

# Anwendung der Reverse Time Migration auf Ultraschall-Echo-Messungen in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen

Sabine MÜLLER \*, Ernst NIEDERLEITHINGER \*

\* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin  
[sabine.mueller@bam.de](mailto:sabine.mueller@bam.de)

**Kurzfassung.** Ultraschall-Echo-Messungen dienen im Bauwesen zur Dickenbestimmung von Bauteilen sowie der Lokalisierung und Charakterisierung von Einbauteilen, Einlagerungen und anderen Inhomogenitäten. Zur Rekonstruktion werden bisher Abbildungsverfahren wie z.B. 3D-SAFT genutzt. Diese setzen aber voraus, dass direkte Reflexionen am Abbildungsobjekt erfolgen. Deshalb können keine zuverlässigen Aussagen über den Durchmesser von eingebauten Spannkanälen oder z. B. Seitenkanten von Objekten getroffen werden.

Ziel laufender Forschungsarbeiten ist es, die Abbildungsqualität zu verbessern. Mit der aus der Geophysik stammenden Reverse Time Migration, die bereits häufig in der Erdölexploration genutzt wird, lassen sich auch steilere Strukturen über 70° abbilden und somit auch die Unterseite von Einbauten oder Stufen in Bauteilen darstellen.

Um die Leistungsfähigkeit des Algorithmus für die zerstörungsfreie Prüfung zu untersuchen, wurden verschiedene Simulationsrechnungen durchgeführt. Dabei wurden typische Prüfprobleme unterschiedlicher Komplexität zunächst in Polyamid nachgestellt. Die Schwerpunkte lagen bei der Darstellung senkrechter Grenzflächen und Hohlstellen. Die Rechnungen dienten neben der Evaluierung und Optimierung des Verfahrens auch der Planung von Experimenten an Probekörpern mit verschiedenen Einbauten.

Die Simulationsergebnisse wurden an einem dem synthetischen Modell entsprechenden Polyamidprobekörper überprüft, an dem rauscharme Ultraschalldaten aufgenommen werden konnten. In einer Messreihe wurde in den Probekörper eine Bohrung eingebracht und schrittweise vergrößert. Mit diesen Messungen konnte die Leistungsfähigkeit der Reverse Time Migration auch an realen Ultraschalldaten nachgewiesen werden. Untersuchungen mit an Beton aufgenommenen Ultraschalldaten werden folgen.

## Einführung

Die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (ZFP Bau) ist für die Bestandsaufnahme und Zustandsuntersuchung von Bauwerken sehr wichtig. Beispielsweise sind Baupläne älterer Bauwerke manchmal nicht vorhanden oder unvollständig. Aus diesem Grund muss mit Hilfe von Messverfahren der zerstörungsfreien Prüfung der innere Aufbau rekonstruiert werden. Dabei wird z.B. die Lage von Bewehrung und Spannkanälen mit Radar- und Ultraschallmessungen bestimmt.



In der Praxis werden für die Ultraschallmessungen bisher hauptsächlich Auswerteverfahren aus der SAFT-Familie (Synthetic Aperture Focusing Technique) genutzt. Diese Verfahren haben aber einige Beschränkungen. Da nur direkte Reflexionen berücksichtigt werden, ist es nicht möglich senkrechte Grenzflächen oder Unterseiten von Einbauteilen abzubilden. Abhilfe schafft dabei das hier genutzte Verfahren der Reverse Time Migration. Durch die Verwendung des gesamten Wellenfeldes bestehen diese Einschränkungen nicht. Die Reverse Time Migration stammt aus der Geophysik und wird dort hauptsächlich zur Erdölexploration eingesetzt. Erste Entwicklungen lieferten Baysal et al. [1], Loewenthal und Mufti [2] und McMechan [3] in den 80er Jahren. Erst die fortschreitende Computertechnik in den letzten 15 Jahren machte es möglich, diese Auswertemethode auch in der Praxis zu nutzen. Eine Anwendungsmöglichkeit für die Erdölindustrie zeigt Farmer et al. [4]. Andere Autoren haben die Reverse Time Migration zur Zustandsüberwachung von Verbundstoffen (structural health monitoring), z.B. zur Rissdetektion, angewendet ([5], [6]). Im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen wurde von den Autoren bereits ein Paper über die Anwendung der Reverse Time Migration auf synthetische Ultraschalldaten veröffentlicht ([7]).

