

Weiterentwicklung der Reverse Time Migration zur Anwendung auf Ultraschall-Echo-Daten in der zerstörungsfreien Prüfung

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades einer

Doktorin der Naturwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Geophys. Sabine Müller

Berichtende: Herr Priv. Doz. Dr. Ernst Niederleithinger
Herr Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Klaus Reicherter

Tag der mündlichen Prüfung: 07.07.2023

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Grundlagen der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall	6
2.1	Grundlagen der Wellenausbreitung	6
2.1.1	Die akustische Wellengleichung und Vergleich mit der SH-Wellengleichung	7
2.1.2	Kenngrößen der Wellenausbreitung und das Verhalten von Wellen in Materie	9
2.2	Fragestellungen aus bautechnischer Sicht	11
2.3	Stand der Technik bei Ultraschall-Echo-Verfahren	11
2.3.1	Messtechnik	11
2.3.2	Das SAFT-Verfahren	13
3	Reverse Time Migration	15
3.1	Mathematische Herleitung der Reverse Time Migration	15
3.2	Funktionsweise der Reverse Time Migration	17
3.3	Anmerkung zum Programmcode	20
3.3.1	Finite-Differenzen-Approximation der Wellengleichung	20
3.3.2	Perfectly matched layers	21
4	Vorüberlegungen für Simulationsrechnungen und Datenauswertung	23
4.1	Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten	23
4.1.1	Schallgeschwindigkeit von Luft	23
4.1.2	Schallgeschwindigkeit von Polyamid	24
4.2	Planung der Probekörpergröße	24
5	Simulationen mit dem homogenen Material Polyamid	25
5.1	Variation der Aufzeichnungszeit	27
5.2	Variation des Empfängerabstandes	29
5.3	Variation des Senderabstandes	31
5.4	Variation der Größe einer Bohrung	32
6	Messungen an Testobjekten	36
6.1	Messtechnik	36
6.1.1	Prüfköpfe und Richtcharakteristik	36
6.1.2	Messelektronik	37
6.1.3	Scanner	39
6.2	Datenprocessing	39

Inhaltsverzeichnis

6.3	Messungen an einem Polyamidprobekörper	41
6.3.1	Bearbeitung der Messdaten	44
6.3.2	Datenbeispiele	46
6.3.3	Reverse Time Migration der Messdaten	48
6.3.3.1	Nullmessung ohne Bohrung	50
6.3.3.2	Bohrung mit 2 cm Durchmesser	52
6.3.3.3	Bohrung mit 3 cm Durchmesser	55
6.3.3.4	Bohrung mit 4 cm Durchmesser	57
6.3.3.5	Bohrung mit 5 cm Durchmesser	59
6.3.3.6	Bohrung mit 5 cm Durchmesser mit Anwendung einer Amplitudenverstärkung (AGC)	61
6.3.3.7	Bohrung mit 5 cm Durchmesser gemessen mit 45 Sende- positionen	63
6.3.4	Vergleich mit SAFT-Rekonstruktion	65
6.3.5	Diskussion der Ergebnisse	65
6.4	Messung an einem Betonprobekörper mit Spannkanaal	66
7	Praxisbeispiel	70
7.1	Messung an der Leinebrücke	70
7.2	Auswertung der Messdaten der Leinebrücke	74
7.3	Simulation der Messung an der Leinebrücke	77
7.4	Diskussion der Ergebnisse und Vergleich mit den Simulationsergebnissen	80
8	Zusammenfassung und Ausblick	83
	Literaturverzeichnis	85
	Abbildungsverzeichnis	88
	Tabellenverzeichnis	92
	Symbolverzeichnis	93
	Abkürzungsverzeichnis	94
Anhang		95
A.1	Reverse Time Migration mit Longitudinalwellendaten und Scherwellen- daten parallel zum Profil polarisiert	95
Kurzfassung		103
Abstract		104
Danksagung		105

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Der Arbeit voraus ging bereits meine Diplomarbeit des selben Themas, welche dann in der Dissertation fortgeführt und erweitert wurde. Zum Zeitpunkt des Beginns der Diplomarbeit war dies die erste Arbeit in dieser Richtung. Ein geophysikalisches Verfahren sollte dabei auf die zerstörungsfreie Prüfung angewendet werden. Die Reverse Time Migration wurde gewählt, da diese in der geophysikalischen Exploration bereits oft eingesetzt wird. Die dort ersichtlichen Vorteile gegenüber konventionellen Migrationsverfahren wurden auch als vielversprechend für die zerstörungsfreie Prüfung angesehen.

In der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen werden verschiedene Messverfahren angewendet, um Informationen über den inneren Aufbau von Bauteilen zu erhalten. Es werden dabei vor allem die Verfahren Ultraschall, Radar oder Thermographie eingesetzt. Ziel ist es zumeist bei Bestandsbauwerken die Integrität zu prüfen. Bei Neubauten lassen sich mit der zerstörungsfreien Prüfung mögliche Baumängel feststellen. In dieser Arbeit wird nur ein spezielles Problem der Ultraschallprüfung betrachtet. Mit Hilfe dieser ist es möglich Spannkanele von z.B. Brückenbauwerken zu orten und charakterisieren. Möglicherweise können auch Fehler innerhalb eines solchen Spanngliedes detektiert werden. Die Auswertung der Daten wird bisher mit dem SAFT-Algorithmus (Synthetic Aperture Focusing Technique) durchgeführt. Begründet durch den Algorithmus unterliegt die Auswertung diverser Limitierungen.

