

## Experimentelle Verifizierung von Modellvorstellungen zur Schallausbreitung in anisotropen Materialien

H. Ernst\*, V. K. Munikoti, H. Wüstenberg, Berlin

### Zusammenfassung

Die Schallausbreitung in akustisch anisotropen Materialien wird messtechnisch vollständig nach Ort und Zeit auf eine Art erfasst, die eine anschauliche Beschreibung der Schallausbreitungsvorgänge durch Momentaufnahmen der Wellenfelder ermöglicht. Zur Visualisierung wird ein Verfahren eingesetzt, das es erlaubt, Momentaufnahmen der Wellenfeldausbreitung auf Festkörperoberflächen zu erstellen. Zur Überprüfung des Verfahrens werden charakteristische Schallausbreitungsphänomene in akustisch anisotropen Medien mit einer Punktquellensynthese modelliert und durch Vergleich mit gemessenen bildlichen Darstellungen bestätigt.

### 1. Einführung

Bei der Werkstoffprüfung mit Ultraschall wird häufig angenommen, dass die untersuchten Materialien isotrop und homogen sind. Unter dieser Annahme erfolgt die Ausbreitung der elastischen Wellen in allen Richtungen mit gleicher Schallgeschwindigkeit und die Materialeigenschaften sind über das gesamte Volumen konstant.

In der Praxis werden aber vielfach Materialien eingesetzt, die elastisch anisotrop sind oder eine große Anzahl von Inhomogenitäten enthalten oder aber auch beides. Beispiele für anisotrope Materialien sind:

- faserverstärkte Kompositwerkstoffe, wie zum Beispiel kohlefaser- oder glasfaserverstärkte Verbundwerkstoffe
- einkristalline Werkstoffe, die zum Beispiel bei Gasturbinenschaufeln eingesetzt werden
- polykristalline Materialien mit einer Vorzugsorientierung der Kristallite, wie zum Beispiel austenitisches Schweißgut und austenitischer Stahlguss.

Beispiele für inhomogene Werkstoffe sind Kompositmaterialien, Bimetalle, Beton aber auch austenitische Schweißnähte.

Da in anisotropen, inhomogenen Werkstoffen die vereinfachten Annahmen zur Schallausbreitung in isotropen Werkstoffen nicht mehr gelten, müssen auch die zum Einsatz kommenden Prüftechniken angepasst werden.

Prüfaufgaben können nur dann erfolgreich gelöst werden, wenn man die physikalischen Vorgänge bei der Ultraschallausbreitung kennt. Es ist daher von großer Bedeutung, über eine gesicherte Kenntnis zur Ausbreitung von elastischen Wellen in anisotropen Materialien zu verfügen.

Die charakteristischen Phänomene bei der Schallausbreitung in anisotropen Materialien sind:

- Die Schallgeschwindigkeiten sind richtungsabhängig, das heißt, eine Funktion der Einschallrichtung.
- Es können sich im ungestörten Raum drei Wellenarten mit zueinander orthogonalen Schwingungsrichtungen ausbreiten (während in isotropem Material beliebige Schwingungsrichtungen für transversale Wellen möglich sind).
- Die Schwingungsrichtungen der drei Wellenarten sind in anisotropen Materialien im Allgemeinen weder rein longitudinal noch transversal, sondern setzen sich aus Anteilen beider Schwingungsrichtungen zusammen. Die Quasi-Wellen werden entsprechend ihrer Hauptschwingungsrichtung bezeichnet: Quasi-Longitudinalwelle (qL), erste Quasi-Transversalwelle (qT1) und die zweite Quasi-Transversalwelle (qT2).
- Es kommt zu einer Richtungsauerspaltung zwischen Phasen- und Gruppengeschwindigkeit, d.h. die Ausbreitungsrichtung der Ultraschallenergie (Richtung der Gruppengeschwindigkeit) unterscheidet sich im Allgemeinen von der Richtung der Phasenfront (Richtung der Phasengeschwindigkeit), der Ablenkungswinkel ist dabei eine Funktion der Einschallrichtung.

- Der Betrag der Gruppengeschwindigkeit unterscheidet sich im Allgemeinen vom Betrag der Phasengeschwindigkeit.

