

# Ultraschallabbildung zur zerstörungsfreien Strukturbestimmung von Betonbauteilen mit Hilfe der "One-Way"-Wellengleichung

Gregor BALLIER\*, Klaus MAYER\*, Martin KRAUSE\*\*

\*Universität Kassel Wilhelmshöher Allee 71 34109 Kassel

gregorballier@uni-kassel.de, kmayer@uni-kassel.de

\*\*Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung

Unter den Eichen 87 12205 Berlin

martin.krause@bam.de

**Kurzfassung.** Die ZfP versucht mit Hilfe von Messdaten, die sie aus z. B. einer Impuls-Echo-Messung gewinnt, Rückschlüsse auf die innere Struktur eines Objektes zu ziehen. Bei Betonbauteilen sollen im Besonderen Verpressfehler, die dann zur Korrosion und damit zur einer Beeinträchtigung der Standsicherheit und Dauerhaftigkeit des Konstruktion (z. B. einer Spannbetonbrücke) führen können, schnell und mit einer hohen Sicherheit aus den Messdaten lokalisiert werden. Das konventionellen SAFT oder FT-SAFT-Verfahren liefern in Verbindung mit einer Phasenauswertung einen schnellen und sicheren Hinweis darauf, dass ein Lufteinschluss/Defekt vorliegt. Darüber hinaus können jedoch Rückausbreitungs-Verfahren, wenn ein gutes Geschwindigkeitsprofil vorliegt, eine wesentlich bessere Lokalisierung des Defekts bieten als SAFT-Verfahren, jedoch mit dem Nachteil, dass sie sehr zeit- und rechenintensiv sind, vor allem im Dreidimensionalen. Als Mittelweg kann hierzu die "One-Way"-Methode dienen. Diese Methode verwendet Pseudo-Differential-Operatoren und ist sehr robust auch bei relativ groben Geschwindigkeitsprofilen. Sie wird an Beispielen aus der Bauwerkdiagnose mit den konventionellen Verfahren verglichen.

## Einführung

Die ZfP hat in letzten Jahren sehr erfolgreich mit Hilfe von Impuls-Echo-Messungen und der SAFT- (Synthetic Aperture Focusing Technique) Methode die innere Struktur von Objekten gut darstellen können. Die Problematik bei vielen zu untersuchenden Objekten, wie z.B. von Betonbauteilen, ist die Inhomogenität des Objektes selbst. Der konventionelle SAFT-Algorithmus bildet meist nur die Oberkanten von den Streuern gut ab, die Unterkanten werden aufgrund des homogenen Hintergrundmediums, das bei der Rückausbreitung verwendet wird, örtlich falsch abgebildet. Um den Nachteil von SAFT – nämlich, dass die Annahme eines homogenen Hintergrundmaterials vorausgesetzt ist – zu verbessern, wenden wir die numerische Methoden AFIT (Akustische Finite Integrationstechnik) und One-Way an. Beide Methoden können Inhomogenitäten handhaben. Allerdings entstehen bei AFIT an den Übergängen zwischen zwei Medien "störende" reflektierte Wellen, die zu Problemen bei der Interpretation der Rekonstruktion führen. Dieser Nachteil von AFIT soll durch die Verwendung der One-Way-Methode verhindert werden.

In den nächsten Abschnitt wollen wir kurz auf die theoretischen Grundlagen der obengenannten Methoden eingehen. In den darauffolgenden Abschnitten zeigen wir einen

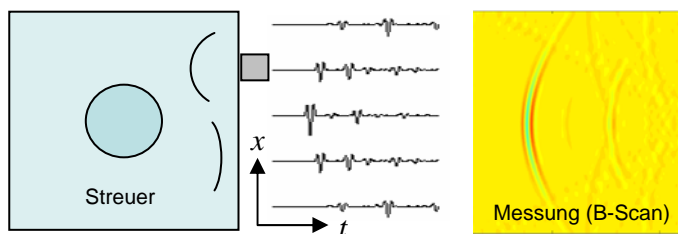
Vergleich der genannten Methoden anhand von synthetischen und gemessenen Impuls-Echo-Messdaten.