## **1. Reverse Time Migration**

Die Reverse Time Migration ist ein Migrationsverfahren, bei dem nicht nur die direkten Reflexionen, sondern sämtliche Informationen des Wellenfeldes verwendet werden. Durch die Nutzung von Mehrfachreflexionen können auch steilstehende Kanten oder Unterkanten von Einbauteilen abgebildet werden. Der für die folgende Arbeit genutzte Programmcode wurde in einer Diplomarbeit an der TU Freiberg von Maria Baumann-Wilke entwickelt [8]. Weitere Entwicklungen führte André Kurzmann während seiner Dissertation über Wellenforminversion am KIT durch [9]. Es handelt sich um einen Finite-Differenzen Code, der auf den 2D akustischen Fall beschränkt ist. Trotzdem ist die Nutzung auch für spätere Messungen mit Scherwellen möglich (siehe Abschnitt 3.1).

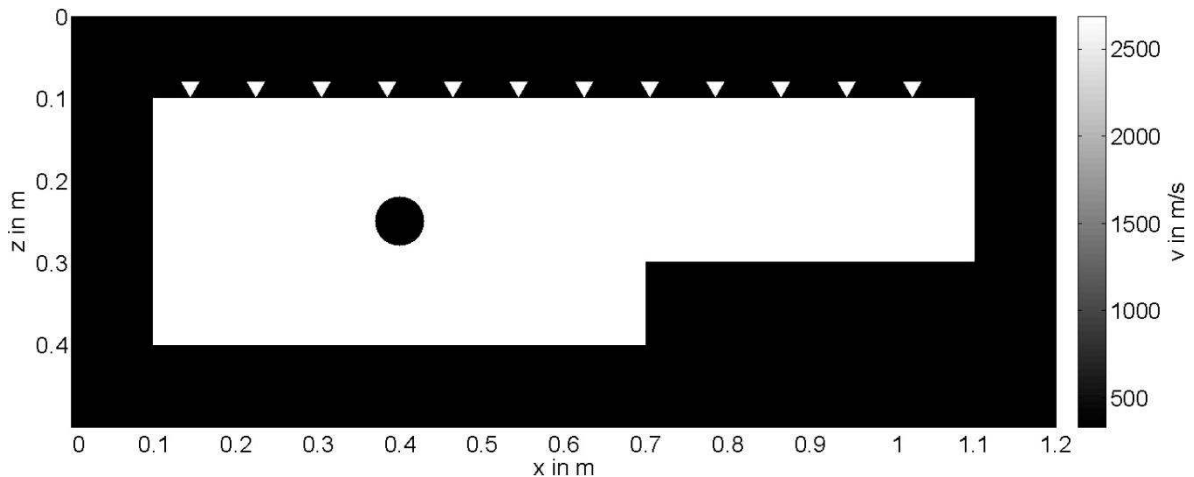
Die Reverse Time Migration besteht aus mehreren Funktionsschritten. Zunächst wird ein Geschwindigkeitsmodell gewählt, welches als Startmodell dient. In diesem Modell wird die Wellenausbreitung nacheinander für jede Sendeposition simuliert. Im Anschluss werden die gemessenen Daten verarbeitet. Dabei werden diese Daten zeitumgekehrt an den Empfängern wieder eingespeist - sie dienen also als Sendesignal - und es werden wieder die Wellenfelder berechnet. Die berechneten Wellenfelder von Vorwärts- und Rückwärtsrechnung müssen nun über eine Abbildungsbedingung miteinander verknüpft werden. Bei dem hier genutzten Code wird dafür die Kreuzkorrelation verwendet. Das vorwärts gerechnete Wellenfeld und das Wellenfeld mit den rückausgebreiteten Messdaten werden für jeden Zeitschritt miteinander kreuzkorreliert. Die Idee dahinter ist, dass an einer Reflektorposition die Kreuzkorrelation der Wellenfelder einen hohen Wert liefert. Als letzten Schritt werden die Korrelationsergebnisse aller Sendepositionen aufsummiert und man erhält das Migrationsergebnis.

