

Vergleich von Modellrechnung und Schallfeldmessung an Gruppenstrahlerprüfköpfen

Uwe VÖLZ, Heinz MRASEK,
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12200 Berlin
uwe.voelz@bam.de

Kurzfassung. Die Modellierung von Schallausbreitungsvorgängen ist eine notwendige Grundlage für die Optimierung von Prüfparametern bei der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall. Das gilt insbesondere bei der Anwendung der Gruppenstrahlertechnik. Außerdem besteht vielfach der Wunsch, die komplexen physikalischen Effekte bei der Schallausbreitung in Festkörpern anschaulich darzustellen.

Als Modell dient eine vollständige mathematische Beschreibung einer Punktquelle an der Oberfläche eines isotropen Halbraumes bei impulsförmiger Anregung. Ein Ansatz für die Erweiterung auf transversalisotrope Medien ist vorhanden. Die Berechnung der Schallfelder von ausgedehnten Schwingern und Schwingersystemen, wie bei einem Gruppenstrahler-Prüfkopf, erfolgt durch Überlagerung der Felder mehrerer Punktquellen mit der so genannten Punktquellensynthese.

Zur Verifizierung der Modellrechnungen wird ein Verfahren zur Schallfeldmessung verwendet, das sich durch seine einfache Handhabung und einen hohen Signal-Rausch-Abstand auszeichnet. Dabei wird das streifende Schallfeld an der Oberfläche von Festkörpern mit einer elektrodynamischen Sonde als Amplituden-Zeit-Funktion der parallel zur Oberfläche orientierten Teilchenverschiebung aufgezeichnet. Durch entsprechende Aufbereitung der Messdaten kann so der zeitliche Verlauf der Wellenfronten sichtbar gemacht werden.

An mehreren Beispielen werden gerechnete Simulationsergebnisse mit gemessenen Schallfeldverläufen von Gruppenstrahler-Prüfköpfen in Festkörpern verglichen. Daran kann zum einen gezeigt werden, dass die eingesetzte Methode zur Messung und Visualisierung von Schallfeldern an der Oberfläche von Festkörpern sehr anschauliche Darstellungen der Ultraschallausbreitung ermöglicht. Zum anderen ist erkennbar, dass mit dem hier verwendeten Punktquellenmodell der Verlauf von Schallfeldern mit qualitativ guter Übereinstimmung zu den Messdaten berechnet werden kann.

Einführung

Die Prinzipien der Ultraschallausbreitung in festen Medien sind seit langem bekannt und können heute durch mathematische Modelle recht umfassend beschrieben und simuliert werden. In der Praxis zeigt sich aber, dass gerade bei komplexen Geometrien, sowie inhomogenen und anisotropen Materialien die Modelle immer noch an ihre Grenzen stoßen. Das ist insbesondere in der fehlenden Möglichkeit begründet, die akustischen Eigenschaften inhomogener Prüfgegenstände vollständig mathematisch zu beschreiben.

Deshalb wird in letzter Zeit verstärkt nach Techniken gesucht, mit denen man die Schallausbreitung in solchen Materialien messen und anschaulich darstellen kann. Ziel dieser Entwicklung ist es, die Schallausbreitung in Festkörpern, insbesondere in solchen mit akustisch anisotropen Eigenschaften, besser zu verstehen und die Möglichkeit zu schaffen, die Simulationsrechnungen am realen Objekt zerstörungsfrei verifizieren zu können.

In der Literatur werden verschiedene Methoden zur messtechnischen Visualisierung der Ultraschallausbreitung in Festkörpern beschrieben. Am bekanntesten sind optische Verfahren wie die Schlierentechnik, die schon seit langem genutzt wird, um den momentanen Schallfeldverlauf im Inneren von optisch transparenten Materialien sichtbar zu machen. Heute kommen verstärkt lasertechnische Methoden, wie z. B. das Laserinterferometer, zum Abtasten von nicht transparenten Materialoberflächen zum Einsatz. Da diese Verfahren mit einem hohen technischen Aufwand verbunden sind, werden häufig auch einfachere Abtastverfahren, wie z. B. mit punktförmigen piezoelektrischen Aufnehmern, verwendet.