Die Notwendigkeit, für die Praxis der Ultraschallprüfung an anisotropen Materialien Verständnis über die teilweise sehr komplexen Wellenausbreitungsvorgänge anschaulich zu vermitteln, führte zu einer Reihe von Modellansätzen, die sehr genaue Aussagen zu diesen Schallausbreitungsphänomenen machen. Die Berechnung der Schallausbreitung erfolgt dabei nach numerischen [3, 5] approximativen [8, 9] oder analytischen Ansätzen [7]. Besonders aufschlussreiche Erkenntnisse ergeben sich aus den Modellierungen dann, wenn Wellenfelder in der Einschallebene der Prüfköpfe zu festen Zeitpunkten dargestellt werden (z.B. EFIT-Modellierung [3]). Anhand dieser anschaulichen Wellenfeldbilder kann das Ausbreitungsverhalten elastischer Wellen in anisotropen Werkstoffen gut studiert werden.

Die messtechnische Verifizierung der Aussagen der Modellierungen erfolgte bis jetzt nur durch die Messung einzelner Teilaspekte der Wellenausbreitung wie zum Beispiel der Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit und der radialen Schalldruckverteilung der qL-Welle. Mit den Ergebnissen dieser konventionellen Messmethoden war es bisher jedoch nicht möglich, die in zahlreichen Modellansätzen berechnete asymmetrische Form der Wellenfelder sowie das ungewöhnliche Fokussierungs- bzw. Divergenzverhalten, speziell der qT1-Welle, in einer anschaulichen Form darzustellen und somit zu verifizieren.

Ziel dieser Arbeit war es daher, Schallausbreitungsphänomene in anisotropen Materialien in Form von Momentaufnahmen der Wellenausbreitung in der Einschallebene zu messen und mit Berechnungen zu vergleichen. Dazu wird eine Visualisierungstechnik eingesetzt [1, 2].

Nicht zuletzt sollte mit dieser Arbeit auch das intuitive Verständnis der Schallausbreitungsphänomene in anisotropen Materialien gefördert wer-

\* H. Ernst ist Träger der Ernst-Schiebold-Gedenkmünze 2004

den, um damit die Ausbildung von Personal für die Ultraschallprüfung an anisotropen austenitischen Komponenten z.B. in Kernkraftwerken zu unterstützen.

## 2. Berechnung der Schallausbreitung

Zur Begleitung der Messergebnisse und deren wechselseitiger Verifikation wurden Schallausbreitungsphänomene in anisotropen Materialien mittels Punktquellensynthese modelliert. Der verwendete Modellansatz [9], mit dem sich die Schallfelder beliebig geformter Quellen simulieren lassen, nutzt die Synthese von elastischen Wellenfeldern aus ebenen Wellen, basierend auf dem Huygensschen Prinzip. Mit dieser halb analytischen und halb numerischen Methode lässt sich die Schallausbreitung in homogenen anisotropen Medien schnell berechnen.

Abbildung 2.1. zeigt die geometrische Konfiguration von  $k$  Quellpunkten  $Q$ , welche die Schwingeroberfläche ersetzen. Zur Berechnung der Teilchenverschiebung  $u$  an einem beliebigen Aufpunkt  $P(x,z)$  innerhalb des anisotropen Materials werden die von den Quellpunkten  $Q$  emittierten Punktquellenfelder entsprechend ihrer Laufzeit und Richtwirkung zum Punkt  $P(x,z)$  aufsummiert (Gleichung 2.1).

Wobei  $r$  (mm) der Abstand zwischen der Punktquelle  $Q$  und dem Aufpunkt  $P(x,z)$  innerhalb des anisotropen Materials,  $j = \sqrt{-1}$  und  $f$  die Frequenz (MHz) ist.