## **2. Simulationen**

Um die Leistungsfähigkeit der Reverse Time Migration zu untersuchen, wurden verschiedene Simulationsrechnungen durchgeführt. Das vorgestellte Beispiel zeigt einen Polyamidprobekörper. An Polyamid ist es möglich rauscharme Messdaten zu erzeugen. Im Hinblick auf spätere Messungen wurde deshalb dieses Material simuliert. Abb. 1 zeigt das Modell mit den äußeren Maßen von 1 m x 0.3 m. Umgeben ist dieses Gebiet von einer 0.1 m dicken Luftschicht. Mit diesem Modell sollen zwei schwierige Fragestellungen der

zerstörungsfreien Prüfung nachgebildet werden: die Abbildung einer senkrechten Grenzfläche in Form einer Stufe in der Rückwand und die Durchmesserbestimmung einer Bohrung. Die Stufe hat eine Höhe von 0.1 m, die Bohrung einen Durchmesser von 0.06 m. Die Bohrungsgröße wurde im Hinblick auf die spätere Abbildung von Spannkanälen gewählt. Die Geschwindigkeit der P-Welle in Polyamid beträgt 2687 m/s.

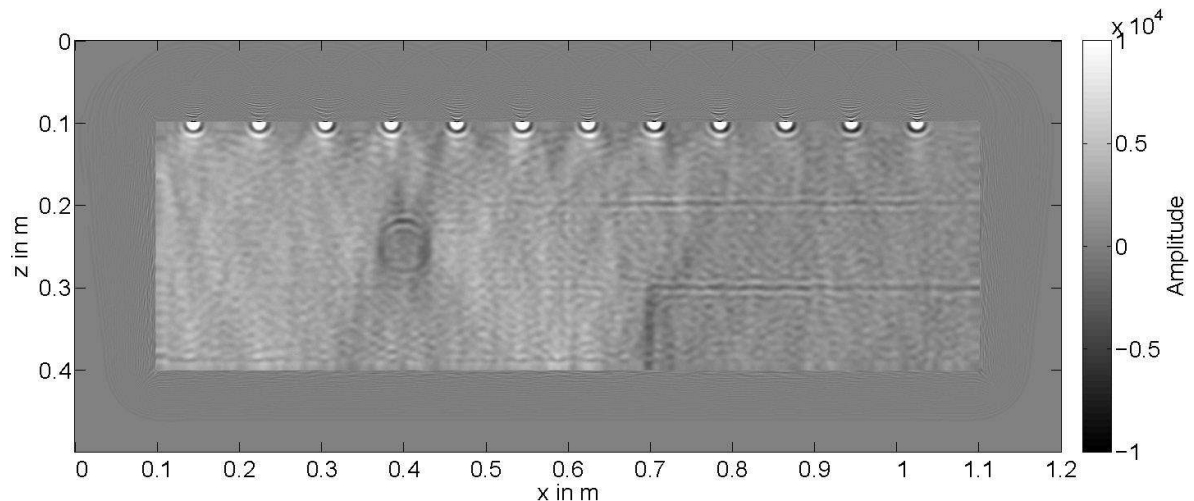
Auf der Oberfläche des Probekörpers wurden 12 Sendepositionen, die gleichzeitig auch Empfängerpositionen sind, im Abstand von 0.08 m definiert. Diese sind in der Abbildung des Modells mit Dreiecken markiert. An den Sendepositionen wurde jeweils ein Ricker-Signal mit einer Frequenz von 100 kHz eingespeist und 0.6 ms aufgezeichnet.



**Abb. 1** Wahres Modell für Simulation mit Polyamid

Als Startmodell wurde ein homogenes Modell genutzt. Dabei werden die Geschwindigkeit und die äußeren Abmessungen des Probekörpers als bekannt vorausgesetzt. Nicht bekannt sind dem Algorithmus hingegen die Bohrung und die senkrechte Grenzfläche. Im Modellbereich von  $x=0.7$  m bis  $x=1.1$  m und  $z=0.3$  m bis  $z=0.4$  m wird also ebenfalls die Geschwindigkeit von Polyamid definiert.