1. Schallfeldmessung

1.1 Messprinzip

Hier wird ein einfaches, aber leistungsfähiges Messverfahren mit elektrodynamischen Sonden verwendet ^{[1][3][4]}. Diese Sonden wandeln die Teilchenauslenkung an der Oberfläche eines elektrisch leitenden Materials in eine der Schallschnelle proportionale Spannung um. Das geschieht nach dem gleichen physikalischen Prinzip wie beim Empfang von Ultraschallsignalen mit einem EMUS-Prüfkopf. Der zeitliche Spannungsverlauf kann mit Hilfe eines einfachen Vorverstärkers zur Impedanzanpassung an jedem handelsüblichen Ultraschallprüfgerät in Durchschallungstechnik aufgezeichnet werden. Dadurch ist der Einsatz der Sonden sehr preisgünstig.

Bei dieser Methode sind keine besonderen Materialeigenschaften, wie optische Transparenz bei der Schlierentechnik bzw. eine gut reflektierende Oberfläche wie beim Laserinterferometer, erforderlich. Mit speziellen Maßnahmen ist es sogar möglich, Messungen an nichtleitenden Materialien durchzuführen. Außerdem kann mit diesen Sonden durch eine entsprechende Anpassung der Orientierungsrichtung die Teilchenauslenkung in allen drei Raumrichtungen separat erfasst werden.

1.2 Messaufbau

Prinzipiell ist es nicht möglich, den Schallfeldverlauf im Inneren von nicht transparenten Festkörpern messtechnisch aufzunehmen. Aus diesem Grund beschränken wir uns, wie auch alle anderen Verfahren, auf die Messung der Teilchenauslenkung, die durch das Streifen des Schallfeldes an der Oberfläche des Prüfkörpers hervorgerufen wird. Dazu wird auf der senkrecht zur Koppelfläche des Prüfkopfes liegenden Grenzfläche der zeitliche Verlauf der Teilchenauslenkung in jedem Punkt des definierten Messbereiches als A-Bild aufgezeichnet, wie in Bild 1 dargestellt. Der anregende Ultraschallprüfkopf wird so weit an den Rand des Prüfkörpers verschoben, dass die Kante des Prüfkörpers genau in der Mitte der aktiven Prüfkopffläche liegt.