Bei anisotropen Materialien muss beachtet werden, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalls richtungsabhängig ist (hier durch den Winkel  $\Theta$  angedeutet) und dass die von den Punktquellen  $Q$  emittierten

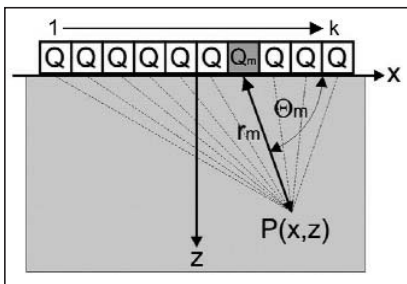


Abbildung 2.1: Geometrische Konfiguration einer linienförmigen Prüfkopfapertur mit zehn Quellpunkten

$$u(x, z) = \sum_{m=1}^k \frac{1}{r_m} \exp j \left( \frac{2\pi f}{c_g(\Theta_m)} r_m \right) \cdot \xi(\Theta_m)$$

Gleichung 2.1

Elementarwellen eine Form haben, die identisch ist zu der geometrischen Form der Strahlenfläche ebener Wellen. Für die Ausbreitung der einzelnen Elementarwellen müssen daher die aus dem Ansatz der ebenen Welle stammenden Lösungen für die Energiegeschwindigkeit  $c_g$  (mm/s) verwendet werden [4].

Die bei anisotropen Materialien ebenfalls richtungsabhängigen Punkttrichtwirkungen  $\xi$  wurden nach Berechnung der Reflexionskoeffizienten [6] nach dem Reziprozitätstheorem bestimmt.

Um die transienten Teilchenverschiebungsfelder impulsartig angeregter Prüfköpfe zu definierten Zeitpunkten  $t$  zu berechnen, wurden die zeitharmonischen Teilchenverschiebungsfelder für diskrete Komponenten des Frequenzspektrums des verwendeten Prüfkopfes superponiert. Durch die a priori eingeführte Verzögerungszeit  $t$ , abgeleitet aus der Geometriezuordnung von Prüfkopf und Messort, kann der Schwerpunkt des modellierten Impulses im Zeitbereich beliebig verschoben werden.

In den Experimenten wurde das Ausbreitungsverhalten von qT1-Wellen in transversal isotropem austenitischem Stahlguss (X5CrNi1810), in einer Ebene, welche Stengelkristallorientierung enthält, und in einer Symmetrieebene eines kubischen Silizium-Einkristalls untersucht.

Durch diese Randbedingungen ergeben sich folgende Vereinfachungen für die Simulationsrechnungen:

- Die Modellierungen wurden nur für eine Wellenausbreitung in der Meridianebene (Ebene, die Stengelkristallrichtung enthält) des transversal isotropen Kristallsystems (austenitischer Stahlguss) beziehungsweise in den {100}-Symmetrieebenen des kubischen Kristallsystems (Si-Einkristall) durchgeführt, da in diesen speziellen Ebenen der Vektor der Gruppengeschwindigkeit

$c_g$  der qL- und qT1-Welle immer in der Einschallebene des Laborkoordinatensystems liegt und somit nur zwei Komponenten hat, was den Rechenaufwand deutlich reduziert.

- Die Berechnung der Schallausbreitung wurde auf den zweidimensionalen Fall reduziert. Kreiskolbenförmige Prüfkopfaperturen wurden zum Beispiel durch eine streifenförmige Quelle ersetzt.
- Desweiteren wurde angenommen, dass sich beim Einsatz von Vorlaufstrecken zwischen Prüfkopf und Probenmaterial in dieser Ebene Wellen ausbreiten. Die Anregung auf der ebenen oder gekrümmten Grenzfläche ist konstant. Unterschiedliche Schalllaufwege in der Vorlaufstrecke werden durch eine zeitverzögerte Anregung der Punktquellen auf der Grenzfläche berücksichtigt.

## 3. Visualisierung der Schallausbreitung

Zur Visualisierung der Wellenausbreitung im Bereich der Einschallebene des Prüfkopfes in opaken anisotropen Festkörpern wurde eine von Köhler vorgestellte Methode angewendet [1, 2].

In Abbildung 3.1 ist das Prinzip der Visualisierungstechnik dargestellt. Die Messanordnung besteht aus einem Ultraschallgerät, einem Sendeprüfkopf, einer elektrodynamischen Messsonde (Empfänger), einem Manipulatorsystem und einem Messrechner mit Transientenrekorder zur A/D-Wandlung der Ultraschallsignale.