Nach Auswertung der simulierten Daten mit der Reverse Time Migration erhält man das Ergebnis aus Abb. 2. Sehr deutlich ist in diesem Bild die senkrechte Grenzfläche der Stufe erkennbar. Außerdem ist die kreisförmige Bohrung in vollem Umfang abgebildet. Die erwarteten Vorteile gegenüber den herkömmlich genutzten SAFT-Verfahren sind also nachgewiesen. Neben den gewünschten Strukturen sind aber auch Artefakte aus der Migration sichtbar. Einerseits bildet sich über der Stufe eine zweite waagerechte scheinbare Grenzfläche. Diese resultiert aus den Mehrfachreflexionen an der Stufe. Durch Verkürzung der Aufzeichnungszeit lässt sich die Stärke dieses Artefaktes verringern. Als Nachteil ergibt sich dann aber eine schlechtere Abbildung der Bohrung, da die Zeit nicht ausreicht, um Reflexionen aufzuzeichnen, die über die Rückwand des Probekörpers zur Unterseite der Bohrung und im Weiteren wieder zu einem Empfänger reflektiert werden. Desweiteren sind Quellartefakte sichtbar. Diese lassen sich durch Unterdrücken der direkten Welle verringern. Da in den hier vorliegenden Beispielen keine oberflächennahen Strukturen erkundet werden sollen, ist dies zurzeit nicht nötig.



**Abb. 2** Ergebnis der Reverse Time Migration für das simulierte Modell aus Abb. 1

### 3. Messungen an Polyamid

#### 3.1 Probekörper und Messaufbau

Für erste Messungen wurde ein Polyamidprobekörper gegossen (Abb. 3). An diesem lassen sich rauscharme Ultraschalldaten erzeugen und so die Reverse Time Migration an Messdaten genauer untersuchen. Der Probekörper hat die Abmessungen 1 m x 0.6 m x 0.3 m. In ihn wurde im Rahmen einer Messreihe ein Bohrloch eingebracht. Dieses wurde schrittweise von 2 cm auf 5 cm Durchmesser vergrößert. Das Bohrloch befindet sich außerhalb der Probekörpermitte. Dadurch ergeben sich, wenn man von beiden Probekörperseiten Daten aufnimmt, zwei unterschiedliche Bohrungstiefen.

Für die Messung stand ein Linearscannersystem zur Verfügung (Abb. 4). Es handelt sich dabei um ein halbautomatisches System. Dies bedeutet, dass der Sendeprüfkopf von Hand versetzt werden muss, der Empfangsprüfkopf aber vom Scannersystem bewegt wird. Hiermit ist eine schnelle und präzise Datenaufnahme möglich. In den Prüfköpfen sind vier einzelne Punktkontaktprüfköpfe parallel zusammengeschaltet, um eine Welle mit höherer Amplitude in den Probekörper einspeisen zu können. Durch die Anordnung in einer Reihe lässt sich ein längs zum Messprofil fokussiertes Schallfeld erzeugen, sodass auch eine Auswertung mit einer 2D Reverse Time Migration möglich ist. Gleichzeitig handelt es sich in Näherung immer noch um eine Punktquelle, da der Prüfkopf senkrecht zum Profil aufgesetzt wird (Abb. 5). Es wurden für alle Bohrungsgrößen auf der Ober- und Unterseite des Probekörpers Messungen mit Longitudinalwellenprüfköpfen und Scherwellenprüfköpfen durchgeführt. Für die Scherwellenmessung wurden jeweils beide möglichen Polarisationsrichtungen gemessen.



