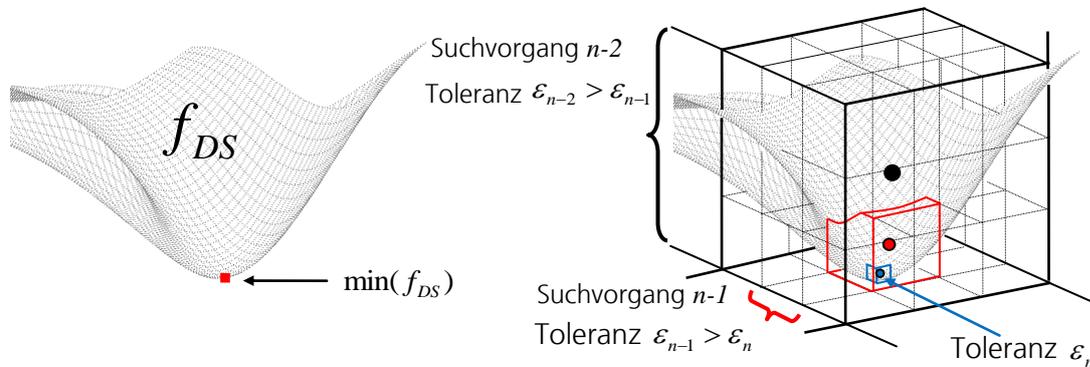


Abb. 100: Kaskadenausführung des iterativen Suchvorganges



## 9. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Prüftechnik entwickelt, die eine quantitative Ultraschallprüfung von akustisch anisotropen und/oder inhomogenen Werkstoffen ermöglicht. Unter anderem können Prüfobjekte mit unbekannter Anisotropie geprüft werden.

Die erarbeitete Prüftechnik basiert auf dem Sampling-Phased-Array-Verfahren und stellt eine Weiterentwicklung dieser Methode dar. Sie kombiniert die Vorteile der SPA-Methode (aussagekräftige zwei- und dreidimensionale Fehlerbildvisualisierung, Echtzeitfähigkeit) mit der Technik der inversen Phasen Anpassung, die einen verbesserten Fehlernachweis und Fehleranalyse in akustisch schwerprüfbaren Werkstoffen gestattet. Die neue Prüftechnik ermöglicht eine quantitative Ultraschallprüfung von:

- isotropen inhomogenen Werkstoffen (Mehrschichtwerkstoffen),
- anisotropen homogenen Materialien: Faserverbundwerkstoffe, Materialien mit ausgeprägter Textur,
- anisotropen inhomogenen Werkstoffen: austenitischen Schweißnähten, Plattierungen, Mischnähte.

Insbesondere wurde die SPA-Technik für die Prüfung von austenitischen Schweißnähten erweitert und angepasst.

Die im Rahmen der Dissertation erarbeitete Prüftechnik berücksichtigt akustische Anisotropie sowie die Inhomogenität eines austenitischen Schweißgutes oder einer Mischnaht und ermöglicht eine verbesserte Auswertung von Ultraschallanzeigen. Die Prüfprozedur besteht in:

- Anregung und Empfang von elementaren Ultraschallwellen nach dem SPA-Messprinzip,
- Simulation der Schallausbreitung im Prüfobjekt und Berechnung der Laufzeiten von den Ultraschallquellen zu jedem Volumenpunkt für die nachfolgende inverse Phasen Anpassung,
- Rekonstruktion von Ergebnisbildern (A-, B-, C-, D- und Volumen-Bild) nach dem SPA-Rekonstruktionsprinzip,
- Auswertung der Prüfergebnisse.

Im Einzelnen können folgende Ergebnisse der Arbeit festgehalten werden:

## **Ray-Tracing-Algorithmus für die Simulation der Schallausbreitung in einem anisotropen inhomogenen Medium**

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Ray-Tracing-Algorithmus entwickelt, der die Ausbreitung der elastischen Wellen durch ein anisotropes und inhomogenes Medium beschreibt. Die Berücksichtigung der Anisotropie und der Inhomogenität des Mediums erfolgt durch die Berechnung des Brechungsgesetzes an den Grenzflächen zwischen Materialien mit unterschiedlichen akustischen Eigenschaften und durch die nachfolgende Anpassung der Ausbreitungsrichtung und – Geschwindigkeit von elastischen Wellen. Während des Simulationsvorganges werden die Laufzeiten von Elementen des Ultraschallwandlers zu jedem Volumenpunkt berechnet, die man für die ortsgetreue Rekonstruktion der Ultraschall-Ergebnisbilder benötigt.

## **Inverse Phasenanpassung bei der Rekonstruktion eines anisotropen inhomogenen Volumens**

Durch den Aufbau einer synthetischen Apertur bei der Abtastung des Prüfvolumens und Datenerfassung nach dem Sampling Phased Array Prinzip mit inverser Phasenanpassung gelingt eine tomografische Rekonstruktion der Schweißnaht mit dreidimensionaler Darstellung der Prüfergebnisse. Dies erfolgt beim Einsatz nur eines Sensortyps – eines linearen Phased-Array-Wandlers, der im Gegensatz zur Verwendung von Mehrkopfsystemen eine wesentliche Vereinfachung des Prüfvorganges bei erhöhter Prüfsicherheit ermöglicht.

Für die Validierung der inversen Phasenanpassung wurden austenitische Testkörper mit künstlichen und realen Fehlern aus dem Vorrat des Fraunhofer IZFP und der MPA Stuttgart verwendet. Anhand dieser Schweißnahtproben wurde aufgezeigt, dass das Sampling-Phased-Array-Prinzip mit inverser Phasenanpassung eine quantitative Aussage zu Fehlergröße, -art, und –lage gestattet.