## 1. Grundlagen

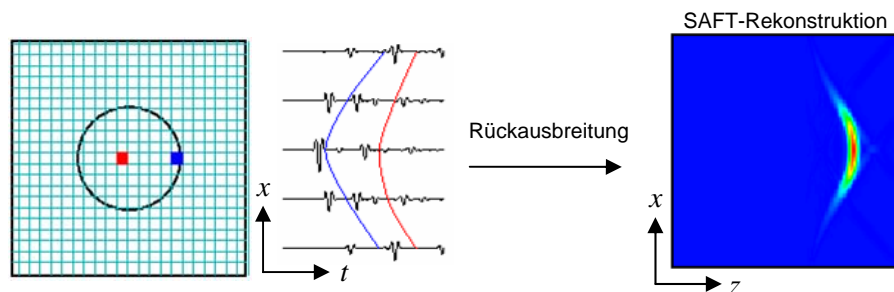
In diesem Abschnitt geben wir einen kurzen theoretischen Überblick über die einzelnen Methoden SAFT-, AFIT- und One-Way. Für eine detailliertere Herleitung der Algorithmen verweisen wir auf die entsprechende Literatur.

### 1.1 SAFT

Die Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) ist ein heuristischer Abbildungsalgorithmus, der für skalare Wellen wie Ultraschall geeignet ist. Der SAFT-Algorithmus kann direkt auf die gemessenen Zeitbereichsdaten angewendet werden um eine Rekonstruktion zu erhalten. Der Algorithmus soll hier nur kurz erläutert werden, eine detailliertere Ausführung ist bei [1] zu finden.



**Abbildung 1:** Auf der Oberfläche eines Objektes werden bei einer Impuls-Echo-Messung A-Scans aufgezeichnet. Die Zusammenfassung aller A-Scans ergibt den B-Scan.



**Abbildung 2:** Die einzelnen A-Scans werden in das Objekt rückausbreitet. Die anschließende Überlagerung aller A-Scans ergibt die SAFT-Rekonstruktion. In unserem Fall sehen wir die Oberkante eines idealen Streuers.

In der Abbildung 1 sehen wir, wie ein Ultraschall-Prüfkopf über die Oberfläche eines Objektes gefahren wird. Er sendet ein Signal aus und nimmt es an der gleichen örtlichen Stelle wieder auf, diese Vorgehensweise der Datengewinnung nennt man Impuls-Echo-Messung. Den SAFT-Algorithmus kann man durch die sogenannte A-Bild orientierte Formulierung (A-Scan driven approach) oder die voxelorientierte Formulierung (voxel-driven approach) beschreiben. Im ersten Fall wird das Signal jedes Messpunktes (A-Scans) in den Rekonstruktionsraum unter der Annahme eines homogenen Hintergrundmediums auf Halbkreisen angeordnet, wobei die Zeitachse in die Entfernungsachse gemäß der Hintergrundgeschwindigkeit umgerechnet wird. Die Überlagerung aller rückgerechneten A-Scans liefert uns die Abbildung der Streuer. In Abbildung 2 sehen wir die Oberkante eines

idealen Streuers<sup>1</sup>. Für die voxelorientierte Formulierung verweisen wir auf [1]. Beide SAFT-Algorithmen liefern das gleiche Ergebnis.

Noch einmal: der SAFT-Algorithmus arbeitet bei der Abbildung mit der Annahme eines homogenen Hintergrundmediums für das ganze Rekonstruktionsgebiet. Man kann sich leicht vorstellen, dass der SAFT-Algorithmus keine korrekten Rekonstruktionen der Streuer liefern kann, wenn diese Voraussetzung nicht erfüllt ist.

Um die Problematik der Inhomogenität des Hintergrundmediums zu lösen, wollen wir im nächsten Abschnitt die AFIT- und die One-Way-Methode einführen. In erster Linie sind AFIT und die One-Way-Methode Modellierungstools. Man kann sie aber ebenfalls als Rekonstruktionstool nutzen.

## 1.2 AFIT

Die Finite Integrationstechnik (FIT) ist eine räumliche Diskretisierungstechnik, welche direkt auf die dem betrachteten physikalischen Phänomen unterliegenden Grundgleichungen in Integralform angewendet werden kann [4].