Ziel der Arbeit ist es, die Leistungsfähigkeit der Reverse Time Migration für die zerstörungsfreie Prüfung zu untersuchen. Dabei soll insbesondere geprüft werden, ob sich innerhalb von Betonbauteilen steil stehende Strukturen und die Unterseite von Einbauten darstellen lassen. Mit den bisher in der zerstörungsfreien Prüfung genutzten Verfahren (z.B. dem SAFT-Algorithmus) ist dies nicht möglich. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen wird die Nutzbarkeit der Reverse Time Migration nachgewiesen. In Parameterstudien werden verschiedene Sender- und Empfängerabstände getestet und damit ein optimaler Abstand für später durchgeführte Messungen bestimmt. Außerdem lassen sich so die Auflösbarkeit von Strukturen wie z.B. Einschlüssen oder Stufen untersuchen.

Die ersten Messungen werden am homogenen Material Polyamid durchgeführt, um möglichst ideale rauscharme Messdaten zu erhalten. Störende Einflüsse von Kornrauschen in Beton werden damit zunächst vermieden und es können die in den Simulationen nachgewiesenen Vorteile der Reverse Time Migration auch für die Messungen gezeigt werden.

1 Einleitung

In einer umfangreichen Messreihe wurde die Abbildung eines Bohrlochs quantitativ untersucht. Für eine Messung an Beton steht ein Probekörper mit eingebautem Spannkanal und Verpressfehler zur Verfügung. Auch hier wird die Darstellbarkeit des Spannkannels untersucht. Zum Abschluss der Arbeit wird eine Messung an einem Brückenbauwerk durchgeführt, bei dem das Auswerteverfahren in der Praxis getestet werden kann.

2 Grundlagen der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall

In der zerstörungsfreien Prüfung werden vielfältige Verfahren genutzt, um Bauteile unterschiedlichster Materialien zu untersuchen. Dabei handelt es sich einerseits um das weitläufige Gebiet der Metallprüfung, welche in dieser Arbeit jedoch nicht behandelt wird. Hier wird lediglich auf die Prüfung im Bauwesen eingegangen und dabei im Speziellen auf die Prüfung von Betonbauteilen. Die wichtigsten Verfahren sind dabei die Ultraschallprüfung, das Radarverfahren, Impact-Echo und Thermographie. Die vorliegende Arbeit betrachtet im Folgenden nur noch das Ultraschallverfahren. Jedoch muss zunächst noch darauf hingewiesen werden, dass auch die anderen Verfahren wichtige Prüfmethoden darstellen. Ein wichtiges bildgebendes Verfahren zur Prüfung von Beton ist dabei das Radarverfahren, bei dem mittels elektromagnetischer Methoden Erkenntnisse über den inneren Aufbau eines Bauteils erlangt werden. Dabei können im Gegensatz zum Ultraschall besonders gut die schlaffe Bewehrung und andere oberflächennahe metallische Bauteile erfasst werden. In der vorliegenden Arbeit wurde jedoch dieses Prüfproblem nicht betrachtet, weshalb das Radarverfahren nicht genutzt wurde. Das Impact-Echo-Verfahren behandelt vorzugsweise die Untersuchung von Ablösungen im Beton, welche hier ebenfalls nicht betrachtet werden. Auch mit der Thermographie können Fehlstellen anhand von unterschiedlichem Wärmeabklingverhalten sichtbar gemacht werden.

Im folgenden Kapitel wird der Nutzen der Ultraschallprüfung in der zerstörungsfreien Prüfung erläutert. Nach einer Einführung zu Ultraschall allgemein, Schwingungen, Wellen und deren Ausbreitungsverhalten wird auf den Stand der Technik eingegangen. Im Speziellen werden hierbei die Messtechnik und die damit zu bearbeitenden Prüfprobleme beschrieben. Zum Schluss wird auf die aktuellen Auswertemethoden eingegangen.

2.1 Grundlagen der Wellenausbreitung

Als Ultraschallwelle wird üblicherweise eine akustische Welle mit einer Frequenz von über 20 kHz bezeichnet. Sie liegt damit außerhalb des menschlichen Hörbereiches [DIN10]. Diese mechanische Welle baut sich aus Schwingungen der einzelnen Stoffteilchen auf, indem diese Schwingungen von einem Teilchen zum Nächsten übertragen werden. Es handelt sich dabei um eine elastische Welle, da die Teilchen nicht starr miteinander verbunden sind und somit in unterschiedlichen Phasen schwingen [Krautkraemer86].

Es gibt unterschiedliche Wellenarten. Die Longitudinalwelle, oder auch Kompressionswelle, ist eine Welle, bei der die Teilchen in Ausbreitungsrichtung schwingen. Bei der Transversalwelle, oder auch Scherwelle genannt, schwingen die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung [Krautkraemer86].