## **Iterative Ermittlung von elastischen Eigenschaften des Mediums („Gradient-Elastic-Constant-Descent“-Methode)**

Als Grundlage für die Simulation der Schallausbreitung dienen die Angaben über die Schweißnahtstruktur und ihre elastischen Eigenschaften. Diese Parameter bestimmen die Schallbeugungseffekte im anisotropen inhomogenen Schweißgut.

Da sie in der Regel nicht bekannt sind, wurde im Rahmen der Dissertation die „Gradient-Elastic-Constant-Descent“-Methode (GECDM) entwickelt, die anhand eines angenommenen Inhomogenitätsmodells und eines bekannten Reflektors die Ermittlung der elastischen Konstanten im Schweißgut ermöglicht. Die auf der Basis der elastischen Konstanten berechneten Ultraschalllaufzeiten werden bei der nachfolgenden Fehlerbildrekonstruktion direkt verwendet.

Die „Sampling Phased Array“-Technik mit inverser Phasen Anpassung anhand der mittels des GECDM-Algorithmus bestimmten elastischen Konstanten gestattet den quantitativen Fehler nachweis in austenitischen Schweißnähten mit unbekannter Anisotropie. Die Funktionalität des Ray-Tracing-Algorithmus und der GECDM wurde durch mehrere Prüfexperimente validiert.

### **Aufbau des Laborprüfsystems für die mechanisierte Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißnähten**

Die im Rahmen der Dissertation entwickelten Algorithmen der Simulation und der Fehlerbildrekonstruktion wurden im SPA-Laborprüfsystem implementiert. Werden die für die SPA-Rekonstruktion benötigten Laufzeit tabellen (LUTs, oder Nachschlag tabellen) im Vorfeld berechnet, gestattet das Laborprüfsystem die tomographische Rekonstruktion der Ergebnis bilder in Echtzeit.



## 10. Schlussbemerkung

Die in dieser Arbeit entwickelte Prüftechnik ist für die Prüfpraxis einsatzbereit. In Bezug auf die Verwendung der SPA-Technik für praktische Prüfaufgaben an austenitischen Schweißnähten und an Mischverbindungen kann man zwischen drei möglichen Prüfstrategien unterscheiden, die je nach aktueller Prüfsituation eingesetzt werden können.

Der einfachste Fall tritt auf, wenn sowohl die elastischen Eigenschaften der Stengelkristalle als auch die Gefügestruktur der Schweißnaht bekannt sind. In diesem Falle können durch eine relativ einfache Schallausbreitungssimulation die Prüfergebnisse mit ortsgetreuer 3D-Abbildung des Prüfobjektes erzielt werden.

Sind die elastischen Eigenschaften einer Schweißnaht unbekannt und kann ihre Gefügestruktur an einem gleichartig geschweißten Vergleichskörper ermittelt bzw. anhand des Schweißverfahrens als bekannt unterstellt werden, kommt der im Rahmen der Dissertation entwickelte GECDM-Algorithmus zum Einsatz. Er gestattet, anhand eines bekannten Reflektors die elastischen Konstanten der Schweißnaht zu ermitteln und damit eine korrekte Bildrekonstruktion durchzuführen. Die Qualität des Verfahrens ergibt sich direkt aus der Güte der Vergleichbarkeit des Referenzkörpers.

Im schwierigsten Fall liegt weder Information über das Schweißnahtgefüge und seine elastischen Eigenschaften vor, noch kann man diese an einem Referenz-(Vergleichs-)körper ermitteln. So müssen alle Modellparameter, d.h. sowohl die Schweißnahtstruktur, als auch die elastischen Eigenschaften variiert werden, bis das bestmögliche Ergebnis erzielt wird.

Das sind die vorgeschlagenen Prüfstrategien, unter welchen die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Ultraschallprüftechnik schon jetzt in der Praxis eingesetzt werden kann.

Durch eine Weiterentwicklung der GECDM-Technik kann das Anwendungsgebiet der Sampling Phased Array Technologie für die Prüfung von anisotropen Materialien ohne Referenz-(Vergleichs-)körper erweitert werden. Entsprechend den im Abschnitt 8.2 vorgeschlagenen Entwicklungskonzepten kann die Justierung an einem Justierreflektor im Vergleichskörper durch die Justierung anhand des Prüfgegenstandes selbst (z.B. anhand der Rückwandfläche im SE-Betrieb) ersetzt werden. Eine weitere mögliche praxiswichtige Weiterentwicklung besteht in der Implementierung des Algorithmus einer „automatischen Fokussierung“, wobei die elastischen Eigenschaften bzw. die Parameter des erstellten Nahtmodells basierend auf der Schärfe der Fehleranzeige ermittelt bzw. optimiert werden können. Die vorgeschlagenen Konzepte für die Weiterentwicklung der GECDM-Methode müssen allerdings sorgfältig abgehandelt und geprüft werden.