FIT wurde ursprünglich von [2] für den elektromagnetischen Fall (EMFIT) eingeführt. [3] hat FIT als erster auf die elastodynamischen Grundgleichungen angewendet. In [4] findet man eine ausführliche Ausarbeitung und Herleitung für den akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Fall.

Mit der Akustischen Finiten Integrationstechnik können wir die Wellenausbreitung in Flüssigkeiten und Gasen und unter bestimmten Bedingungen auch in Festkörpern beschreiben. Im Fall der akustischen Wellenausbreitung haben wir sogenannte Druckwellen. In Festkörpern haben wir als wesentliches Merkmal zusätzlich zu den Druckwellen Scherwellen und wir haben Modenkonzersion die an den Inhomogenitäten entsteht. Wir vernachlässigen also Wellentypen und die Modenkonzersion, wenn wir AFIT für die Wellenausbreitung in Festkörper nutzen.

Betrachten wir zuerst die linearisierten Grundgleichungen der Akustik in Differentialform am Raumpunkt  $\mathbf{R}$  zum Zeitpunkt  $t$

$$\rho(\mathbf{R}) \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}(\mathbf{R}, t) = -\nabla p(\mathbf{R}, t) + \mathbf{f}(\mathbf{R}, t), \quad (1.1)$$

$$\kappa(\mathbf{R}) \frac{\partial}{\partial t} p(\mathbf{R}, t) = -\nabla \cdot \mathbf{v}(\mathbf{R}, t) - h(\mathbf{R}, t). \quad (1.2)$$

Wobei  $p(\mathbf{R}, t)$  der akustische Druck [Pa],  $\mathbf{v}(\mathbf{R}, t)$  die Teilchengeschwindigkeit [m/s],  $\rho(\mathbf{R})$  die Volumenmassendichte [kg/m<sup>3</sup>],  $\kappa(\mathbf{R})$  die (adiabatische) Kompressibilität [Pa<sup>-1</sup>],  $\mathbf{f}(\mathbf{R}, t)$  die Volumenkraftdichte [N/m<sup>3</sup>] und  $h(\mathbf{R}, t)$  die injizierte Deformationsrate [s<sup>-1</sup>] ist. Diese können durch Integration über das Volumen und Anwendung des Gauß'schen und Stokes'schen Integralsatzes in folgende Integralform gebracht werden

$$\iiint_V \rho(\mathbf{R}) \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}(\mathbf{R}, t) dV = -\iint_S \mathbf{n} p(\mathbf{R}, t) dS + \iiint_V \mathbf{f}(\mathbf{R}, t) dV, \quad (1.3)$$

$$\iiint_V \kappa(\mathbf{R}) \frac{\partial}{\partial t} p(\mathbf{R}, t) dV = -\iint_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}(\mathbf{R}, t) dS - \iiint_V h(\mathbf{R}, t) dV. \quad (1.4)$$

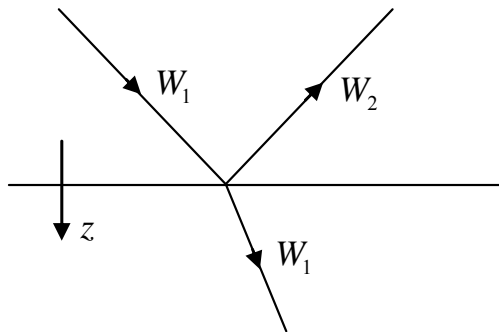
<sup>1</sup> Im akustischen Fall liegt eine ideale schallweiche Randbedingung an Trennflächen zwischen einem akustischen Medium und dem Vakuum vor. Mathematisch formuliert, ergibt sich daraus an der Berandungsfläche die Dirichletsche Randbedingung  $p(\mathbf{R}, t) = 0$ . Man spricht auch von einem idealen Streuer.

Mit (1.3) und (1.4) sind wir in der Lage das numerische Verfahren FIT für akustische Wellen herzuleiten.