2.1.1 Die akustische Wellengleichung und Vergleich mit der SH-Wellengleichung

Das in der Diplomarbeit von Maria Baumann-Wilke entstandene Programm für die Reverse Time Migration verwendet zur Berechnung der Wellenfelder die akustische Wellengleichung. Diese lässt sich aus folgenden Gleichungen herleiten [Hertweck01]:

1. Die Eulersche Bewegungsgleichung

$$\frac{\partial \tilde{\vec{v}}}{\partial t} + (\tilde{\vec{v}} \cdot \nabla) \tilde{\vec{v}} = -\frac{1}{\tilde{\rho}} \nabla \tilde{p} \quad (2.1)$$

mit der Partikelgeschwindigkeit $\tilde{\vec{v}} = \tilde{\vec{v}}(\vec{x}, t)$, der Dichte $\tilde{\rho} = \tilde{\rho}(\vec{x}, t)$, dem Druck $\tilde{p} = \tilde{p}(\vec{x}, t)$, den räumlichen Koordinaten $\vec{x} = (x, y, z)$ und der Zeit t .

$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ ist der Nablaoperator.

2. Die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{\rho} \tilde{\vec{v}}) = 0 \quad (2.2)$$

3. Die Zustandsgleichung (Voraussetzung: verlustfreie Wellenausbreitung)

$$\tilde{p} = f(\tilde{\rho}) \quad (2.3)$$

Die Größen $\tilde{\vec{v}}$, $\tilde{\rho}$ und $\tilde{p}$ beschreiben kleine Schwankungen um die Gleichgewichtslage $\vec{v}_0$, ρ_0 , p_0 . Daraus ergibt sich ein linearer Störungsansatz.

$$\tilde{\vec{v}} = \vec{v}_0 + \varepsilon \vec{v} \quad \tilde{\rho} = \rho_0 + \varepsilon \rho \quad \tilde{p} = p_0 + \varepsilon p \quad (2.4)$$

Für $\varepsilon \rightarrow 0$ geht das Problem in ein ungestörtes Problem über. Die Gleichungen aus (2.4) werden nun in (2.1)-(2.3) eingesetzt und nach Potenzen von ε geordnet. Für die 1. Potenz von ε mit $\vec{v}_0$, $\nabla p_0 = 0$ und $\frac{\partial \rho_0}{\partial t} = 0$ ergibt sich

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 (\vec{x} \nabla \cdot \vec{v}) + (\vec{v} \cdot \nabla) \rho_0 = 0 \quad (2.6)$$

mit $\vec{v} = \vec{v}(\vec{x}, t)$, $\rho_0 = \rho_0(\vec{x})$, $\rho = \rho(\vec{x}, t)$ und $p = p(\vec{x}, t)$.

Die Zustandsgleichung verknüpft die Gleichungen (2.5) und (2.6). Die Ableitung lautet

$$\frac{d\tilde{p}}{dt} = f'(\rho_0) \frac{d\tilde{\rho}}{dt} \quad (2.7)$$

Mit $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla$ erhält man

$$\frac{\partial p}{\partial t} = f'(\rho_0) \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \rho_0 \right) \quad (2.8)$$

Nun setzt man (2.6) in (2.8) ein und erhält

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -f'(\rho_0) \rho_0 \nabla \cdot \vec{v} \quad (2.9)$$

Die partielle Ableitung dieser Gleichung nach t und Einsetzen in (2.5) ergibt

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + f'(\rho_0) \rho_0 \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) \\ &= \frac{1}{f'(\rho_0)} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + (\nabla \ln \rho_0) \cdot (\nabla p) - \Delta p \end{aligned} \quad (2.10)$$

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ist der Laplace-Operator. Mit $\rho_0(\vec{x}) = \rho_0$ (homogene Dichteverteilung) ergibt sich die quellfreie akustische Wellengleichung

$$\Delta p = \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

mit $p = p(\vec{x}, t)$ und $f'(\rho_0) = v_p^2$. Beim Auftreten von äußeren Kräften (Quellen) ergibt sich die akustische Wellengleichung zu

$$\frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \Delta p = s(t) \quad (2.12)$$

mit dem Quellterm $s(t)$.

Die Wellengleichung für Scherwellen ergibt sich aus der elastodynamischen Wellengleichung [Hertweck01]. Sie wird mittels folgenden grundlegenden physikalischen Prinzipien hergeleitet:

- Beschreibung der Kinematik bei einer Deformation
- Beschreibung der Kräfte und Spannungen, Spannungstensor
- Aufstellung der Bewegungsgleichung aus dem Newton'schen Gesetz
- Hooke'sches Gesetz und Naviergleichung

Die Naviergleichung wird dann zur Wellengleichung reduziert. Es ergibt sich die Summe aus der Gleichung für Longitudinalwellen (siehe Gleichung 2.11) und der für Scherwellen

$$\Delta\delta = \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \delta \quad (2.13)$$

wobei δ die Verschiebung bezeichnet, v_s die Scherwellengeschwindigkeit und t die Zeit. Die Verschiebung kann dabei in verschiedene Richtungen erfolgen. Daraus ergeben sich jeweils die Gleichungen für horizontal und vertikal polarisierte Scherwellen. Auf Grund der mathematischen Ähnlichkeit zur akustischen Wellengleichung (Gleichung 2.11), den übereinstimmenden Reflexionskoeffizienten (siehe folgendes Kapitel) und den vergleichbaren Richtcharakteristiken (siehe Kapitel 6.1.1) ist es möglich, Messungen mit SH-Wellen mit dem akustischen Code für die Reverse Time Migration auszuwerten.