## Literaturverzeichnis

- [1] Kreiner H.: 50 Jahre Nichtrostender Stahl, Techn. Mitt. Krupp - Werksberichte, Vol. 20 (No. 4), 1962, S. 165-179.
- [2] Matthies K. u.a.: Ultraschallprüfung von austenitischen Werkstoffen, 1. Auflage, DVS-Verlag, Berlin 2009.
- [3] Bendick W., Haarmann K., Richter H.: Die Anwendung austenitischer Rohrwerkstoffe im Kraftwerksbau. VGB Kraftwerkstechnik 73 (1993), Heft 12.
- [4] Tenckhoff E., Erve M., Weiß E.: Material Concept - Basis for Reliability and Structural Integrity of Components and Systems, Pressure Vessel Technology. Proceedings of the 6th International Conference, Beijing, People's Republic of China, 11 - 15 September 1988.
- [5] Erve M.: Erfahrungen mit austenitischen Stählen und Nickelbasislegierungen in Leichtwasserreaktoren. Siemens Power Journal, 3. Jahrgang, November 1994, S. 39 – 42.
- [6] Gebhardt E., Seghezzi H.-D.: Reaktorwerkstoffe. Teil 1: metallische Werkstoffe. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1964.
- [7] DIN ISO 6520: Schweißen und verwandte Prozesse - Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen - Teil 1: Schmelzschweißen (ISO 6520-1:2007).
- [8] Helbig K.: Foundations of anisotropy for exploration seismics. Pergamon Press. 1994.
- [9] Langenberg K.-J.: Theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Materialprüfung mit Ultraschall, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2009.
- [10] Kammeyer K.-D., Kroschel K.: Digitale Signalverarbeitung. Filterung und Spektralanalyse mit MATLAB-Übungen, 5. Auflage, B.G. Teubner, 2002. S. 29 – 30.
- [11] Rose J.L.: Ultrasonic waves in solid media, Cambridge University Press, 1999. p. 278.
- [12] Berryman J.G.: Long-wave elastic anisotropy in transversely isotropic media, Geophysics, 44, 1979. S. 896-917.
- [13] Shearer P. M.: Introduction to seismology. Cambridge University Press 2006.
- [14] 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.

- [15] KTA 3201.3, Fassung 9/98, Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren. Teil 3: Herstellung, KTA 3201.4, Fassung 6/99, Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren. Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung.
- [16] ASME- BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, Section XI: Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, 1992.
- [17] Schmid R.: Problemorientierte Prüfkonzepete 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.
- [18] Pellkofer D., Engelhard G., Förster S.: Vorteile des WIG- Engspaltschweißens. Fortschrittsberichte der Jahrestagung Kerntechnik., München 1985.
- [19] Aiguire D., Champigny F.: Bimetallic Welds Examination: A Review of French Practices. 14<sup>th</sup> International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, Stockholm 1996.
- [20] Ammirato F. V., Edelmann X., Walker S. M.: Examination of Dissimilar Metal Welds in BWR Nozzle- to-safe- End Joints. 8<sup>th</sup> International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, Florida 1986.
- [21] Walker S. M., Findlan S. J., Phillips M. K., Williams Jr R. W.: Effects of IGSCC Remedies on NDE of Dissimilar Metal Joints. 11<sup>th</sup> International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries. Albuquerque / New Mexico 1992
- [22] Pers-Anderson E. B.: Detection and repair of a crack in a BWR Feed Water Nozzle Safe end Weld. 10<sup>th</sup> International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, Glasgow 1990.
- [23] Bundesrepublik Deutschland: Verordnung über den kerntechnischen Sicherheitsbeauftragten und über die Meldung von Störfällen und sonstigen Ereignissen, Atomrechtliche Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung – AtSMV. 14. Oktober 1992.
- [24] Reck H., Jendrich U., Schulz H.: Ausgewählte Ereignisse mit druckführenden Komponenten in Kernkraftwerken. Vorgehensweise der GRS. 29. MPA- Seminar, Stuttgart 2003.

- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] DIN EN 1330-4, Zerstörungsfreie Prüfung - Terminologie - Teil 4: Begriffe der Ultraschallprüfung.
- [28] (ISO/DIS 10863:2009), Schweißverbindungen – Anwendung der Beugungslaufzeittechnik (TOFD) für die Prüfung von Schweißverbindungen
- [29] 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
- [30] Hübschen G.: Senkrecht zur Einfallsebene polarisierte Ultraschalltransversalwellen; elektromagnetische Wandlung, Ausbreitung und Anwendungspotential in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken 1986.
- [31] Niese F.: EMUS-Wanddickensensor für die Pipeline-Inspektion mit integrierter Wirbelstrom- und Streuflussprüfung. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken 2010.
- [32] Erhard A., Khan M.H., Rana L.A.: Application of ultrasonic phased array techniques for inservice inspection, Proceedings Symposium on Maintenance planning and Operation, Riyadh, Saudi Arabia, 17<sup>th</sup> – 19<sup>th</sup> March 1990.
- [33] Aljoschin N.P.: Verfahren zur akustischen Prüfung von Metallen, "Maschinostrojenie"-Verlag, Moskau, 1989. S. 73
- [34] Sawaragi K., Salzburger H.J., Hübschen G., Enami K., Kiriigashi A., Tachibana N.: Improvement of SH-wave EMAT phased array inspection by new eight segment probes. In: Nuclear Engineering and Design. 198 (2000), pp. 153-163.
- [35] Musgrave M. J. P.: The propagation of elastic waves in crystals and other anisotropic media. In: Rep. Prog. Phys. 22 74, 1959
- [36] Helbig K.: Die Ausbreitung elastischer Wellen in anisotropen Medien. Geophysical Prospecting 4, 1956