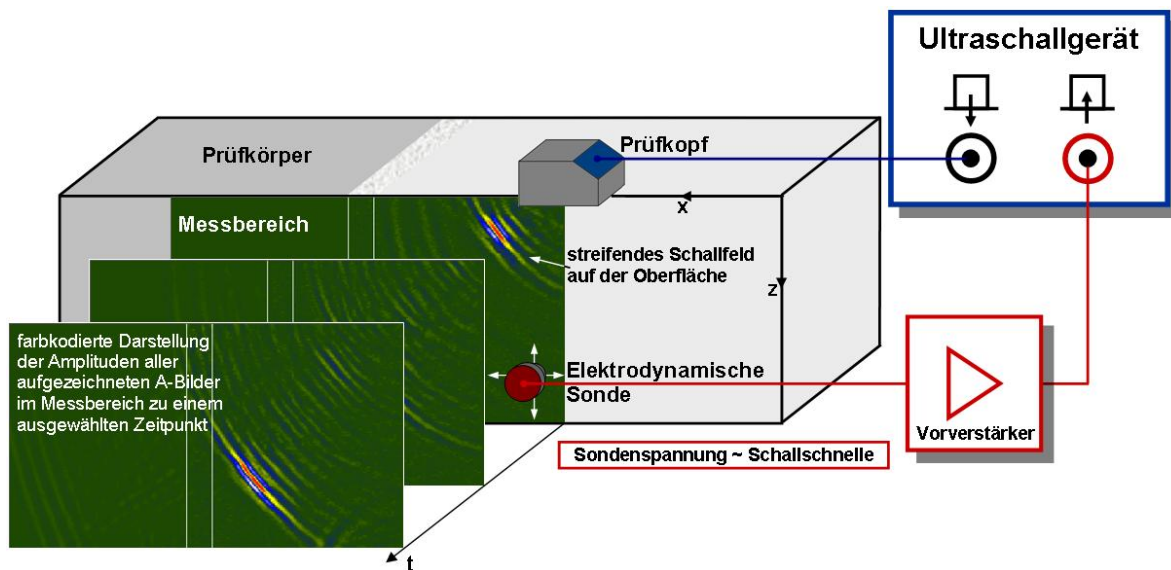


Bild 1. Messaufbau

Zu berücksichtigen ist dabei, dass im streifenden Schallfeld hauptsächlich parallel zur Oberfläche orientierte Teilchenauslenkungen zu erwarten sind. Longitudinale Anteile werden in diesem Fall durch den Energieverlust beim so genannten streifenden Einfall stärker gedämpft als die transversalen Anteile, die hier als horizontal polarisierte Transversalwelle in Erscheinung treten. Um beide Wellenarten bei den Messungen beobachten zu können, werden die Sonden so eingesetzt, dass sie die Teilchenauslenkung in x-Richtung erfassen.

Zur Visualisierung des momentanen Verlaufs der Wellenfronten werden die Amplituden der aufgezeichneten A-Bilder zu einem ausgewählten Zeitpunkt an allen Messpunkten im Messbereich farbcodiert aufgetragen, wie in Bild 1 zu sehen ist. Betrachtet man nun die zeitliche Folge solcher Darstellungen der momentanen Amplitudenverteilung, kann man die Ausbreitung der Wellenfronten anschaulich verfolgen.

Auf Grund der groben Ortsauflösung von ca. 1 mm und der Bedingung, dass bei der Abtastung von Schallfeldern die Ortsauflösung kleiner als $\lambda/2$ sein muss, ergibt sich für Longitudinalwellen in Stahl eine max. Prüfkopffrequenz von ca. 3 MHz und für Transversalwellen von ca. 1,5 MHz.

2. Modellrechnung

2.1 Modell eines Gruppenstrahler-Prüfkopfes

An dieser Stelle soll ein einfaches Modell für einen Gruppenstrahler-Prüfkopf genutzt werden. Es basiert auf einer Lösung der Wellengleichung für eine Punktkraft im Halbraum ($z > 0$), d. h. an der Oberfläche eines unendlich ausgedehnten homogenen und akustisch isotropen Körpers^[2]. Als Ergebnis erhält man die Impulsantwort der durch die Punktquelle angeregten Teilchenverschiebung im dreidimensionalen Raum. Da diese Lösung rotations-symmetrisch bezüglich der z-Achse ist, lässt sie sich wie folgt in Zylinderkoordinaten ausdrücken.

Verschiebungsvektor \vec{u} :

$$\begin{pmatrix} u_r \\ u_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_r(x, y, z, t) \\ f_z(x, y, z, t) \end{pmatrix}$$

In kartesischen Koordinaten ergibt sich:

Verschiebungsvektor \vec{u} :

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_r(x, y, z, t) \cdot \cos \varphi \\ f_r(x, y, z, t) \cdot \sin \varphi \\ f_z(x, y, z, t) \end{pmatrix}$$

Im nächsten Schritt werden die einzelnen Zeitfunktionen der drei Vektorkomponenten in jedem Raumpunkt mit der gemessenen Zeitfunktion eines Elementes des Gruppenstrahler-Prüfkopfes gefaltet. Mit Hilfe der so genannten Punktquellensynthese wird dann die vollständige Zeitfunktion des Schallfeldes eines Prüfkopfelementes in der Darstellungsebene (x-z-Ebene) berechnet. Dazu wird die rechteckige Schwinger-elementfläche mit ausreichend vielen Punktquellen belegt. Die einzelnen Zeitfunktionen der Punktquellen werden in jedem Punkt (x,z) nach dem Superpositionsprinzip überlagert. Die z-Komponente des Verschiebungsvektors zu einem ausgewählten Zeitpunkt ist in Bild 2 links dargestellt.

Das resultierende Gesamtschallfeld des Gruppenstrahler-Prüfkopfes wird nun durch zeitverzögerte Summierung der Zeitfunktionen des im Nullpunkt an jede Elementposition verschobenen Elementschallfeldes berechnet. Für 16 unverzögerte Elemente ist das resultierende Schallfeld zu einem ausgewählten Zeitpunkt in Bild 2 rechts zu sehen.