Der Sendeprüfkopf wurde auf einer vertikalen Fläche des Testkörpers angekoppelt, während die elektrodynamische Sonde (Empfänger) in üblicher C-Bild Technik mäanderförmig über die horizontale Oberfläche des Testkörpers geführt wurde. An jeder durch das Messraster definierten Position wurde ein A-Bild abgespeichert. Aus den gemessenen A-Bildern können für definierte Zeitpunkte C-Bilder mit einer Momentanaufnahme der räumlichen Wellenausbreitung abgeleitet werden.

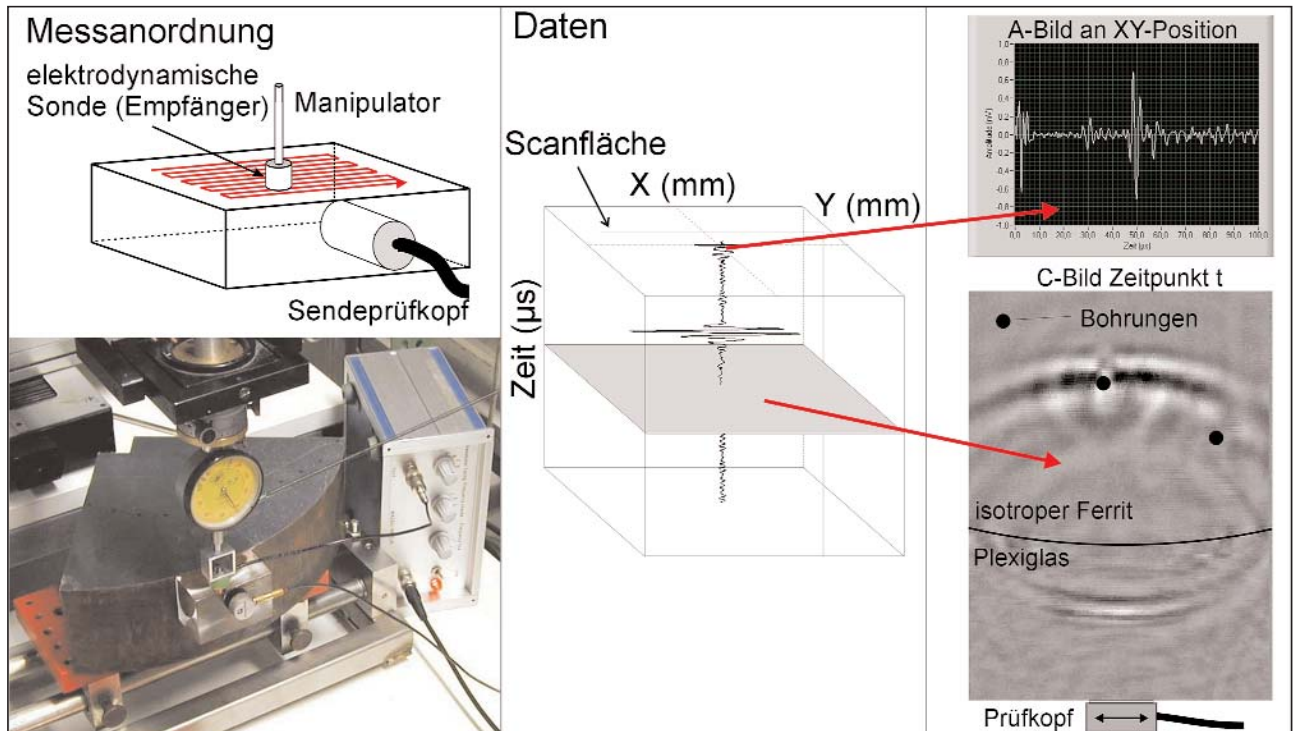


Abbildung 3.1: Visualisierungstechnik; links: Messanordnung; mitte: Messdaten; rechts: Ultraschallbilder