- [37] Fedorov F. I.: Theory of elastic waves in crystals. Plenum Press, New York, 1968
- [38] Slawinski M. A.: On Elastic-wave Propagation in Anisotropic Media: Reflection/Refraction Laws, Raytracing and Traveltime Inversion. PhD thesis. Calgary, Alberta, 1996
- [39] Vestrum R. W.: Group- and Phase- Velocity Inversions for the General Anisotropic Stiffness Tensor. Master thesis. Calgary, Alberta, 1994
- [40] Niklasson A. J.: Elastic Wave Propagation in Anisotropic Media. Application to Ultrasonic NDT. PhD thesis. Chalmers University of Technology. Göteborg, 1997
- [41] Halkjær S.: Elastic wave propagation in anisotropic, inhomogeneous materials. Application to ultrasonic NDT. Technical University of Denmark, Lyndby, 1999.
- [42] Ogilvy J. A.: A layered media model for ray propagation in anisotropic inhomogeneous materials. Appl. Mathematical Modeling 14, 1990, pp. 237-247
- [43] Harker A. H., Ogilvy J. A., Temple J. A. G.: Modeling Ultrasonic Inspection of Austenitic Welds. Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 9, No. 2/3, 1990, pp. 155-165
- [44] Rathore S. K., Kishore N. N., Munshi P.: An Improved Method for Ray Tracing through Curved Inhomogeneities in Composite Materials. Journal of Nondestructive Evaluation, Vo. 22, No. 1, 2003
- [45] Sadri M., Riahi M.A.: Ray tracing and amplitude calculation in anisotropic layered media. Geophysical Journal International, 180, 2010, pp. 1170-1180
- [46] Schmitz V., Walte F., Chakhlov S.V.: 3D ray tracing in austenitic materials. NDT&E International 32, 1999, S. 201-213
- [47] Spies M.: Modellierung der Wellenausbreitung in anisotropen Medien, Deutsch-Russisches Seminar „Modellierung von akustischen und elektromagnetischen Wellenausbreitungsphänomenen“ im Rahmen der WTZ-Zusammenarbeit. IZFP Saarbrücken, September 1994.
- [48] Spies M.: Transducer Field Modeling in Anisotropic Media by Superposition of Gaussian Base Functions. J. Acoust. Soc. Am., 105, 633-638 (1999)
- [49] Huang R., Lester W. S. Jr., Sedov A.: Multi-gaussian beam modeling for multilayered anisotropic media, I: Modeling foundations. Research in Nondestructive Evaluation, 18, 2007, pp. 193-220.
- [50] Huang R., Lester W. S. Jr., Sedov A.: Multi-gaussian beam modeling for multilayered anisotropic media, II: Numerical examples of slowness surface and geometry effects. Research in Nondestructive Evaluation, 18, 2007, pp. 221-240.

- [51] Jing Ye, Hak-Joon Kim, Sung-Jin Song, Sung-Sik Kang, Kyungcho Kim, Myung-Ho Song: Model-based simulation of focused beam fields produced by a phased array ultrasonic transducer in dissimilar metal welds. *NDT&E International*, 44, 2011, pp. 290-296.
- [52] Spies M.: Transducer Modelling in General Transversely Isotropic Media via Point-Source-Synthesis: Theory. *Journal Nondestructive Evaluation* 13, No. 2, 1994. S. 85-99.
- [53] Kalholz S., Langenberg K. J., Baum P.: Elastic wave propagation and scattering in austenitic steel. 21st Annual Review of Progress in Quantitative NDE, July 31 - Aug. 05, 1994, Colorado, USA.
- [54] Marklein R.: Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik (FIT). Dissertation, Universität Kassel, Kassel, 1997
- [55] Halkjær S., Sorensen M. P., Kristensen W.D.: The propagation of ultrasound in an austenitic weld. *Ultrasonics* 38, 2000, pp. 256-261
- [56] 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 KKWs“. Abschlußbericht. BMBF-RS 1500931, IZFP (1995), Berichts Nr. 950168-TW, Austenit I -Projekt.
- [57] 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 KKWs“. Abschlußbericht. BMBF-RS 1501024, IZFP (2001), Berichts Nr. 010324-TW, Austenit II -Projekt.
- [58] 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“. Abschlußbericht. BMBF-RS 1501231, IZFP (2004), Berichts Nr. 040118-TW, Austenit III- Projekt.
- [59] Schmitz V., Müller W.; Langenberg K. J., Maisl M. u.a.: Abschlußbericht zum Projekt 150 1220 „Grundlagen für eine beanspruchungsorientierte zerstörungsfreie Prüfung von druckführenden Komponenten“. Saarbrücken, April 2004.

- [60] Schmitz V., Müller W.; Langenberg K. J., Shlivinsli A., Marklein R., Mletzko U.: Abschlußbericht zum Projekt 150 1268 „Ultraschallanalyseprüfung im Bereich von Mischschweißnähten und Plattierungen bei komplexen Bauteilgeometrien unter spezieller Berücksichtigung der Anisotropien“. Saarbrücken, März 2006.
- [61] Raguenet T., Flotté D., Blettner A., Tarillon D.: Ultrasonic testing of welds on austenitic alloys. Where do we actually stand? Rapport technique N° 97.21 DCND 32153, Institut de Soudure, Villepinte, 1998
- [62] Flotté D., Müller W.: Ultrasonic testing of welds on austenitic alloys. Where do we actually stand? Rapport technique N° 99 36 DCND 35222, Institut de Soudure, Fraunhofer IZFP, 1999
- [63] Tessaro U., Erhard A., Schmitz V.: Nachweis und Charakterisierung von rissartigen Fehlern im Plattierungsbereich. Technischer Bericht zum Untersuchungsvorhaben SR 2351, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin, Juli 2001
- [64] Connolly G. D.: Modelling of the propagation of ultrasound through austenitic steel welds. PhD thesis. Imperial College. University of London. London. 2009
- [65] Hunter A.J., Drinkwater B. W., Wilcox P. D.: The wavenumber algorithm for fullmatrix imaging using an ultrasonic array. IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics & Frequency Control 55 (11), 2008, pp. 2450-2462
- [66] Bulavinov A.: Der getaktete Gruppenstrahler. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken 2005.
- [67] 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
- [68] 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
- [69] Azar L., Shi Y., Wooh S.-C.: Beam focusing behavior of linear phased arrays. - In: NDT&E International 33 (2000), pp. 189-198.
- [70] 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
- [71] Pörtzgen N., Dijkstra F.H.D., Gisolf A., Blacquièrre G.; ADVANCES IN IMAGING OF NDT RESULTS, 16th WCNDT, 2004