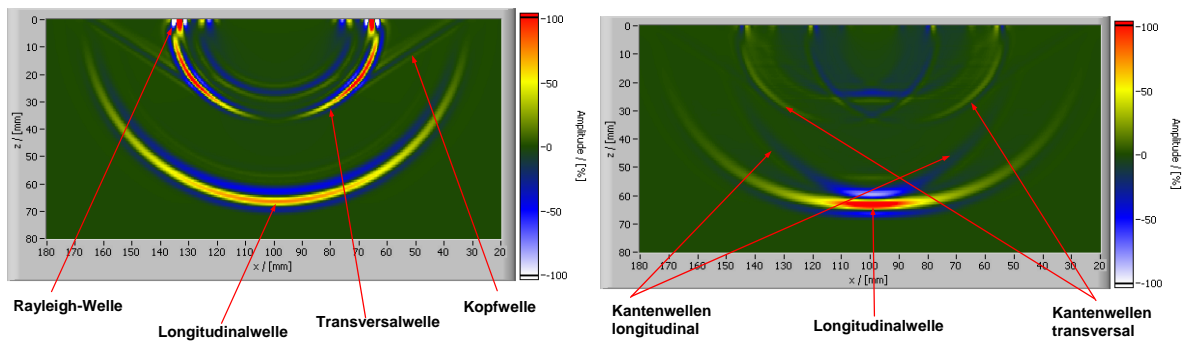


Bild 2. Wellenfronten, links: eines Prüfkopfelementes mit 1,4 x 48 mm² und 1 MHz, rechts: von 16 unverzögerten Elementen mit je 1,5 mm Abstand

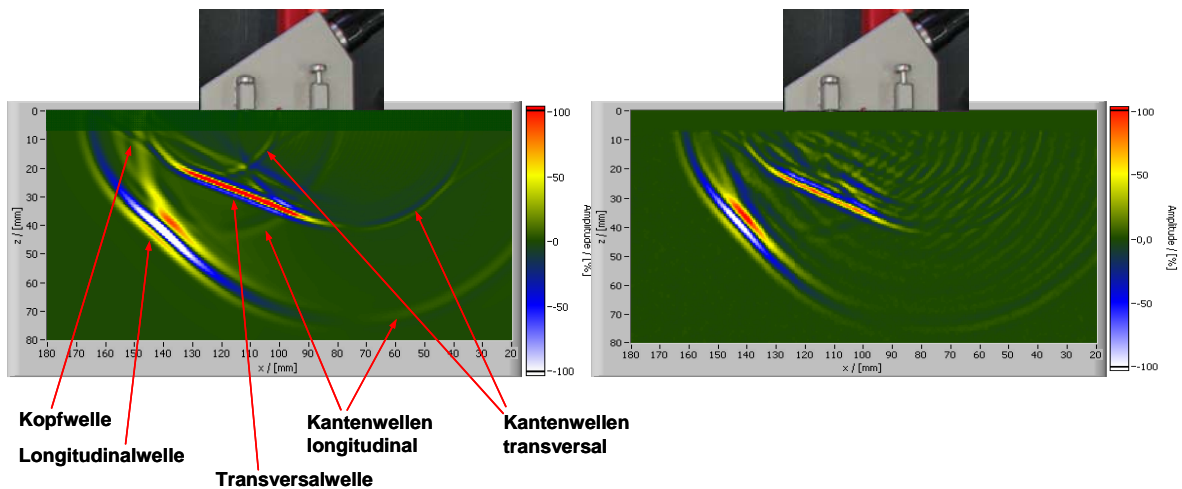


Bild 3. Schallfeld eines Gruppenstrahler-Prüfkopfes mit 32 aktiven Elementen, 45° Longitudinalwelle, links: Modellrechnung, rechts: Schallfeldmessung

3. Vergleich von Modellrechnung und Schallfeldmessung

3.1 Schallfeld eines Gruppenstrahler-Prüfkopfes in isotropem Stahl

Die Schallfeldmessung mit elektrodynamischen Sonden eignet sich sehr gut für die Überprüfung des Schallfeldverlaufes von Prüfköpfen. Das ist insbesondere für die Verifizierung der Berechnungsalgorithmen zum Einsatz von Gruppenstrahler-Prüfköpfen in Grenzbereichen sehr hilfreich. Im ersten Beispiel wird ein ebener linearer Gruppenstrahler-Prüfkopf - Parameter wie in Bild 2 - ohne Vorsatzkeil an einem ebenen isotropen Stahlblock betrachtet.