Mit AFIT können wir alle physikalischen Wellenphänomene bezüglich der Akustik, wie z.B. Fokussierung, Defokussierung, Beugung, Reflexionen oder Mehrfachreflexionen beschreiben.

### 1.2 Die One-Way-Methode

Die One-Way-Methode oder auch gerichtete Wellenfeldzerlegung kommt ursprünglich aus der Problematik der atmosphärischen Wellenausbreitung. Weitere Anwendungsgebiete finden sich in der integrierten Optik, Unterwasserakustik und vor allen in der Explorationsseismik.



**Abbildung 3:** Zerlegung des Wellenfeldes in einen Beitrag  $W_1$ , der sich in einer bevorzugten Richtung - hier  $z$  - und einen Beitrag  $W_2$ , der sich entgegen der bevorzugten Richtung ausbreitet.

Die gerichtete Wellenfeldzerlegung ist ein Werkzeug zur Analyse und Berechnung von Wellenfeldern, die sich hauptsächlich in einer bevorzugten Richtung ausbreiten (s. Abbildung 3), während sie nach und nach durch die Ebene senkrecht zur bevorzugten Richtung beeinflusst werden.

Die Methode ist sehr nützlich, weil sie bzgl. der Berechnung sehr effizient sein kann und sie wird benutzt, um verschiedene Ausbreitungsphänomene zu trennen, was bei der Interpretation und Inversion von Messungen wichtig ist.

Für die numerische Implementierung wird ein „Polynomansatz“ [5] verwendet, der es dann ermöglicht eine Sparse-Matrix<sup>2</sup>-Darstellung für die Pseudo-Differential Operatoren zu finden. Der Ursprung des Polynomansatzes findet sich in der „parabolic equation“ [6,7]. Die Diskretisierung der One-Way-Wellengleichung basiert auf einer Thiele-Approximation. Diese liefert uns eine partielle Differentialgleichung, welche dann in ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen transformiert wird. Dessen Lösung wird formell als Produktintegral geschrieben. Der Exponent in der diskreten Version des Produktintegrals wird durch eine Padé-Approximation<sup>3</sup> ersetzt. Dies beschleunigt die Berechnung und außerdem erhalten wir durch diese Prozedur eine höhere numerische Stabilität. Am Ende steht uns ein algebraisches Gleichungssystem zu Verfügung, dessen Matrix sehr dünn besetzt ist und schnell gelöst werden kann.

Die One-Way-Methode basiert genau wie AFIT auf den Gleichungen (1.1) und (1.2). Mit dieser Methode werden also dieselben physikalischen Wellenphänomene wie bei AFIT (nämlich Fokussierung, Defokussierung, Beugung, Reflexionen oder Mehrfachrefle-

<sup>2</sup> Sparse-Matrix ist aus dem englischen und bedeutet, dass die Matrix dünn oder schwach besetzt ist. Viele Einträge bestehen aus Nullen. Dies kann bei der Inversion der Matrix ausgenutzt werden.

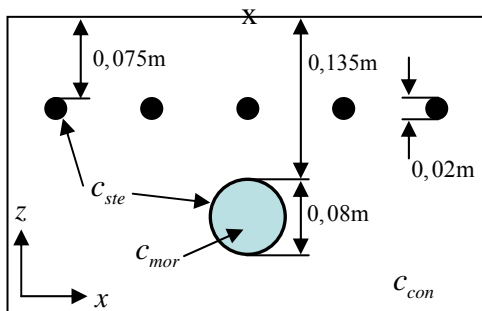
<sup>3</sup> Diese Approximation stammt von dem französischen Mathematiker Henri Eugène Padé. Ein gutes Beispiel für die Leistungsfähigkeit der Padé-Approximation ist in [8] zu finden.

xionen) beschrieben. Der Unterschied zu AFIT ist, dass die Reflexionen und Mehrfachreflexionen separat berechnet werden können.