2.1.2 Kenngrößen der Wellenausbreitung und das Verhalten von Wellen in Materie

Wellen sind durch die drei Kenngrößen Ausbreitungsgeschwindigkeit c , Wellenlänge λ und Frequenz f bestimmt, welche im Zusammenhang

$$c = \lambda f \quad (2.14)$$

stehen. In Gasen und Flüssigkeiten können sich Transversalwellen nicht ausbreiten, da Schubkräfte in ihnen nicht übertragen werden [Krautkraemer86]. Dieser Umstand wird bei späteren Simulationen und Messungen ausgenutzt, da damit an der Grenzfläche von Festkörper zu Luft eine Totalreflexion entsteht (Kapitel 5 und 6).

Treffen Wellen auf eine Grenzfläche werden sie je nach Grenzflächenbeschaffenheit, Einfallswinkel und Wellenart reflektiert, gebrochen, absorbiert und/oder gestreut. Außerdem finden teilweise auch Modenkonversionen statt. Abbildung 2.1 zeigt für die einfallende P-Welle, SH-Welle und SV-Welle das unterschiedliche Verhalten beim Auftreffen auf eine Grenzfläche. Bei P-Wellen findet neben einer Reflexion auch die Modenkonversion in eine SV-Welle (vertikal polarisierte Scherwelle) statt. Ebenso findet bei einfallender SV-Welle eine Modenkonversion in eine P-Welle statt. Bei Einfall einer SH-Welle (horizontal polarisierte Scherwelle) findet keine Umwandlung in andere Wellenarten statt. Dieser Vorteil wird bei den später durchgeführten Messungen und der Auswertung mit dem akustischen Simulationscode ausgenutzt.

Zur Beschreibung der Reflexion dient der Reflexionskoeffizient. Dieser beschreibt das Amplitudenverhältnis zwischen einfallender und reflektierter Welle beim Übergang von Medium 1 zu Medium 2. R_L ist dabei der Koeffizient für Longitudinalwellen, R_T für Transversalwellen.

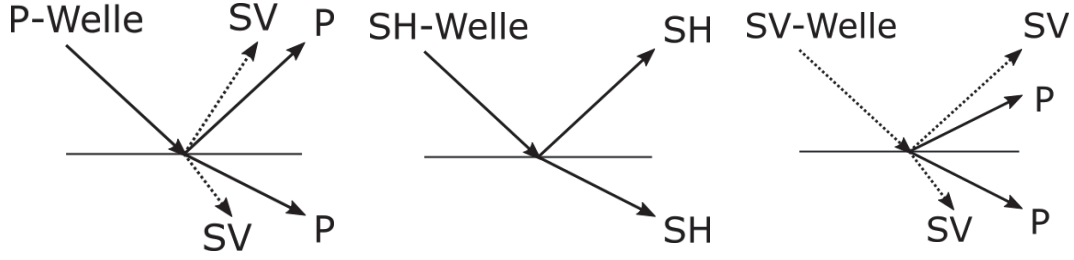


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Reflexion, Brechung und Modenkonversion bei verschiedenen einfallenden Wellenarten

$$R_L = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.15)$$

$$R_T^{SV} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.16)$$

mit

$$Z = \rho \cdot c \quad (2.17)$$

Der Reflexionskoeffizient kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Die Größe Z beschreibt den Schallwellenwiderstand oder auch Schallimpedanz, wobei ρ die Dichte des Materials und c die Wellengeschwindigkeit ist. Es ist hierbei zu beachten, dass die genannte Gleichung für den Reflexionskoeffizient von Transversalwellen nur für SV-Wellen, also senkrecht polarisierte Scherwellen gilt. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit werden Messungen mit SH-Wellen, also horizontal polarisierten Scherwellen, durchgeführt. Hierbei gilt für den Reflexionskoeffizienten ([Langenberg10])

$$R_T^{SH} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.18)$$

Für die Brechung von Ultraschallwellen gilt

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2.19)$$

Außerdem kommt es an Grenzflächen und an Inhomogenitäten innerhalb des Materials zur Schallstreuung und Absorption (Umformung von Schallenergie in Wärme).

An Grenzflächen finden häufig Modenkonversionen statt. Dabei wird z.B. die Energie einer Longitudinalwelle teilweise in eine Transversalwelle umgewandelt. In dieser Arbeit wird der Effekt ausgenutzt, dass SH-Wellen (horizontal polarisierte Scherwellen) bei zweidimensionaler Betrachtung bei Reflexion an einer Grenzfläche unabhängig vom Einfallswinkel in keine andere Wellenart umgewandelt und außerdem total reflektiert werden [Langenberg10].