In den Bilder 3 bis 5 ist die x-Komponente des Schallschnellektors $\vec{v} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$ in der Darstellungsebene zu ausgewählten Zeitpunkten für verschiedene Einschallwinkel dargestellt. Bild 3 zeigt eine Longitudinalwelle mit 45° Einschallwinkel, die durch zeitverzögerte Anregung von 32 Prüfkopfelementen erzeugt wurde. Auch hier sind die gleichen Wellenanteile zu beobachten wie bei der Senkrechteinschallung in Bild 2. An den Kantenwellen ist zu erkennen, wie die zeitliche Verzögerung zwischen den Elementen zu einer Überlagerung der einzelnen Wellenanteile in einer bestimmten Einschallrichtung führt, wobei durch die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten von Longitudinal- und Transversalwellen unterschiedliche Ausbreitungsrichtungen der Wellenanteile resultieren.

Im den Abbildungen in Bild 4 ist der Grenzfall einer 90° Longitudinalwelle, der so genannten Kriechwelle dargestellt. In diesem Fall trifft die Longitudinalwelle von der rechten Kante des Prüfkopfes genau in dem Moment auf die zweite Kante links, in dem an diesem Randelement der Sendeimpuls ausgelöst wird. Die Longitudinalwellen überlagern sich so in der Phase, dass das Amplitudenmaximum parallel zur Oberfläche verläuft. Im weiteren Verlauf ist zu erkennen, wie diese longitudinale Kriechwelle an jedem Punkt der Oberfläche die transversale Kopfwelle anregt und dadurch an Energie verliert. In der untersten Abbildung ist zu sehen, wie das Amplitudenmaximum durch diesen Energieverlust von der Oberfläche in das Material hinein verschoben wird und ein resultierender Einschallwinkel von ca. 80° für die Longitudinalwelle entsteht.

Im Bild 5 wird die Elementverzögerung so weit erhöht, dass sich die longitudinalen Kantenwellen nicht mehr überlagern können und somit keine longitudinale Wellenfront entsteht. In diesem Fall breitet sich nur noch die Transversalwelle im Medium aus. In allen Bildern ist zu erkennen, dass Messung und Modellrechnung im Vergleich der Phasenlagen und Amplitudenverhältnisse der einzelnen Wellenfronten eine gute Übereinstimmung liefern.

3.2 Schallfeld eines Gruppenstrahler-Prüfkopfes in austenitischem Stahlguss

Im zweiten Beispiel wird derselbe Gruppenstrahler-Prüfkopf wie oben an einen ebenen Block aus austenitischem Stahlguss angekoppelt. In Bild 6 ist die Orientierung der für dieses Material typischen Stängelkristallite im Schliffbild zu sehen. Außerdem ist die sehr grobe Struktur der Kristallite erkennbar. Zum Vergleich mit den Messungen wurde die Modellrechnung für einen transversalisotropen Halbraum mit Orientierung der Stängelkristallite erweitert.