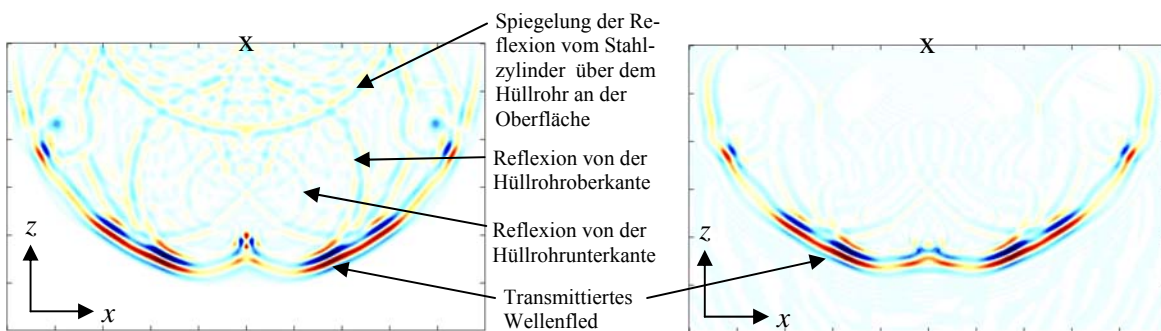
### 1.3 Vergleich zwischen AFIT und der One-Way-Methode

Kommen wir zum Vergleich zwischen den beiden Methoden. Dazu dient uns die Geometrie ( $L \times B = 0,3 \times 0,5 \text{ m}^2$ ) aus Abbildung 4, die sich an Bauteilen aus Stahlbeton orientiert. Das Bauteil besteht hauptsächlich aus Beton ( $c_{\text{con}} = 4326 \text{ m/s}$ ), in dem fünf Bewehrungsseisen und ein Stahlhüllrohr ( $c_{\text{ste}} = 5900 \text{ m/s}$ ) gefüllt mit Mörtel ( $c_{\text{mor}} = 3600 \text{ m/s}$ ) eingebettet sind. Auf der Oberfläche regen wir mit einer punktförmigen Normalkraft in Form eines RC2-Impulses (Raised Cosine) an. In Abbildung 5 ist das AFIT-Wellenfeld zu einem Zeitpunkt dargestellt, bei dem die Welle das Hüllrohr gerade wieder verlässt. Gut zu erkennen ist das transmittierte Wellenfeld, das durch die Inhomogenitäten verformt wurde. Außerdem erkennt man die Reflexionen, die an der Hüllrohroberkante und -unterkante entstanden sind, die Spiegelung der Reflexion vom Stahlzylinder über dem Hüllrohr an der Oberfläche, sowie Mehrfachreflexionen. Die ideale Randbedingung an der Oberfläche reflektiert die Wellen, die durch die Streuer entstehen, erneut in den Körper.

In Abbildung 6 hingegen sehen wir das Wellenfeld zum gleichen Zeitpunkt mit der One-Way-Methode. Sie zeigt nur das transmittierte Wellenfeld und überhaupt keine Reflexionen.



**Abbildung 4:** Geometrie zur Erzeugung des Wellenfeldes. Das  $x$  kennzeichnet die Position der Punktquelle.



**Abbildung 5:** Simulation der Wellenausbreitung bei Impulsanregung im inhomogenen Referenzmedium laut Abbildung 4 mit AFIT.

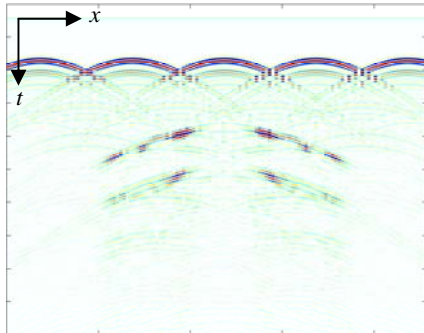
**Abbildung 6:** Ausbreitung eines Impulses im inhomogenen Referenzmedium laut Abbildung 4 durch eine One-Way-Simulation.

## 2. Simulationen/Ergebnisse

In diesem Abschnitt wollen wir die drei Methoden SAFT, AFIT und One-Way anhand von synthetischen Impuls-Echo-Daten und Impuls-Echo-Messdaten vergleichen. Die synthetischen Daten erzeugen wir uns aus dem Modell, das wir in Abbildung 4 sehen. Die entsprechenden Impuls-Echo-Daten sind in Abbildung 8 dargestellt.