Abb. 3 Polyamidprobekörper



Abb. 4 Scannersystem

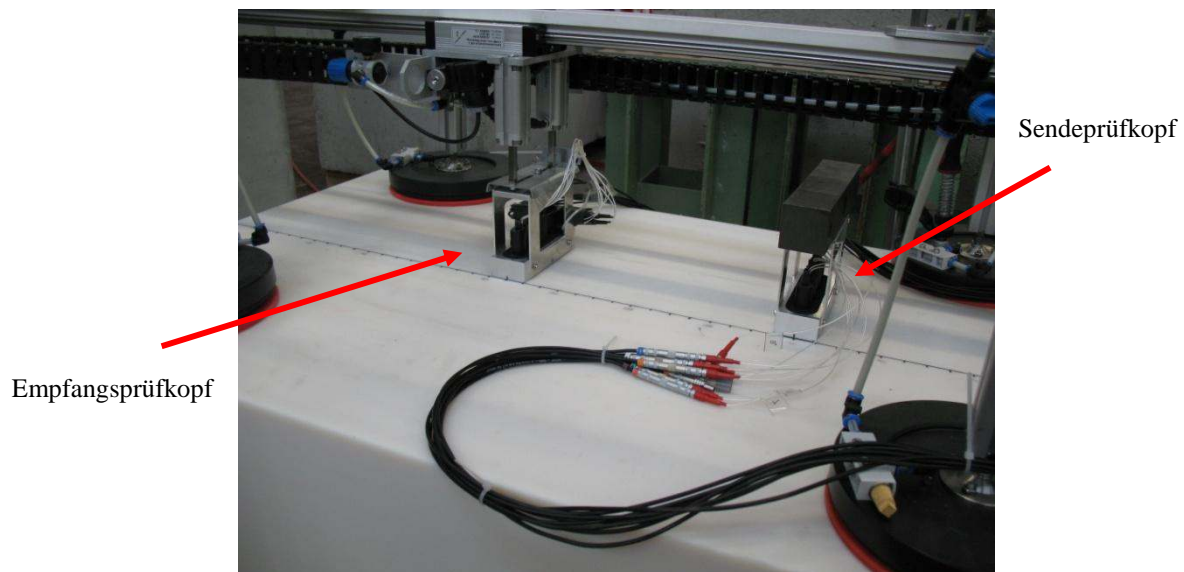


Abb. 5 Detailansicht der Prüfköpfe auf dem Profil

Auf dem Profil wurden 12 Sendepositionen im Abstand von 0.08 m und 45 Empfangspositionen im Abstand von 0.02 m festgelegt. Auf Grund der physischen Ausdehnung des Prüfkopfes ist die Datenaufnahme an jeweils zwei Empfangspositionen links und rechts des Senders nicht möglich. Für die Auswertung mit der Reverse Time Migration stellen diese fehlenden Spuren kein Problem dar. Aktuelle Arbeiten zeigen aber die Möglichkeit diese Spuren mit Hilfe interferometrischer Konzepte zu interpolieren [10].

Mit einem Rechtecksignal wurden die Prüfköpfe für Longitudinalwellen mit 100 kHz angeregt, für Scherwellen mit 50 kHz. Das von den Prüfköpfen auf Grund ihrer begrenzten Bandbreite ins Material abgegebene Signal ähnelt einer Sinusschwingung mit einer Periode. Die Aufzeichnungszeit betrug 2 ms. Für die Migrationsrechnungen wurde zur Vermeidung von Artefakten nur ein Teil des Signals verwendet.

Hinsichtlich der Funktionsweise der Reverse Time Migration ist es wichtig die Abstrahlcharakteristik der Prüfköpfe zu kennen. Im Schritt der Kreuzkorrelation müssen das vorwärts gerechnete (simulierte) Wellenfeld und das rückwärts gerechnete Wellenfeld, welches aus den Messdaten generiert wird, verknüpft werden. Der verwendete Prüfkopf muss sich damit möglichst analog zur simulierten Quelle im Programmcode verhalten. Mit Messungen an einer Polyamidhalbkugel konnte die Richtcharakteristik der Prüfköpfe für Longitudinalwellenanregung und Scherwellenanregung bestimmt werden. Dabei ergab sich, dass das Signal der Scherwellenanregung mit zur Profilrichtung senkrechter Polarisation sehr gut mit der simulierten Quelle übereinstimmt, obwohl der verwendete Code den akustischen Fall simuliert. Für die anderen Anregungsarten trifft dies nicht zu.

Daher werden im Folgenden nur noch die Scherwellenmessdaten, welche senkrecht zum Profil polarisiert sind, ausgewertet.