Die Signale werden mit einer elektro-dynamischen Sonde [10] empfangen. In dem zeitlich konstanten Magnetfeld der Sonde werden im Probekörper bei Erregung durch die Teilchenverschiebung der einfallenden Welle Wirbelströme erzeugt, deren magnetisches Wechselfeld in der Messspule eine der Teilchenverschiebung proportionale Spannung erzeugen. Die Spule ist so im Magnetfeld angeordnet, dass eine Kopplung der Spule mit Wirbelstrombahnen vorwiegend dort gegeben ist, wo Normalkomponenten des Magnetfeldes vorliegen. Daraus folgt, dass vor allem Tangentialkomponenten der Teilchenverschiebung, also von Wellenmoden, die in der Einschallebene polarisiert sind, empfangen werden können. Um den Einfluss des Verstärkers auf das empfangene Signal gering zu halten, wurde eine breitbandige Einstellung gewählt, die an das Frequenzspektrum des Prüfkopfsignals angepasst ist.

Zur Frage, ob sich das Messverfahren zum Studium der Wellenausbreitung von tangential zur Scanfläche polarisierten Transversalwellen eignet, wurden folgende Überlegungen durchgeführt. Berechnet man mit dem Ansatz der ebenen Welle (vereinfachende Randbedingung) die Polarisationsvektoren der  $qT1$ -Welle in den zu untersuchenden Symmetrieebenen, so liegen diese immer in der Einschall-

ebene, also tangential zur Grenzfläche. Eine einfallende Transversalwelle, die tangential zur Grenzfläche polarisiert ist, erzeugt an der Grenzfläche nur Spannungskomponenten, die ebenfalls tangential zur Grenzfläche orientiert sind. Das heißt, es gibt keine gemeinsamen Spannungskomponenten mit den beiden anderen Wellenmoden  $qL$  und  $T2$ , die in einer Ebene senkrecht zur Grenzfläche polarisiert sind. Die Grenzflächenbedingung ist somit durch eine reflektierte Welle derselben Polarisation erfüllt. Die tangential zur Grenzfläche polarisierte Transversalwelle wird total reflektiert, das heißt, die Grenzfläche stört das Ausbreitungsverhalten von Transversalwellen, die tangential zur Grenzfläche polarisiert sind, unter den angenommenen Randbedingungen nicht.

Alternativ zur elektro-dynamischen Sonde kann als Empfänger auch ein berührungsloses Laser-Doppler-Vibrometer eingesetzt werden, mit dem die Teilchenverschiebung und Schwingungsrichtung gemessen werden können [11].

Allerdings weisen die derzeit kommerziell verfügbaren Laservibrometer noch eine, im Vergleich zu den elektro-dynamischen Sonden, erheblich kleinere Empfindlichkeit auf, was eine zeitraubende Signalmitteilung beim

Messen zur Unterdrückung des Rauschens erzwingt. Es ist aber zu erwarten, dass Laser-Messsysteme mit kurzer Distanz zur Messfläche und daher verbesserter Erfassung der an einem Messpunkt gestreuten Lichtmenge die Empfindlichkeit steigern werden. Dann kann man allerdings eine Messfläche nicht mehr durch Schwenken des Laserstrahls abtasten, sondern muss eine mechanische Rasterbewegung wie bei der elektro-dynamischen Sonde ausführen.

#### 4. Ergebnisse: Vergleich von Messungen und Modellierungen

In den folgenden Abbildungen werden gemessene und berechnete Schallausbreitungsphänomene in anisotropen Materialien gegenübergestellt. Dabei wird das Ausbreitungsverhalten von  $qT1$ -Wellen in transversal isotropem austenitischem Stahlguss, in einer Ebene, welche die Stengelkristallorientierung enthält, und in der Symmetrieebene eines kubischen Silizium-Einkristalls untersucht.

Abbildung 4.1. zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen an einem Silizium-Einkristall. Einschallt wurde senkrecht mit einem Transversalwellenprüfkopf (Panametrics / V153 / 1 MHz / 12mm), wobei die Schwingungsrichtung des Transversalwellen-

prüfkopfes in der Einschallebene lag und somit eine qT1-Welle im Silizium erzeugt wurde. Die Einschallebene war die von der [100]-Richtung und der [010]-Richtung aufgespannte {100}-Symmetrieebene des Silizium-Einkristalls und lag somit tangential zur Scanfläche.