- [72] Doctor S.R., Hall T.E., Reid L.D: SAFT – the evolution of a signal processing technology for ultrasonic testing. NDT International, 38, June 1986, pp. 165-167
- [73] Langenberg, K. J.: 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
- [74] Langenberg K. J., Berger M., Kreutter T., Mayer K., Schmitz V.: Synthetic aperture focusing technique signal processing. In: NDT International 19 (1986), June, Nr. 3
- [75] Zimmer A.: Abbildende zerstörungsfreie Prüfverfahren mit elastischen und elektromagnetischen Wellen. Dissertation. Kassel: Universität Kassel, 2007
- [76] Wooh S.-C., Shi Y.: Influence of phased array element size on beam steering behavior. Ultrasonics 36 (1998), pp. 737-749.
- [77] Nyquist H: Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. In: Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Vol. 47, April 1928, ISSN 0096-3860, S. 617–644 (Wiederabdruck in: Proceedings of the IEEE. Vol. 90, No. 2, 2002, ISSN 0018-9219, S. 617-644)
- [78] Kröning M., Bulavinov A., Reddy K.M., von Bernus L, Pudovikov S: Deutsche Patentanmeldung, US- Prüfeinrichtung für Prüfungen von Schweißverbindungen mittels Sensorsysteme mit verteilten Aperturen, Anmeldetag 08.08.2006
- [79] 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", Stuttgart, 9 -10. Oktober 2008
- [80] Ogilvy J. A: Computerized ultrasonic ray tracing in austenitic steel. NDT International, Vol. 18, No. 2, pp. 67-77, April 1985.
- [81] Moysan J.: Advances in ultrasonic testing of austenitic stainless steel welds. Towards a 3D description of the material including attenuation and optimisation by inversion. - In: Leger A. (Hrsg.), Deschamps M. (Hrsg.): Ultrasonic Wave Propagation in Non Homogeneous Media. Berlin: Springer, 2009. S. 15-24.
- [82] Gengembre N., Lhemery A.: Combined effects of anisotropy and heterogeneity of materials on ultrasonic field radiation. Brunswick, Maine: American Institute of Physics, AIP Conf. Proc. 615, 815 (2002)
- [83] Erstarrungsgefüge und Textur von Schmelzschweißplattierungen aus Chrom- Nickel-Stählen für Kernreaktorkomponenten. Schweißen und Schneiden, 26 (1974), Heft 2.

- [84] Daley P.F., Hron F.: Reflection and transmission coefficients for transversely isotropic media. Bull., Seis. Soc. Am., 67, 1977. S. 661-675.
- [85] Thomsen L.: Weak elastic anisotropy, Geophysics, 51, 1986. S. 1954-1966.
- [86] Nelder J. A., Mead R.: A Simplex Method for Function Minimization. Computer Journal, 7; 308-313, 1965..
- [87] Oberle H. J.: Simplexmethode nach Nelder, Mead. Vorlesungsskript, Universität Hamburg, 2012, S. 20-23
- [88] Dugan S., Wagner S., Zickler S.: Herstellung von Testkörpern mit realistischen Fehlern für die Ultraschallprüfung. Fortschr.-Ber. der Jahrestagung 2010 der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP), Erfurt, 2010
- [89] Acoustic Control Systems: <http://acsys.ru/eng/>
- [90] EN-12668-1 „Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung - Teil 1: Prüfgeräte“
- [91] Jermolov I.N., Aljoschin N.P, Potapov A. I., Sukhorukov V.V. (Hrsg.) : Zerstörungsfreie Prüfung. Band 2. „Vysshchaja schkola“-Verlag, Moskau, 1991. S. 77
- [92] NVIDIA Corporation, Grafikkarte GeForce GTX 690: <http://www.nvidia.de/object/article-keynote-de.html>
- [93] Pudovikov S., Dobmann G.: Verfahren zum Prüfen eines zu untersuchenden Objekts, Prüfsystem zum Prüfen eines Objekts und Programm Deutsche Patentanmeldung, Aktenzeichen bei DPMA 10 2013 110 969.1, Anmeldetag 02.10.2013
- [94] Pudovikov S., Bulavinov A., Pinchuk R., Ramanan S.V.: Quantitative Ultraschallprüfungen an anisotropen Materialien mittels Sampling Phased Array Technik. In: DGZfP-Jahrestagung 2010, Erfurt. ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, DGZfP-Jahrestagung 2010, BB 122-CD, Berlin, 2010
- [95] Pudovikov S., Bulavinov A., Pinchuk R.: Innovative Ultrasonic Testing (UT) of Nuclear Components by Sampling Phased Array with 3D Visualization of inspection results. - In: 8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Berlin, Germany, 29<sup>th</sup> September – 1<sup>st</sup> October 2010
- [96] Pudovikov S., Boller C. Bulavinov A.: Quantitative ultrasonic testing of acoustically anisotropic materials with verification on austenitic and dissimilar weld joints. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Volume 31, AIP Conference Proceedings 1430, 2012, S. 881-888