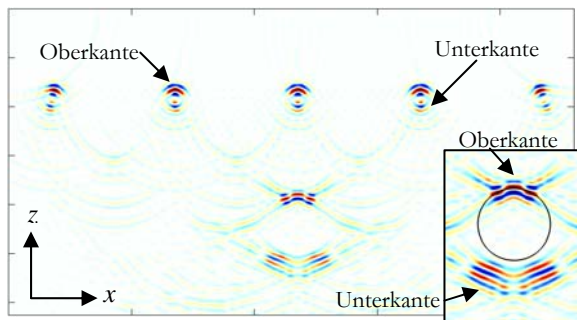


Die Modellierungstools AFIT und One-Way können wir auch als Rekonstruktionstool verwenden, indem wir die Impuls-Echo-Daten in zeitumgekehrter Reihenfolge in das Objekt zurück senden. Diesen Vorgang bezeichnen wir hier als AFIT- bzw. One-Way-Invers.

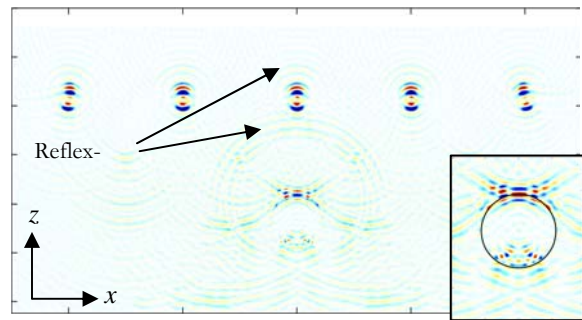


**Abbildung 8:** Impuls/Echo-Daten entstanden aus der Geometrie von Abbildung 4.

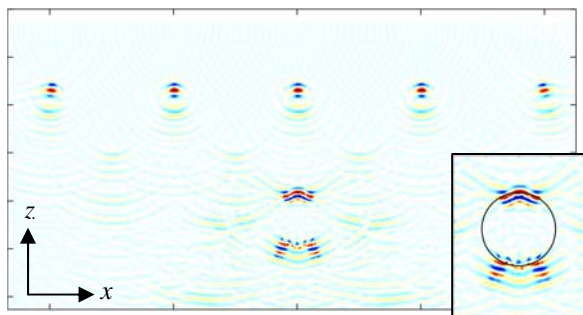
Bei der SAFT-Rekonstruktion erkennt man, dass die Oberkanten der Stahlzylinder sowie die Oberkante des Hüllrohrs gut abgebildet werden. Die Unterkanten der Stahlzylinder und des Hüllrohrs werden aufgrund der Annahme eines homogenen Hintergrundmediums örtlich falsch abgebildet. Bei AFIT-Invers und One-Way-Invers verwenden wir, um die Leistungsfähigkeit der Methoden beurteilen zu können, das gleiche Modell bei der Rückausbreitung der Daten, wie beim Erzeugen der Daten<sup>4</sup>. In den beiden Fällen werden durch die Berücksichtigung der Inhomogenitäten die Ober- und Unterkanten der Streuer richtig abgebildet. Bei AFIT-Invers sind die Reflexionen deutlich zu sehen. Sie führen zu Auslöschungseffekten, Interferenzen und Oszillationen.



**Abbildung 9:** SAFT mit den Impuls-Echo-Daten aus Abbildung 8.



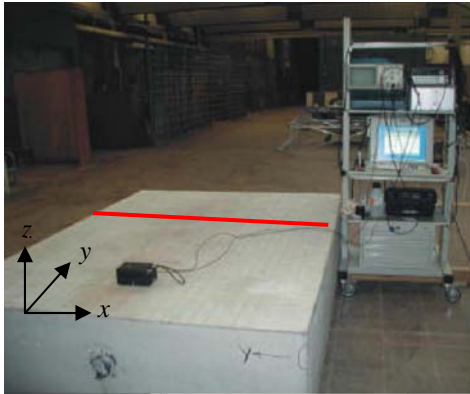
**Abbildung 10:** AFIT-Invers mit den Impuls-Echo-Daten aus Abbildung 8. Bei der Rückausbreitung verwenden wir das Modell aus der Abbildung 4.