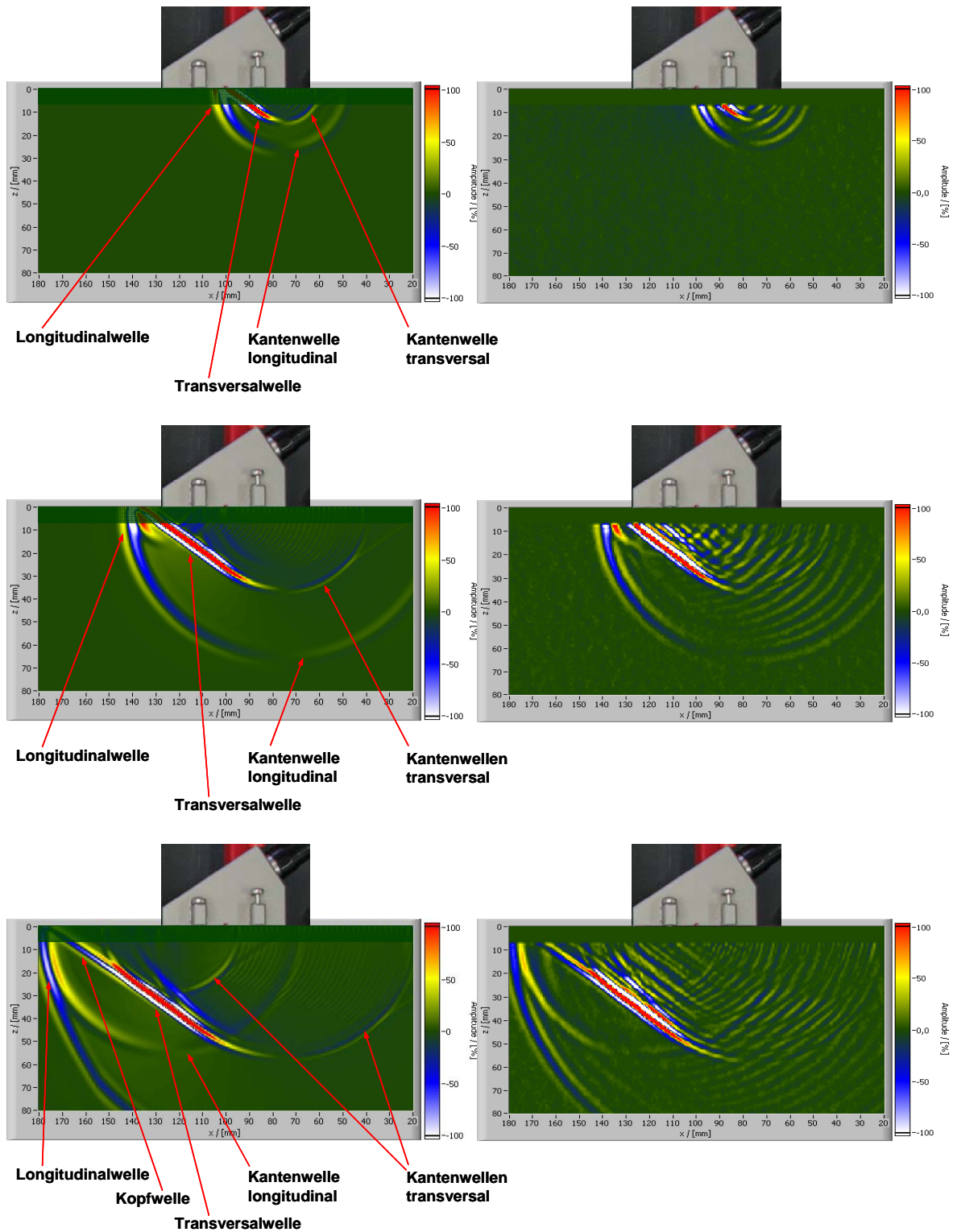


Bild 4. Schallfeld eines Gruppenstrahler-Prüfkopfes mit 32 aktiven Elementen, 90° Longitudinalwelle (Kriechwelle) zu verschiedenen Zeitpunkten, links: Modellrechnung, rechts: Schallfeldmessung