In Abbildung 4.1. sind gemessene und berechnete Schnappschüsse der Wellenfeldausbreitung (Schalllaufzeit 6,5  $\mu$ s) der qT1-Welle für Einschallung in die kristallographische [100]-, [210]- und [110]-Richtung gegenübergestellt. Im oberen Teil der Abbildung ist die Messanordnung mit dem Labor-

(x,z) und dem Kristallkoordinatensystem ([100], [010]) dargestellt. Die roten Rahmen in den Abbildungen markieren das Mess- und Berechnungsfeld.

In den Intensitätsdiagrammen mit den Momentaufnahmen der Wellenfelder zu festen Zeitpunkten wird die Komplexität der Ultraschallausbreitung in anisotropen Materialien auf einen Blick deutlich. Gut zu erkennen sind die unterschiedlichen Formen und Geschwindigkeiten der Wellenfelder für die verschiedenen Einschallrichtungen im Silizium-Einkristall.

Bei Einschallung in die [100]-Richtung (Abbildung 4.1. links) konnte das als *Cusp* bezeichnete Phänomen der sichelförmigen Doppeldeutigkeit der qT1-Welle im Bereich der Symmetriechsen erstmals experimentell verifiziert werden. Wird in [210]-Richtung des Si-Einkristalls eingeschallt (Abbildung 4.1. mitte), kann man eine deutliche Ablenkung des Wellenfeldes hin zur kristallographischen [100]-Richtung beobachten.

Das Phänomen der Ablenkung der Energie der Ultraschallwelle in anisotropen Materialien lässt sich hier anschaulich nachvollziehen. Die Energie des Wellenfeldes „rutscht“ auf den Wellenfronten hin zur kristallographischen [100]-Richtung und breitet sich in dieser Richtung mit Energiegeschwindigkeit aus. Deutlich zu erkennen ist auch die asymmetrische Form des Wellenfeldes mit den als Folge von Interferenzerscheinungen entstehenden Amplitudenschwankungen und Unstetigkeitsstellen. Bei einer Einschallung in die [110]-Richtung (Abbildung 4.1. rechts) breitet sich ein sehr divergentes Wellenfeld mit einer vergleichsweise geringen Schallgeschwindigkeit aus.

In Abbildung 4.2. sind Ausbreitungsphänomene dargestellt, die bei Einschallung mit einem konventionellen Winkelprüfkopf in stengelkristallinem Austenit auftreten. Der Winkelprüfkopf hatte einen Keilwinkel von 36,4° und würde somit in isotropem ferritischem Stahl eine Transversalwelle unter 45° erzeugen.

In der in Abbildung 4.2. dargestellten Messanordnung wurde mit diesem Keilwinkel von 36,4° in Testblöcke aus transversal isotropem austenitischem Stahlguss eingeschallt. Die Stengelkristallorientierung lag dabei immer