- [97] Pudovikov S., Bulavinov A.: Verbesserter Fehlernachweis und Analyse von Anzeigen bei der Ultraschallprüfung von kerntechnischen Komponenten. Abschlussbericht zum GRS-Vorhaben Nr. 1501344, Berichts-Nr. 100129-E, Saarbrücken, September 2010
- [98] Pudovikov S., Walte F., Bulavinov A.: Entwicklung einer innovativen Ultraschall-Prüftechnik für den Fehlernachweis und die Größenbestimmung an austenitischen Schweißnähten und Mischschweißnähten im Primärkreis von KKW (vorwiegend Längsfehlerprüfung). Abschlussbericht zum GRS-Vorhaben Nr. 1501370, Berichts-Nr. 130103-E, Saarbrücken, Mai 2013



## Anlagen

### Anlage 1: Flußdiagramme der Ray-Tracing-Simulation und „Gradient Elastic Constant Descent“ -Methode

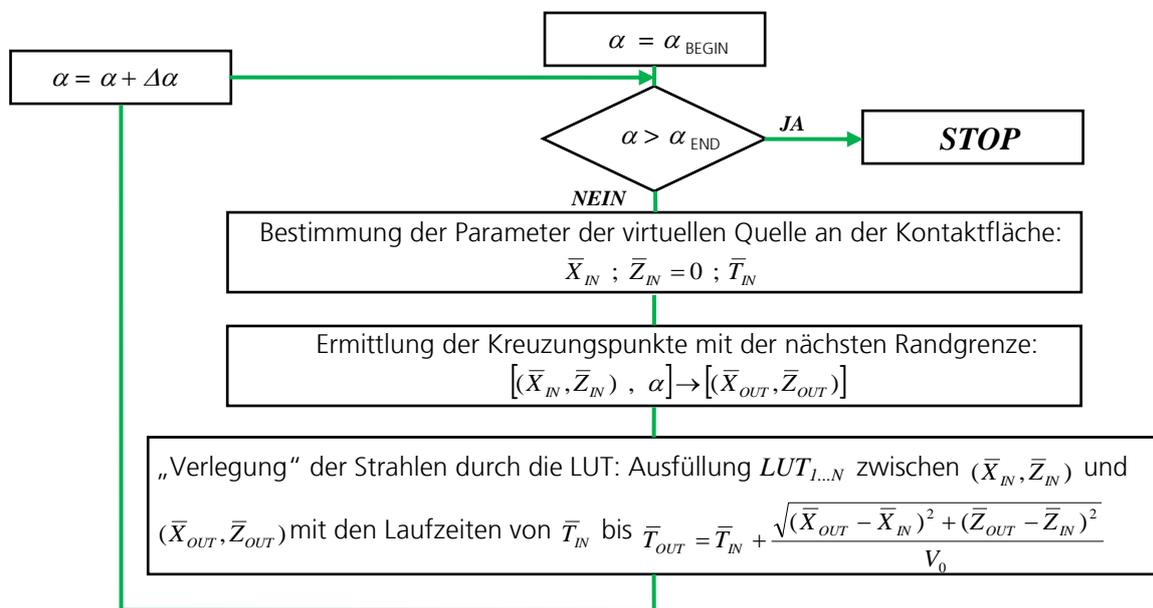


Abb. A1-1: Flußdiagramm der Ray-Tracing-Procedure im Betriebsmodus „Isotrop“

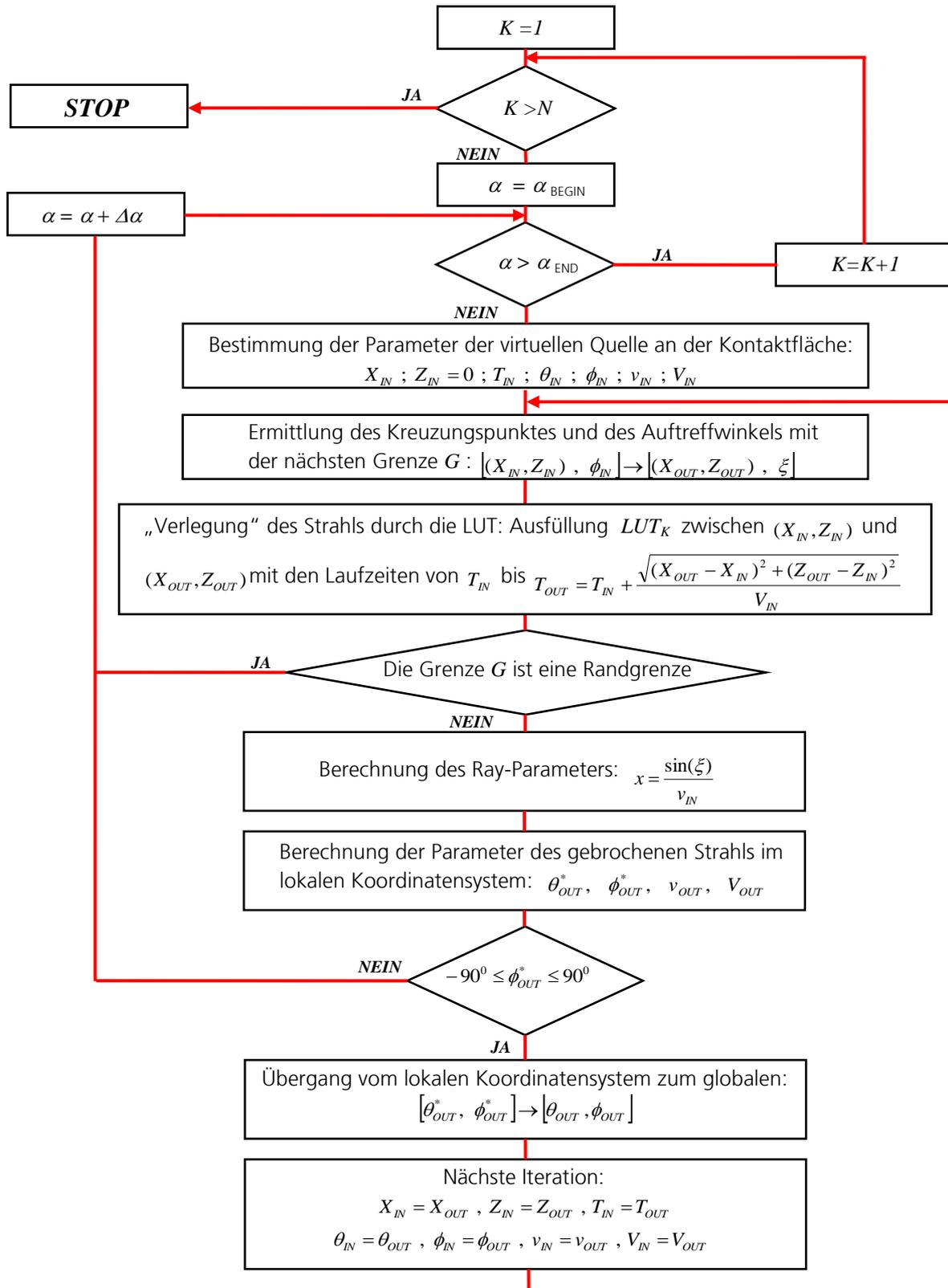
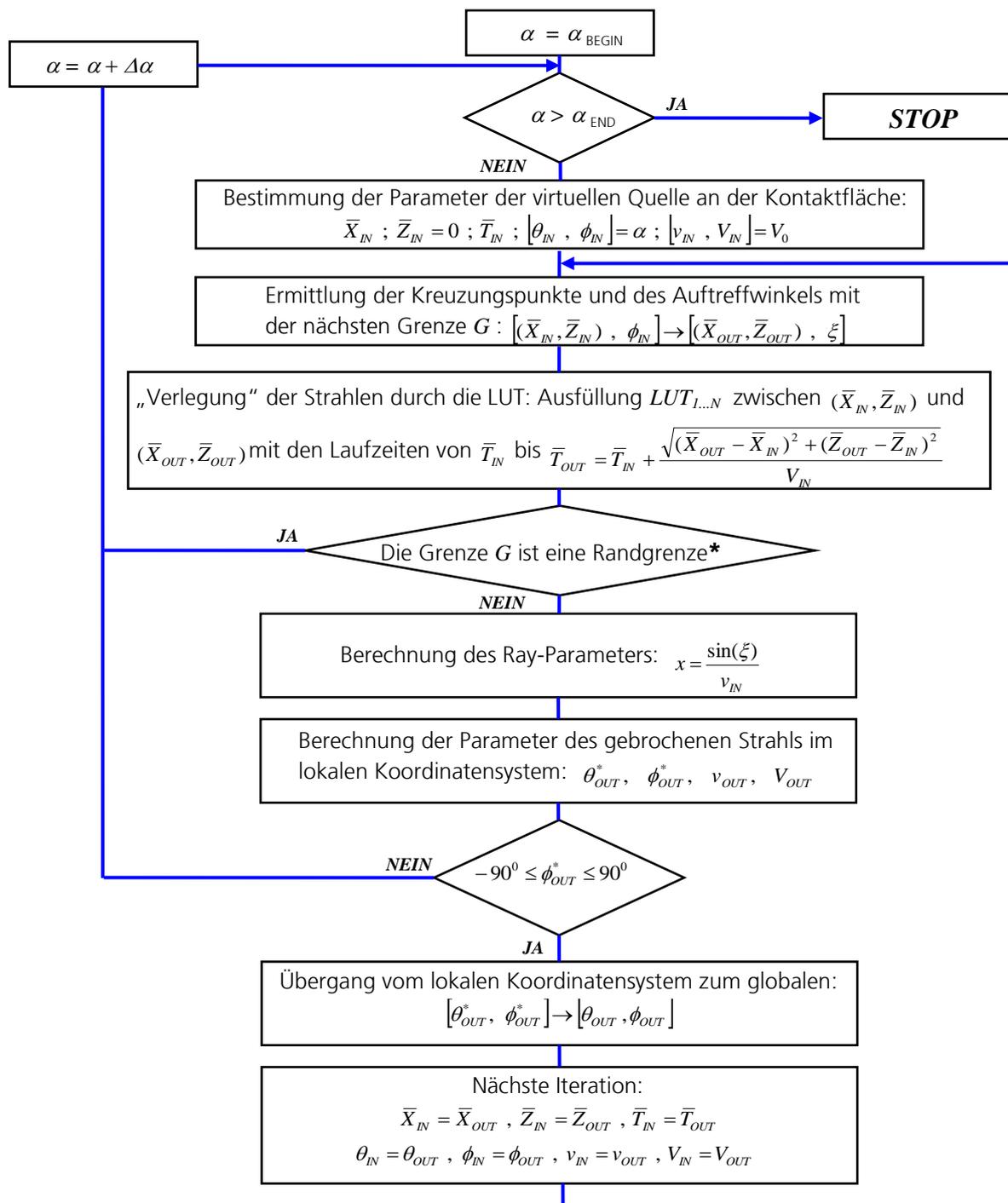