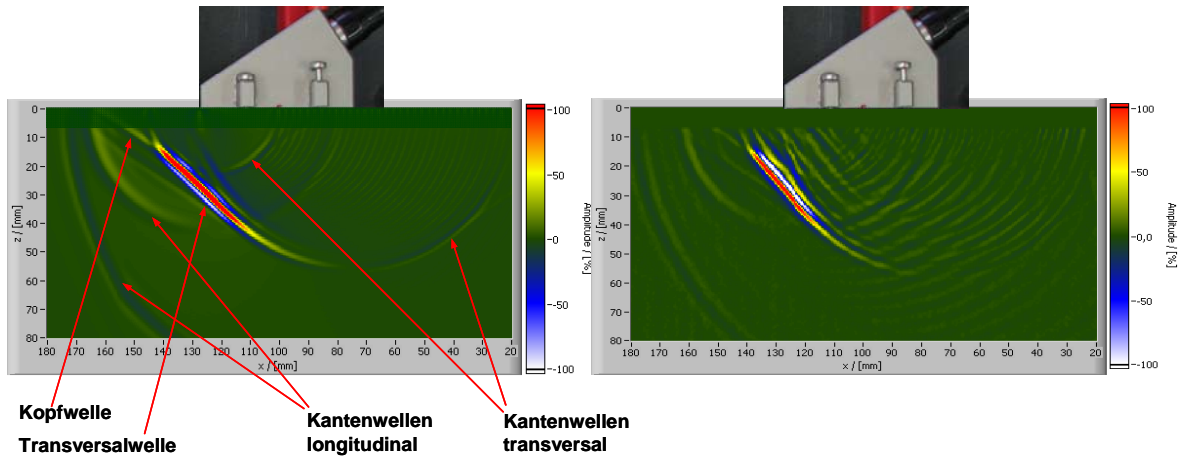


Bild 5. Schallfeld eines Gruppenstrahler-Prüfkopfes mit 32 aktiven Elementen, 45° Transversalwelle, links: Modellrechnung, rechts: Schallfeldmessung

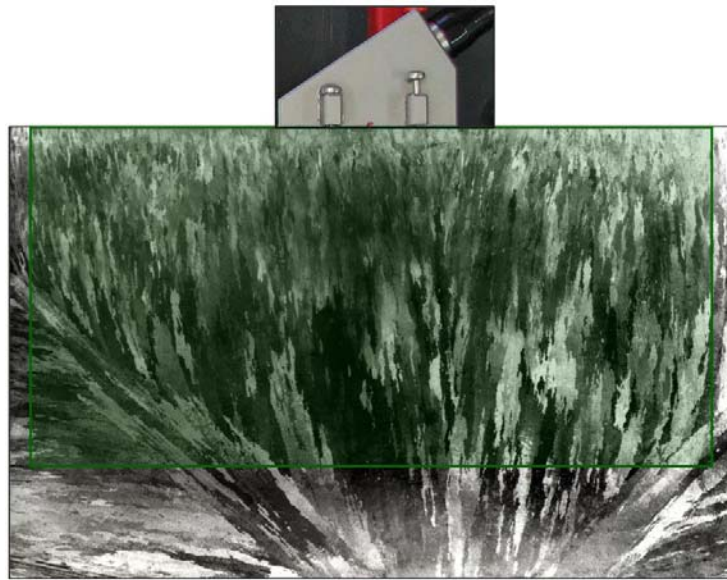


Bild 6. Messbereich (grün) am Prüfkörper aus austenitischem Guss

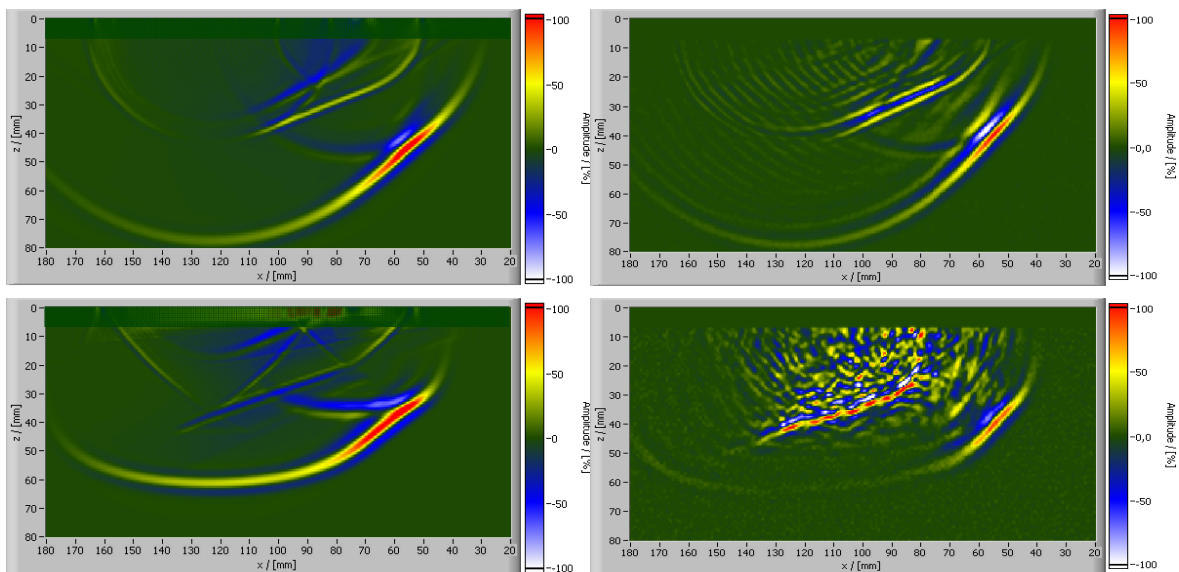


Bild 7. Schallfeld eines Gruppenstrahler-Prüfkopfes mit 32 aktiven Elementen, 45° Longitudinalwelle, oben: isotroper Stahl, unten: austenitischer Guss, links: Modellrechnung, rechts: Schallfeldmessung