2.2 Fragestellungen aus bautechnischer Sicht

Die zerstörungsfreie Prüfung wird im Bauwesen zur Überprüfung und Überwachung von Bauwerken, wie z.B. Brücken, angewendet. Gerade bei älteren Bauwerken sind häufig keine oder nur unvollständige Bestandspläne vorhanden, sodass nur unzureichende Aussagen über deren Konstruktion getroffen werden können. Eine Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung ist hier die Untersuchung des Bauwerkes auf dessen Konstruktionsmerkmale. Wichtig ist dabei Lage, Menge und Zustand von Bewehrung und Spannkälen. Diese dienen der Standsicherheit einer Brücke. Beton selbst hat zwar eine hohe Druckfestigkeit, jedoch nur eine geringe Zugfestigkeit. Aus diesem Grund wird er mit Bewehrungsstahl zu Stahlbeton verstärkt. Bei Brücken kommt mit der Verspannung eine weitere Konstruktionseigenschaft hinzu. Dazu werden vor dem Betonieren Rohre in den Beton eingebracht durch die wiederum Spanndrähte geführt werden. Werden diese nun vorgespannt und mit Mörtel verpresst ergibt sich eine weitere Verstärkung der Zugfestigkeit des Betons. Diese Variante des Stahlbetons wird Spannbeton genannt. Es gibt weiterhin verschiedene Arten des Einbaus und des Zeitpunktes der Vorspannung. Bei älteren Bauwerken kam es im Zuge der Verpressung mit Mörtel teils zu so genannten Verpressfehlern. Dabei ist der Stahl nicht vollständig von Mörtel umschlossen und es ergeben sich Luftblasen. Diese führen zusammen mit Wasser zu Korrosion der Spanndrähte und gefährden so die Standsicherheit des Bauwerkes. Deshalb ist eine wichtige Aufgabe der zerstörungsfreien Prüfung auch das Auffinden solcher Verpressfehler. Heute kommen solche Baufehler nur noch selten vor. Auch die Bestimmung von Lage und Größe ganzer Spannkälen ist wichtig. Da bei einigen Bauwerken keine Pläne mehr vorhanden sind, müssen diese Daten mittels Messungen neu beschafft werden. Dies ist für eine langfristige Weiternutzung des Bauwerkes notwendig.

2.3 Stand der Technik bei Ultraschall-Echo-Verfahren

2.3.1 Messtechnik

Um das Ultraschall-Echo-Verfahren auf Betonbauteile anwenden zu können, wird im Frequenzbereich von 50 bis 250 kHz gearbeitet. Nur so kann eine nennenswerte Eindringtiefe erreicht werden. In der Vergangenheit wurden zunächst breitbandige Prüfköpfe verwendet, welche Longitudinalwellen aussenden. Ein Nachteil dieser ist, dass sie mit Hilfe eines Koppelmittels an das Bauteil angekoppelt werden müssen. Eine Weiterentwicklung stellen Punktkontaktprüfköpfe dar, welche auch Scherwellen aussenden können. Bei diesen ist kein Koppelmittel mehr nötig [Krause04]. Die Spitze dieser Prüfköpfe ist hier lediglich 1 bis 2 mm groß. Heute werden hauptsächlich Punktkontaktköpfe in verschiedenster Bauweise für die Ultraschallmessungen verwendet. Die auch in den später folgenden Messungen genutzten Punktkontaktprüfköpfe wurden von der Firma Acoustic Control Systems (ACSYS) entwickelt. Verschiedene Bauweisen ermöglichen die Aussendung von Longitudinalwellen oder Transversalwellen. Die Prüfköpfe arbeiten nach dem piezoelektrischen Prinzip [Shevaldykin03]. Einer dieser Prüfköpfe ist in Abbildung 2.2 zu sehen.



Abbildung 2.2: Punktkontaktprüfkopf der Firma ACSYS

Eine Weiterentwicklung stellt das Zusammenschalten mehrerer Punktkontaktprüfköpfe zu Arrays dar. Diese werden häufig für scannende Untersuchungen an Bauteilen genutzt. Einen solchen Prüfkopf zeigt Abbildung 2.3. Bei diesem sind je 12 der 24 Punktkontaktprüfköpfe parallel zusammengeschaltet. Dies bedeutet, dass die eine Hälfte des Prüfkopfes Ultraschallwellen sendet und die andere Hälfte empfängt. Es ergibt sich damit eine schnelle Art zero-offset Echomessungen durchzuführen. Die einzelnen Punktkontaktprüfköpfe werden federnd im Gehäuse eingebaut, sodass sie mit einem bestimmten Druck an die Bauteiloberfläche angekoppelt werden können.