### 3.2 Migrationsergebnisse

Für die Migration der Messdaten wurde wieder ein homogenes Startmodell genutzt. Dabei wurden die experimentell bestimmte Geschwindigkeit des Polyamids und die äußeren Abmessungen exakt vorgegeben. Um den Probekörper wurde außerdem eine Luftschicht definiert. Das Startmodell enthält keine Informationen zur Bohrung.

Die Abbildungen 6 - 9 zeigen die Migrationsergebnisse für die vier verschiedenen Bohrungsgrößen von 2 cm bis 5 cm. Alle Bohrungen sind, selbst wenn der Durchmesser in der Größenordnung der Wellenlänge ( $\lambda=2.5$  cm) liegt, deutlich sichtbar. Ab einer Größe von 4 cm ist auch der volle Umfang der Bohrung abgebildet. Dies zeigt, dass die Ergebnisse aus den Simulationen sich in die Praxis übertragen lassen. Wider Erwarten ließ sich die 5 cm Bohrung hingegen nicht in vollem Umfang abbilden. Die Gründe dafür sind Teil weiterer Untersuchungen.

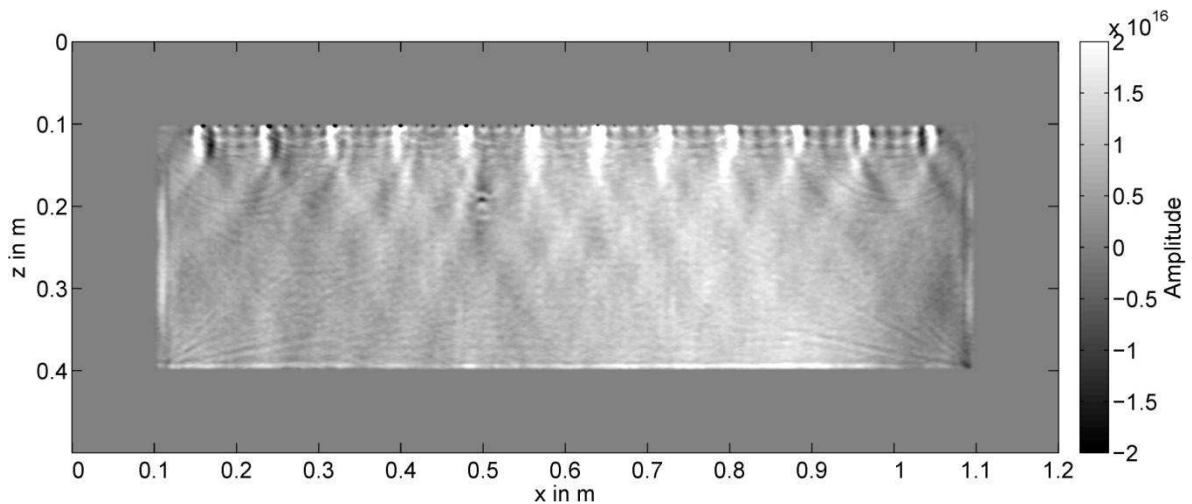


Abb. 6 Migrationsergebnis der Bohrung mit 2 cm Durchmesser

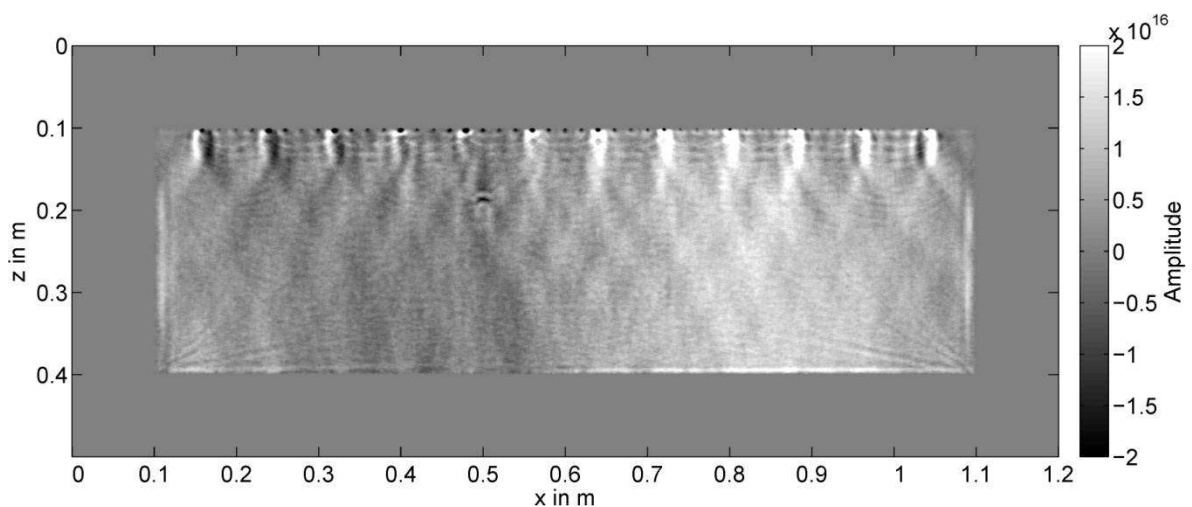
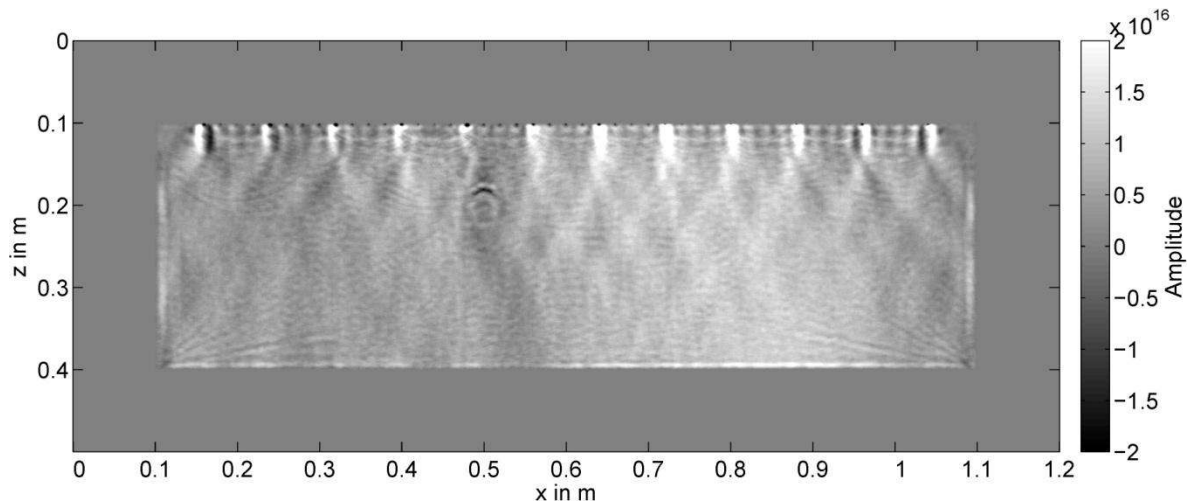
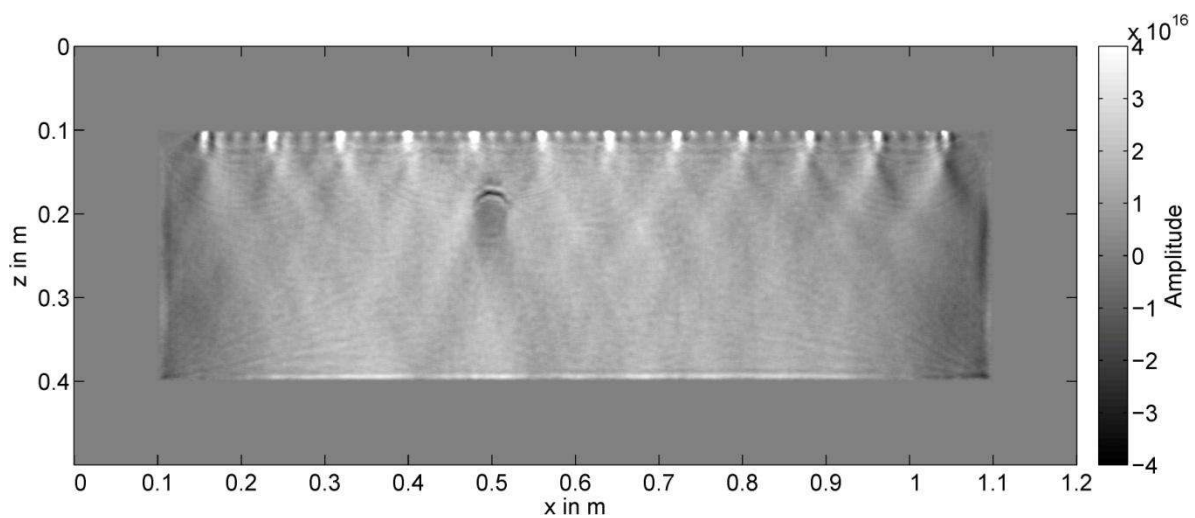