In Bild 7 werden die Ergebnisse der Berechnung und die Messergebnisse für den isotropen und den transversalisotropen Fall gegenübergestellt. Zu sehen ist die z-Komponente des Verschiebungsvektors zu einem ausgewählten Zeitpunkt. Deutlich erkennbar sind hier die Verzerrung der longitudinalen Wellenfront im transversalisotropen Medium sowie die veränderte Einschallrichtung der Transversalwelle, die im transversalisotropen Medium aufgrund der Schallbündelablenkung einen negativen Einschallwinkel hat.

Ein deutlicher Unterschied ergibt sich zwischen den Ergebnissen der Modellrechnung und der Schallfeldmessung am austenitischen Guss. Die grobkristalline Struktur des Gussmaterials, erzeugt eine starke Streuung und Reflexion insbesondere der transversalen Wellenfronten an den Korngrenzen der Stängelkristallite. Diese Beeinflussung der Transversalwellen zeigt sich in einem starken Gefügerauschen. Da diese Effekte im verwendeten Rechenmodell nicht berücksichtigt werden, sind die Ergebnisse nur bedingt vergleichbar. Allerdings zeigt sich, dass auch mit diesem eingeschränkten Modell die Ausbreitungsrichtung der Wellenfronten korrekt wiedergegeben wird.

4. Zusammenfassung

Mit den aufgeführten Beispielen kann zum einen gezeigt werden, dass die hier eingesetzte Methode zur Messung und Visualisierung von Schallfeldverläufen an der Oberfläche von Festkörpern mit elektrodynamischen Sonden mit wenig Aufwand sehr anschauliche Darstellungen von Ultraschallfeldern ermöglicht, die zur Verifizierung von Modellrechnungen geeignet sind. Zum anderen ist erkennbar, dass die hier verwendeten idealisierten Modellansätze durchaus in der Lage sind, den realen Verlauf von homogenen isotropen Schallfeldern mit qualitativ guter Übereinstimmung zu simulieren. Dabei kommt es weniger auf den exakten Verlauf der Signalformen in den A-Bildern, sondern mehr auf die Ausbreitungsrichtung und die Amplitudenverteilung in den Wellenfronten an.

Einfache Problemstellungen, wie die Schallfeldberechnung von Gruppenstrahler-Prüfköpfen an homogenen Materialien, sind durch eine Punktquellensynthese beschreibbar und liefern eine gute Übereinstimmung der Amplitudenverteilung und der Phasenlage. Komplexere Prüfprobleme, wie inhomogene anisotrope Gussbauteile, erfordern eine wesentlich umfangreichere mathematische Beschreibung mit Berücksichtigung des Streu- und Reflexionsverhaltens im Medium.

Referenzen

- [1] H. Ernst, V. K. Munikoti, H. Wüstenberg
Experimentelle Verifizierung von Modellvorstellungen zur Schallausbreitung in anisotropen Materialien
ZfP-Zeitung 92, 2004, Seite 36-40
- [2] E. Kühnicke, U. Völz
Ultraschallprüfköpfe - Design für komplizierte Prüfgeometrien
Materialprüfung, Bd.40 (1998), Nr.1-2, Seite 7-14
- [3] U. Völz, H. Mrasek, K. Matthies
Untersuchungen zur Schallausbreitung in anisotropen Schweißverbindungen von Nickellegierungen mit Hilfe der Visualisierung von Schallfeldern mit elektrodynamischen Sonden
DGZfP-Jahrestagung 2008
<http://www.ndt.net/article/dgzfp2008/Inhalt/p18.pdf>
- [4] U. Völz, H. Mrasek, K. Matthies
Visualisierung der Schallausbreitung in Festkörpern mit elektrodynamischen Sonden
DGZfP-Jahrestagung 2009
<http://www.ndt.net/article/dgzfp2009/Inhalt/mi2a2.pdf>