Abbildung 2.3: Arrayprüfkopf des kommerziell erhältlichen Gerätes A1220 der Firma ACSYS

Ein weiteres wichtiges kommerzielles Gerät ist das A1040 MIRA der Firma ACSYS (Ab-



Abbildung 2.4: A1040 MIRA der Firma ACSYS in der Draufsicht mit im Display dargestelltem SAFT-Ergebnis

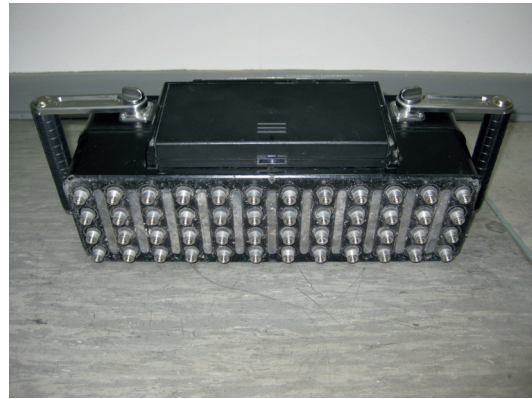


Abbildung 2.5: Seitenansicht der im A1040 MIRA eingebauten Prüfköpfe der Firma ACSYS

bildung 2.4 und 2.5). Hier werden je vier Punktkontaktprüfköpfe zusammen geschaltet. Auch diese sind wieder federnd im Gehäuse gelagert. Eine Reihe dieser Prüfköpfe wird dann zunächst als Sender benutzt, alle anderen Prüfköpfe sind in dieser Zeit Empfänger. Mittels einer Software werden dann sämtliche Prüfköpfe durchgeschaltet, sodass jede als Sender fungiert. Es wird also eine Multi-Offset-Messung durchgeführt. Im Anschluss daran erfolgt direkt eine Auswertung mit einem SAFT-Algorithmus (weiteres dazu unter Kapitel 2.3.2) und eine Darstellung auf dem eingebauten Display.

Handmessungen eignen sich lediglich für den Forschungsbereich und für Testzwecke. Aus diesem Grund wurden an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung im Laufe der Jahre viele unterschiedliche automatisierte Messsysteme (Scanner) entwickelt. Bei diesen übernimmt ein Computerprogramm das Positionieren der Prüfköpfe. Klassischerweise werden Messungen mit den vorgestellten Arrayprüfköpfen des A1220 durchgeführt. Da Sender und Empfänger hier fest miteinander verbaut sind, muss nur ein Prüfkopf verschoben werden. Im Forschungsbereich, wie auch hier in der Arbeit, werden jedoch auch Scanner mit getrenntem Sende- und Empfangsprüfkopf genutzt. Ein solcher wird später in Kapitel 6.1.3 vorgestellt. Des Weiteren gibt es auch Weiterentwicklungen, bei denen sich ein Roboter beispielsweise an einer Wand oder sich fahrend über große Flächen bewegt. Auch hier können, wie an den Scannern, neben Ultraschall-Echo-Messungen auch weitere Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung angewendet werden.

2.3.2 Das SAFT-Verfahren

Das etablierte Verfahren zur Auswertung von Ultraschall-Echo-Daten an Beton ist die Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT). Es gibt verschiedene Varianten im Zeit- und Frequenzbereich, welche alle weitestgehend der in der Geophysik genutzten Kirchhoffmigration mit konstanter Geschwindigkeit entsprechen. Eine ausführliche Darstellung der Theorie findet man von Langenberg, Marklein und Mayer in [Langenberg10].

Zur Lokalisierung von Fehlstellen könnte auch mit Prüfköpfen mit großen Durchmessern gemessen werden. Mit diesen ist es möglich ein fokussiertes Schallbündel auszusenden und örtlich aufgelöst zu messen. Jedoch lassen sich Prüfköpfe mit einem Durchmesser größer als 50 mm nur schlecht an eine Betonoberfläche ankoppeln. Aus diesem Grund wird mit Hilfe der synthetischen Apertur und einem Punktstrahler mathematisch fokussiert [Schickert03].

Zunächst werden die Daten prozessiert um das Signal-/Rauschverhältnis zu verbessern. Außerdem muss die Wellengeschwindigkeit bestimmt oder angenommen werden. Die Oberflächenwelle kann zur Verbesserung des Ergebnisses entfernt werden. Dies führt jedoch im oberflächennahen Bereich auch zum Verlust von Nutzsignalen. Im zweiten Schritt werden die gemessenen Signale räumlich auf das Rechengebiet aufgeteilt. Es werden einzelne Pixel definiert und für jeden die kürzeste Distanz in Bezug auf Sender und Empfänger berechnet. Mit der angenommenen Wellengeschwindigkeit kann nun eine Laufzeit für diesen Pixel und das entsprechende Sender-Empfänger-Paar berechnet werden. Es ergibt sich ein Array von Laufzeiten für jedes Sender-Empfänger-Paar und jedes Pixel. Nun wird die Summe für jedes Pixel gebildet. An Orten, an denen sich ein Streuer befindet, wird die Summe größer ausfallen, als an Orten ohne Streuer. Somit lassen sich Einbauten oder Fehlstellen in Beton lokalisieren. Als letzten Schritt wird die Magnitude bzw. Einhüllende mit der Hilberttransformation bestimmt und dargestellt. Diese Abbildungen lassen sich dann leichter interpretieren als das vorher vorhandene Wechselsignal [Choi16].