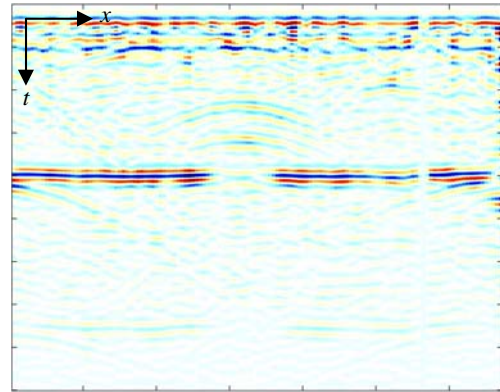
**Abbildung 11:** One-Way-Invers mit den Impuls-Echo-Daten aus Abbildung 8. Hier gilt das gleiche wie bei der Abbildung 10 für das Modell bei der Rückausbreitung.

<sup>4</sup> Das in der Literatur als 'Inverse Crime' bezeichnet Vorgehen ist hier nicht zutreffend, da die Rückausbreitung keine funktionalminimierende Inversion im mathematischen Sinne darstellt.

Als nächstes werten wir die Messspur eines Betonkörpers, entsprechend Abbildung 12 und 13, mit Bewehrung und Hüllrohr unter Berücksichtigung von Lage und Material des Hüllrohres aus. Ausführlichere Beschreibungen von bildgebenden Ultraschallecho-Experimenten zu Probekörpern dieser Art finden sich in [9,10].

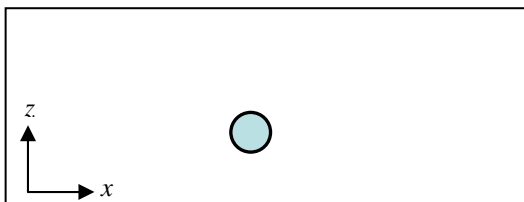


**Abbildung 12:** Testkörper der BAM. Die Abmessungen des Testkörpers sind  $x = 1,50$  m,  $y = 2,00$  m und  $z = 0,50$  m.

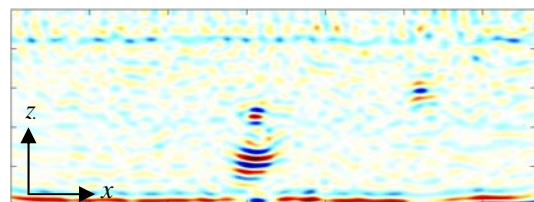


**Abbildung 13:** Eine Messspur bei  $y = 1,32$  m (rote Line in Abbildung 12) aus den Impuls/Echo Messdaten.

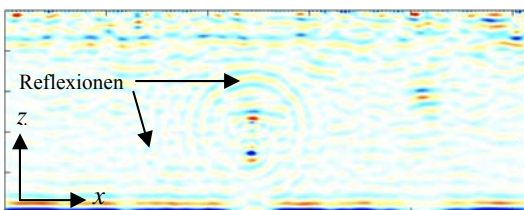
Bei geeigneter Wahl der Geschwindigkeit wird die Rückwand des Probekörpers richtig abgebildet. In der SAFT-Rekonstruktion in Abbildung 15 wird die Oberkante des Probekörpers richtig abgebildet. Die Unterkante wird aufgrund des homogenen Hintergrundmediums jedoch falsch abgebildet. Bei AFIT-Invers Abbildung 16 sehen wir deutlich die Reflexionen. Im Vergleich zu SAFT ist die untere Anzeige aufgrund der Tatsache, dass wir das Geschwindigkeitsprofil aus Abbildung 14 verwendet haben, deutlich „zusammengeschrunpft“. Im Vergleich zu SAFT und AFIT-Invers ist Unterkante bei One-Way-Invers in Abbildung 17 besser fokussiert. Reflexionen sind oberhalb des Hüllrohres nicht mehr zu sehen.