Abb. A1-2: Flußdiagramm der Ray-Tracing-Procedure im Betriebsmodus „Anisotrop“



\* 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. A1-3: Flußdiagramm der Ray-Tracing-Procedure im Betriebsmodus „Anisotrop fast“

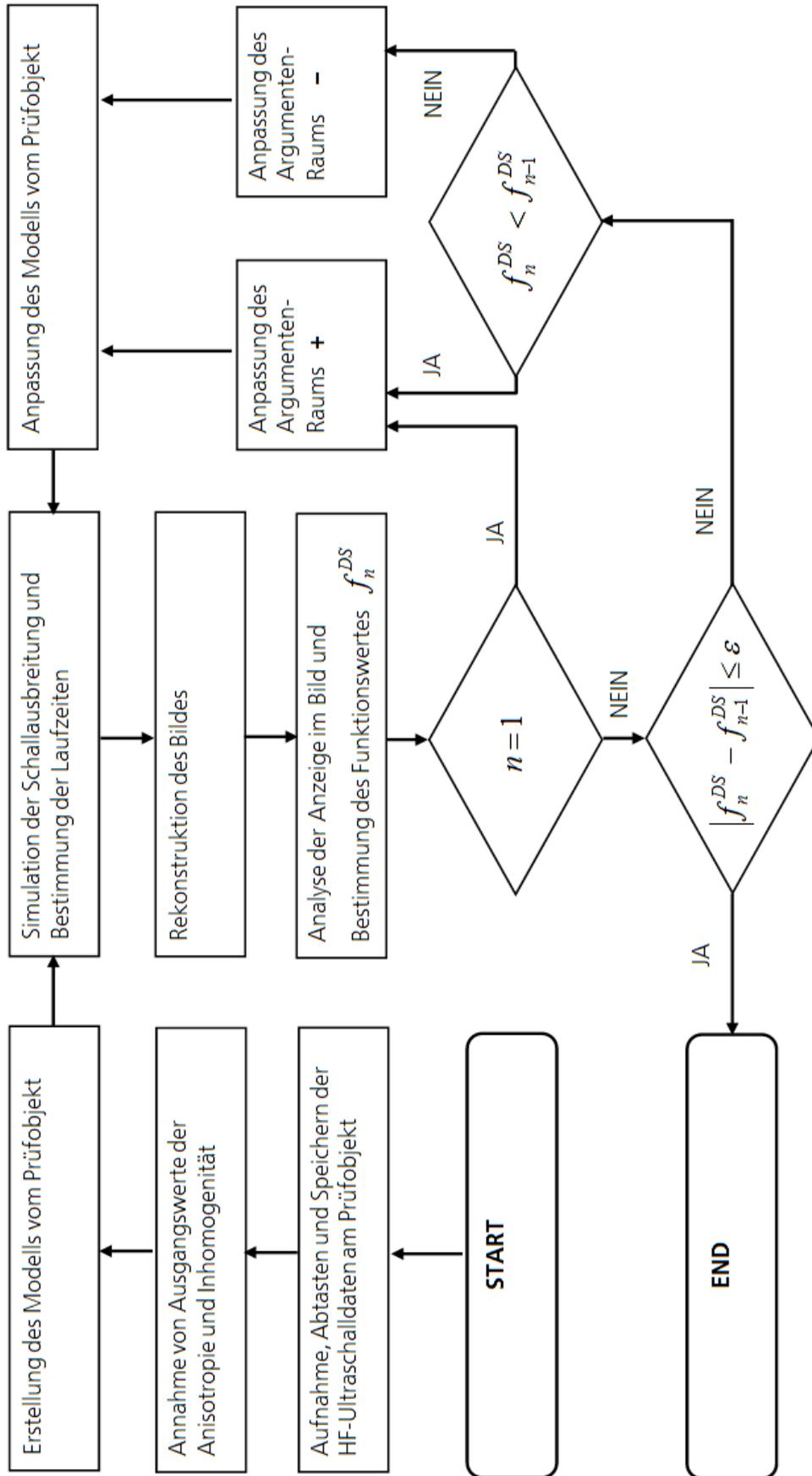


Abb. A1-4: Allgemeines Flußdiagramm der iterativen GECDM-Procedur

## Anlage 2: Technische Parameter 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 ns  $\pm$  3 ns (10% bis 90% Amplitude)
- Abfallzeit Sendeimpuls 20 ns  $\pm$  5 ns (90% bis 10% Amplitude)
- Sender-Ausgangsimpedanz 50 Ohm
- Impulsfrequenz bis 10 KHz, abhängig von Sendeimpulsbreite, Sendespannung, Abtastrate und Prüfbereich
- Sendesignalverschiebung je Kanal 0 ns bis 12,8  $\mu$ 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  $\mu$ V<sub>SS</sub>
- max. Eingangsspannung 10 V<sub>SS</sub>
- Eingangsdynamik > 100 dB
- Verstärkungseinstellung Verstärkungseinstellung je Kanal > 100 dB einstellbar in 0.1 dB Schritten
- Kennlinie des Empfangsverstärkers linear
- Vertikallinearität <  $\pm$  2% BSH
- Tiefenausgleichskurve 0 – 80 dB Einstellbereich, 0.1 dB Schrittweite, 256 Stützstellen, min. Stützstellenabstand 1  $\mu$ s, der Einstellbereich wird um den Wert der Grundverstärkung reduziert, Steilheit max. 40 dB/ $\mu$ 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  $\mu$ 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