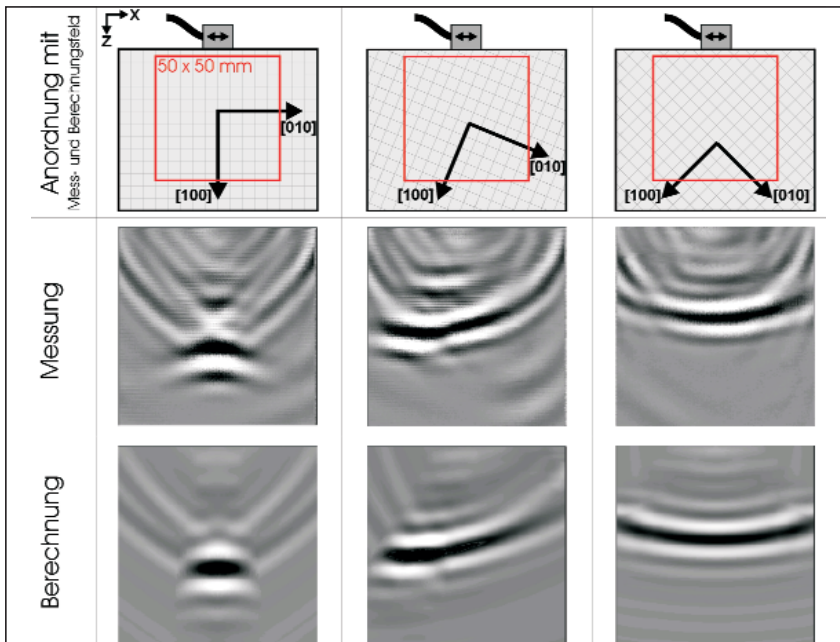


Abbildung 4.1.: Gemessene und berechnete Momentaufnahmen der Wellenausbreitung der qT1-Welle bei Senkrechteinschallung in einen Si-Einkristall. Zeitpunkt: 6,5  $\mu$ s; oben: geometrische Konfiguration; links: Einschallung in [100]-Richtung; mitte: Einschallung in [210]-Richtung; rechts: Einschallung in [110]-Richtung; Prüfkopf: Panametrics/V153/1 MHz/12 mm

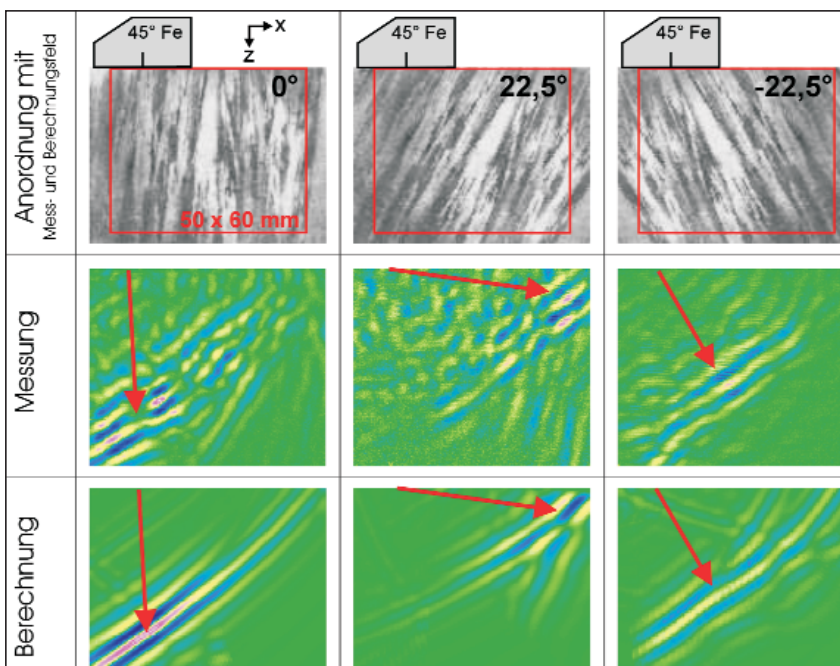


Abbildung 4.2.: Gemessene und berechnete Momentaufnahmen ( $t = 30,5 \mu$ s) der Wellenfeldausbreitung von qT1-Wellen bei Einschallung mit Winkelprüfkopf (Keilwinkel 36,4°) in stengelkristallinem Stahlguss; Stengelkristallorientierung immer tangential zur Messfläche, aber hinsichtlich Koppelfläche variiert; links: 0°; mitte: 22,5°; rechts: -22,5°

tangential zur Messfläche. Bei konstantem Keilwinkel wurde die Stengelkristallorientierung relativ zur Koppelfläche variiert ( $0^\circ$ ,  $22,5^\circ$  und  $-22,5^\circ$ ) um zu zeigen, wie deutlich die Ausbreitung der qT1-Welle von der Richtung der Stengelkristallite beeinflusst wird.

Sind die Stengelkristallite senkrecht zur Koppelfläche orientiert (Abbildung 4.2. links), so ist zu erkennen, dass die Energie entlang der Wellenfronten nach unten rutscht und sich nahezu senkrecht in Richtung der Normalen im Schalleintrittspunkt ausbreitet, während die Wellenfronten nach rechts weisen. Im starken Gegensatz dazu breitet sich die Energie des Wellenfeldes bei einer Stengelkristallorientierung von  $22,5^\circ$  relativ zur Koppelfläche (Abbildung 4.2. links) unter einem sehr flachen Winkel aus.