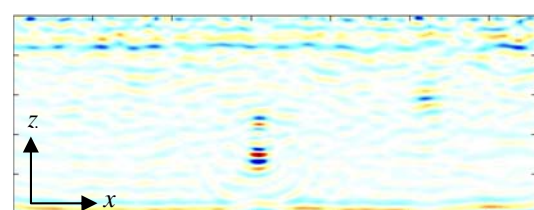
**Abbildung 14:** Modell bei der Rückausbreitung der Daten.



**Abbildung 15:** SAFT-Rekonstruktion.



**Abbildung 16:** Rekonstruktion mit der AFIT-Invers-Methode.



**Abbildung 17:** Rekonstruktion mit der One-Way-Invers-Methode.

## Zusammenfassung

SAFT ist die schnellste der drei vorgestellten Methoden. Sie kann für relativ homogene Objekte sehr gute Ergebnisse liefern, sobald das Objekt aber inhomogener wird, sind die Ergebnisse schwieriger zu interpretieren.

AFIT ist die zeit- und speicherintensivste Methode, liefert aber bei einem guten Geschwindigkeitsprofil die besten Ergebnisse. Allerdings sind die Daten oftmals nur von einer Seite des Objektes vorhanden und damit unvollständig. Diese Unvollständigkeit erzeugt uns dann die Reflexionen und kann damit zu Auslöschungseffekten, Interferenzen und Oszillationen führen, wie sie in den Abbildungen 10 und 16 zu sehen sind.

Die One-Way-Methode ist ein Mittelweg zwischen SAFT und AFIT. Sie ist relativ schnell und nicht sehr speicherintensiv. Sie kann die Unvollständigkeit der Messfläche besser handhaben als AFIT, da keine Reflexionen an den Inhomogenitäten entstehen.

## Referenzen

- [1] K.-J. Langenberg, R. Marklein, K. Mayer. Theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Materialprüfung mit Ultraschall. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2009.
- [2] T. Weiland. Eine Methode zur Lösung der Maxwell'schen Gleichungen für sechskomponentige Felder auf diskreter Basis. AEÜ, Bd. 31, Heft 3, S.116-120, 1977.
- [3] P. Fellingner. Ein Verfahren zur numerischen Lösung elastischer Wellenausbreitungsprobleme im Zeitbereich durch direkte Diskretisierung der elastodynamischen Grundgleichungen. Dissertation, Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik, Universität Gesamthochschule Kassel, Kassel 1991.
- [4] R. Marklein. Ein Verfahren zur numerischen Lösung elastischer Wellenausbreitungsprobleme im Zeitbereich durch direkte Diskretisierung der elastodynamischen Grundgleichungen. Dissertation, Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik, Universität Gesamthochschule Kassel, Kassel 1991.
- [5] M.J.N. van Stralen, Directional Decomposition of Electromagnetic and Acoustic Wave-Fields. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, 1997.
- [6] F.D. Tappert. The parabolic approximation method. In J.B. Keller and J.S. Papadakis, editors, Wave Propagation and Underwater Acoustics, pages 224-287. Springer-Verlag, New York, New York, USA, 1977.
- [7] J. Clearbout. Coarse grid calculations of waves in inhomogeneous media with application to delineation of complicated seismic structure. Geophysics, 35(3):407-418, 1970.
- [8] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing. Third Edition. Cambridge University. 2007.
- [9] Krause, M., Milmann, B., Schickert, M. and K. Mayer, Investigation of Tendon Ducts by Means of Ultrasonic Echo Methods: A Comparative Study, In: Proceedings of the 9th European Conference on NDT, September 25-29, 2006, Berlin: DGZfP, BB 103-CD, Tu.3.2.1, 2006.
- [10] Krause, M., Mielentz, F., Milmann, B., Streicher, D. and W. Müller, Ultrasonic imaging of concrete elements: State of the art using 2D synthetic aperture, In: DGZfP (ed.); International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16-19, 2003, Proceedings on BB 85-CD, V51, Berlin 2003.

## Danksagung

Wir möchten der Deutschen Forschungsgesellschaft für die Unterstützung dieser Studie im Rahmen des Projektes "Analyse von Spannbetonbauteilen mit 3D-Ultraschallecho-Verfahren" danken.