Das Verfahren hat jedoch einige Limitierungen. So werden nichtlineare Effekte, wie die Wechselwirkung von Streuern untereinander und Mehrfachreflexionen, vernachlässigt [Zimmer08]. Dies kann zu Fehlabbildungen im Ergebnis führen. Außerdem ist es dann nicht möglich steil stehende Strukturen oder die Unterseite von Einbauten abzubilden. Letzteres lässt sich bei Hüllrohren nur über Umwege mittels umlaufender Wellen verwirklichen [Krause09]. Diese Limitierungen resultieren bereits aus dem Nachteil einer zero-offset Reflexionsmessung, wenn nur eine Seite des Bauteils zugänglich ist. Auf Grund der Oberflächenwellen können deshalb auch Strukturen nahe der Oberfläche nur unzureichend abgebildet werden [Choi16]. Bei der Berechnung wird außerdem nur eine Hintergrundgeschwindigkeit angenommen. Variiert diese innerhalb des Messgebietes stark, kommt es zu Verzerrungen im Ergebnis [Schickert03].

3 Reverse Time Migration

Aktuelle Migrationsmethoden wie Kirchhoff- oder Stolt-Migration sind in ihrer Auflösungsgenauigkeit des Untergrundes limitiert. Abhilfe schafft dabei die Reverse Time Migration (RTM). Mit ihr ist es möglich steile Grenzflächen von über 70° darzustellen und Multiplen zu berücksichtigen.

Von McMechan [McMechan83] und Baysal et al. [Baysal83] wurden Anfang der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts mehrere Publikationen zu diesem Thema veröffentlicht. Baysal nutzt die Fouriermethode der zeitumgekehrten Migration. McMechan verwendet eine Finite-Differenzen-Lösung der akustischen Wellengleichung. Des Weiteren gibt es erste Veröffentlichungen zur Reverse Time Migration von Kosloff [Kosloff83] und Loewenthal [Loewenthal83]. Im Gegensatz zur strahlenbasierten Kirchhoffmigration ist die Reverse Time Migration wellengleichungsbasiert. Dabei wird die vollständige Wellengleichung verwendet, weshalb die Berechnungen sehr rechenintensiv sind. Aus diesem Grund haben Asadollahi und Khazanovich einen analytischen Ansatz für die Reverse Time Migration entwickelt. Bei diesem wird weniger Speicher und Rechenzeit benötigt. Des Weiteren konnten sie die Amplitude der aus den Berechnungen entstehenden Artefakte verringern [Asadollahi18] [Asadollahi19]. Eine weitere Anwendung der Reverse Time Migration in der zerstörungsfreien Prüfung zeigen Beniwal und Ganguli. Sie nutzen die Reverse Time Migration zur Detektion von Fehlstellen an Bewehrungseisen [Beniwal15].

Die folgenden Beschreibungen zur Reverse Time Migration basieren auf der eigenen vorangegangenen Diplomarbeit [Müller10].

3.1 Mathematische Herleitung der Reverse Time Migration

Die folgende mathematische Herleitung ist aus [Buur08] entnommen. Dabei wird, wie auch in der Diplomarbeit von Maria Baumann-Wilke, von einem Ansatz von Mora [Mora89] ausgegangen. Für das linearisierte gestreute Feld u gilt:

$$u(s_i, r_i, t) = \int_V \left[\int_{-\infty}^t G'(r_j, P_k, t - t_0) G'(P_k, s_i, t_0) dt_0 \right] \times \alpha(P_k) dP_k \quad (3.1)$$

mit

$$\alpha \simeq 2 \frac{\Delta c}{c}$$

Dabei stehen i, j, k für die drei räumlichen Koordinatenrichtungen im Volumen V (üblicherweise 1, 2, 3), s für die Quellen, r für die Empfänger, t für die Zeit und G' für die Ableitung der Green'schen Funktion. Ein beliebiger Punkt im Volumen V ist mit P bezeichnet. $c(P_k)$ ist das Geschwindigkeitsmodell, Δc eine Veränderung dessen.

Da das Wellenfeld u nur an der Oberfläche S ($r_3 = s_3 = 0$) beobachtet werden kann, gilt:

$$D(s_A, r_B, t) := u(s_A, 0, r_B, 0, t) \quad (3.2)$$

Dabei laufen die Variablen A und B über die beiden Koordinatenrichtungen der Oberfläche S . Bei endlicher Anzahl von Sendern und Empfängern geht das Integral in das Gleichungssystem

$$L\alpha = D \quad (3.3)$$

über, das für die Modellparameter α mit gegebenen Daten D gelöst werden muss. Dies kann nach Diskretisierung mittels Singulärwertzerlegung erfolgen. Da α ein großer Vektor ist, kann dies jedoch bis auf den eindimensionalen Fall mit heutiger Computertechnik nicht bewerkstelligt werden. Die Tiefenmigration nimmt an, dass

$$\alpha \approx L^* D \quad (3.4)$$

ist. L^* ist der adjungierte (transponierte) Operator des linearen Operators L . Die Reverse Time Migration ist die einzige Tiefenmigration, die den vollständigen adjungierten Operator implementiert.

$$\begin{aligned} L^* : D(s_A, r_B, t) &\mapsto \alpha(P_k) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_S \int_S \left[\int_{-\infty}^t G'(r_B, P_k, t - t_0) \times G'(P_k, s_A, t_0) dt_0 \right] \\ &\quad \times D(s_A, r_B, t) ds_A dr_B dt \end{aligned} \quad (3.5)$$