Abb. 7 Migrationsergebnis der Bohrung mit 3 cm Durchmesser



**Abb. 8** Migrationsergebnis der Bohrung mit 4 cm Durchmesser



**Abb. 9** Migrationsergebnis der Bohrung mit 5 cm Durchmesser

#### 4. Zusammenfassung

In der vorgestellten Arbeit wurde die Anwendbarkeit eines geophysikalischen Verfahrens, der Reverse Time Migration, auf die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen gezeigt. Simulationen an einem Polyamidmodell bewiesen die Darstellbarkeit senkrechter Grenzflächen und des gesamten Umfangs von Bohrungen. Die Übertragung in die Praxis gelang durch geeignete Wahl der Prüfköpfe im Zusammenspiel mit dem 2D akustischen Programmcode der Reverse Time Migration. Bei Messungen an einem Polyamidprobekörper konnte eine eingebrachte Bohrung deutlich in vollem Umfang abgebildet werden.

Zukünftig sollen die Erkenntnisse auch auf reale Betonbauteile angewendet werden. Im Unterschied zum Polyamid kommt es dort zu Streuung auf Grund der Zuschläge im Beton. Dadurch wird die Kreuzkorrelation mit den vorwärts gerechneten Wellenfeldern erschwert.

## Referenzen

- [1] E. Baysal, D. D. Kosloff und W. C. Sherwood, „Reverse time migration,“ *Geophysics*, Bd. 48, Nr. 11, pp. 1514-1524, 1983.
- [2] D. Loewenthal und I. R. Mufti, „Reversed time migration in spatial frequency domain,“ *Geophysics*, Bd. 48, Nr. 5, pp. 627-635, 1983.
- [3] G. A. McMechan, „Migration by Extrapolation of Time-Dependent Boundary Values,“ *Geophysical Prospecting*, Bd. 31, Nr. 3, pp. 413-420, 1983.
- [4] P. A. Farmer, I. F. Jones, H. Zhou, R. I. Bloor und M. C. Goodwin, „Application of reverse time migration to complex imaging problems,“ *first break*, Bd. 24, Nr. September, pp. 65-73, 2006.
- [5] L. Zhou, F. G. Yuan und W. J. Meng, „A pre-stack migration method for damage identification in composite structures,“ *Smart Structures and Systems*, Bd. 3, Nr. 4, pp. 439-454, 2007.
- [6] L. Wang und F. G. Yuan, „Damage Identification in a Composite Plate using Prestack Reverse-time Migration Technique,“ *Structural Health Monitoring*, Bd. 4, Nr. 3, pp. 195-211, 2005.
- [7] S. Müller, E. Niederleithinger und T. Bohlen, "Reverse Time Migration: A Seismic Imaging Technique Applied to Synthetic Ultrasonic Data," *International Journal of Geophysics*, vol. 2012, no. Article ID: 128465, p. 7, 2012.
- [8] M. Baumann-Wilke, *Amplitudenbewahrende akustische Reverse-Time Migration: Theorie und numerische Anwendung*, TU Freiberg, 2009.
- [9] A. Kurzmann, *Applications of 2D and 3D full waveform tomography in acoustic and viscoacoustic complex media*, KIT Karlsruhe, 2012.
- [10] E. Niederleithinger, „Neue Ideen für die zerstörungsfreie Prüfung von Beton: Seismische Interferometrie und mehr,“ in *Berichtsband DGZfP-Jahrestagung*, Potsdam, 2014.