### 5. Fazit

Charakteristische Schallausbreitungsphänomene in anisotropen Materialien können durch die vorgestellte Messtechnik in einer anschaulichen Form dargestellt werden, die dann mit den Ergebnissen von Modellierungen vergleichbar sind. Durch den Einsatz einer Visualisierungstechnik können Momentaufnahmen der Wellenausbreitung in der Einschallebene erstellt werden, mit denen sich einige der für anisotrope Werkstoffe typischen Schallausbreitungsphänomene verifizieren lassen.

Insbesondere konnten

- die asymmetrische Form der Wellenfelder
- deren komplexes Fokussierungs- und Divergenzverhalten
- die richtungsabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenfelder

durch Modell und Experiment bestätigt werden.

Die gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Wellenfeldern bestätigt die Richtigkeit von Näherungsmodellen und Messtechnik wechselseitig. In anschaulichen Momentaufnahmen der Wellenfelder wird die Komplexität der Ultraschallausbreitung in anisotropen Materialien deutlich. Die Wellenfeldbilder zeigen in einer intuitiv verständlichen Weise, dass die Ultraschallprüfung von anisotropen Werkstoffen ohne die

Berücksichtigung der elastischen Anisotropie und der durch diese hervorgerufenen Effekte auf die Schallausbreitung kaum möglich ist. Die Darstellungen eignen sich auch für die Ausbildung und die Schulung von Personal, das sich mit der Prüfung anisotroper Materialien beschäftigt.

Die Erweiterung des Modellansatzes hin zu praxisnahen Geometrien mit virtuellen Reflektoren und zu einer dreidimensionalen Berechnung der Schallausbreitung für beliebig orientierte Kristallsysteme und Texturen unter Berücksichtigung aller relevanten Wellenmoden ist möglich und hat sicher eine große prüfpraktische Relevanz.

### Literaturverzeichnis

[1] B. Köhler, F. Schubert. Scan-Technik zur Schallfeldvermessung in Festkörpern. Materialprüfung, 38: 298-301, 1996

[2] B. Köhler and Ch. Schurig. Visualization of ultrasonic fields on solids. World Congress on Ultrasonics, 459-462, 1995

[3] K.J. Langenberg and R. Marklein and K. Mayer. Applications to nondestructive testing with ultrasound. Scattering, (Eds.: R. Pike, P. Sabatier) Vol.1. Academic Press, San Diego, 2002.

[4] K. J. Langenberg. Punktquellensynthese in anisotropen Medien: Verwendung der Phasen- oder Gruppengeschwindigkeit? Diskussionsbeitrag: Seminar 'Leistungsnachweis bei ZfP-Methoden' der DGZfP. Gesamthochschule Kassel, FB 16, 34 109 Kassel, Berlin, 4.-5.11.1993

[5] R. Marklein. Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik. Dissertation, Fachbereich Elektrotechnik der Universität Gesamthochschule Kassel, 1997

[6] V.K. Munikoti, E. Neumann. Reflection and transmission energy coefficients at the interface between austenitic base and weld metal. J. Phys. D, Appl. Phys. 25: 1504-1512, 1992

[7] E. Neumann. Ultraschallprüfung von austenitischen Plattierungen, Mischnähten und austenitischen Schweißnähten. 1995. Expert Verlag

[8] M. Spies. Elastic waves in homogeneous and layered transversely isotropic media: plane waves and Gaussian wave packets. A general approach. JASA, 95: 1748-1760, 1994.

[9] M. Spies. Elastische Wellen in transversal-isotropen Medien: Ebene Wellen, Gausssche Wellenpakete, Greensche Funktionen, elastische Holographie. Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Ber.-Nr. 920175-TW, Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 06. 11. 1992

[10] H. Wüstenberg. Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall. Dissertation, Technische Universität Berlin, D 83. 1974

[11] L. Zipser, S. Lindner, R. Behrendt. Interferometrische Messung und Visualisierung von Schallwellen und Turbulenzen. Technisches Messen. 69: 275-281, 2002

### Über den Autor:

Dr. Hardy Ernst studierte Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.



Er ist Stufe 3-zertifiziert (UT) und seit 1991 in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung tätig.

Seit dem Abschluss der Promotion auf dem Gebiet der Ultraschallprüfung anisotroper Materialien arbeitet er an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.