Nun wird das Reziprozitätsprinzip der skalaren Wellengleichung genutzt und r und P in Gleichung (3.5) getauscht. Damit erhält man ein zweites Wellenfeld w :

$$w(P_k, s_A, t_0) := \int_{t_0}^{+\infty} \int_S G(P_k, r_B, t - t_0) D(s_A, r_B, t) dr_B dt \quad (3.6)$$

Bei der Berechnung dieses Wellenfeldes wird bei $t = +\infty$ gestartet und rückwärts in der Zeit gerechnet. Die Daten der Empfänger werden als Quellen benutzt. Die Migrations-

methode basierend auf dem adjungierten Operator L^*

$$L^*[D](P_k) = - \int_S \left[\int_0^{+\infty} \partial_{t_0} w(P_k, t_0, s_A) G'(P_k, s_A, t_0) dt_0 \right] ds_A \quad (3.7)$$

besagt also, dass das vorwärtsgerechnete Wellenfeld mit dem rückwärtsgerechneten Wellenfeld kreuzkorreliert werden muss und im Anschluss die Wellenfelder aller Schusspositionen aufsummiert werden müssen. Im migrierten Ergebnis zeigt sich dann genau an den Punkten P im Volumen V ein hoher Betrag und damit ein Reflektor, an denen beide Wellenfelder zur gleichen Zeit übereinstimmen.

3.2 Funktionsweise der Reverse Time Migration

Zur Verdeutlichung der Funktionsweise der Reverse Time Migration wird im Folgenden ein Beispiel mit Simulationsdaten verwendet. Exemplarisch wird hier ein wahres Geschwindigkeitsmodell wie in Abbildung 3.1a angenommen. Mit diesem Modell werden synthetische Daten erzeugt (Abbildung 3.1b). Diese ersetzen in der folgenden Erklärung spätere Messdaten. Als Quellfunktion wird ein Ricker-Wavelet genutzt, welches sich auch zur Auswertung der später erzeugten Messdaten eignet. Die verwendete Reverse Time Migration aus der Diplomarbeit von Maria Baumann-Wilke besteht aus folgenden Schritten [Baumann-Wilke09]:

1. Wahl eines Geschwindigkeitsmodells über z. B. reflexionsseismische Verfahren (Abbildung 3.2a)
2. Vorwärtsberechnung des Wellenfeldes vom Schusspunkt durch das gewählte Geschwindigkeitsmodell unter Verwendung der Finite-Differenzen-Lösung der akustischen Wellengleichung (Abbildung 3.2b)
3. Zeitumgekehrte Ausbreitung des an den Empfängern aufgezeichneten Wellenfeldes (Messdaten) durch das Geschwindigkeitsmodell (Abbildung 3.2c)
4. Anwendung einer Abbildungsbedingung. Es erfolgt hier eine Kreuzkorrelation an jeder Untergrundposition ohne Zeitverschiebung, welche das Schusswellenfeld aus Nr. 2 und das Empfängerwellenfeld aus Nr. 3 miteinander verknüpft
5. Aufsummieren der Korrelationsergebnisse aller Schüsse aus Nr. 4 (Abbildung 3.2d)

Die oben genannte Kreuzkorrelation erfolgt ohne Zeitverschiebung. Damit ist sie als Produkt des vorwärts gerechneten Schusswellenfeldes u und des zurückpropagierten Empfängerwellenfeldes w darstellbar. Es gilt:

$$I(x, y) = \sum_t u(x, y, t) w(x, y, t) \quad (3.8)$$

3 Reverse Time Migration

Diese Abbildungsbedingung stellt die Reflektoren an den richtigen Positionen dar, ist aber nicht amplitudenbewahrend. Die wahre Amplitude ist für die gegebenen Probleme der zerstörungsfreien Prüfung zunächst nicht zwingend notwendig. Die Literatur listet noch weitere mögliche Abbildungsbedingungen auf, welche jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht getestet wurden [Chattopadhyay08].

3 Reverse Time Migration

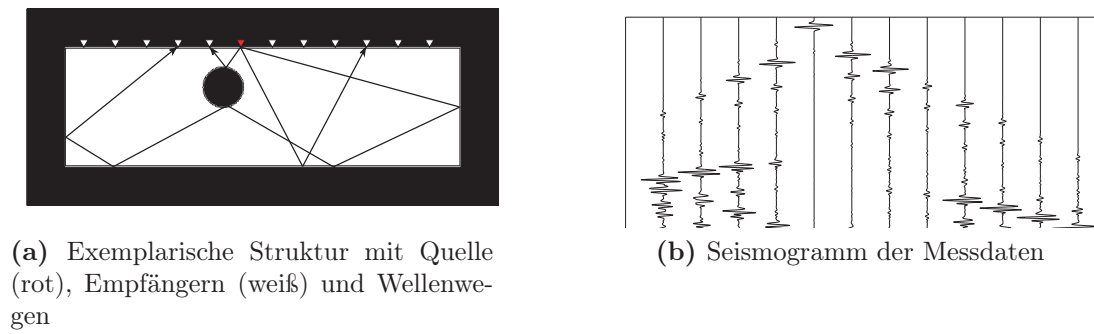


Abbildung 3.1: Datenaufnahme für die Reverse Time Migration

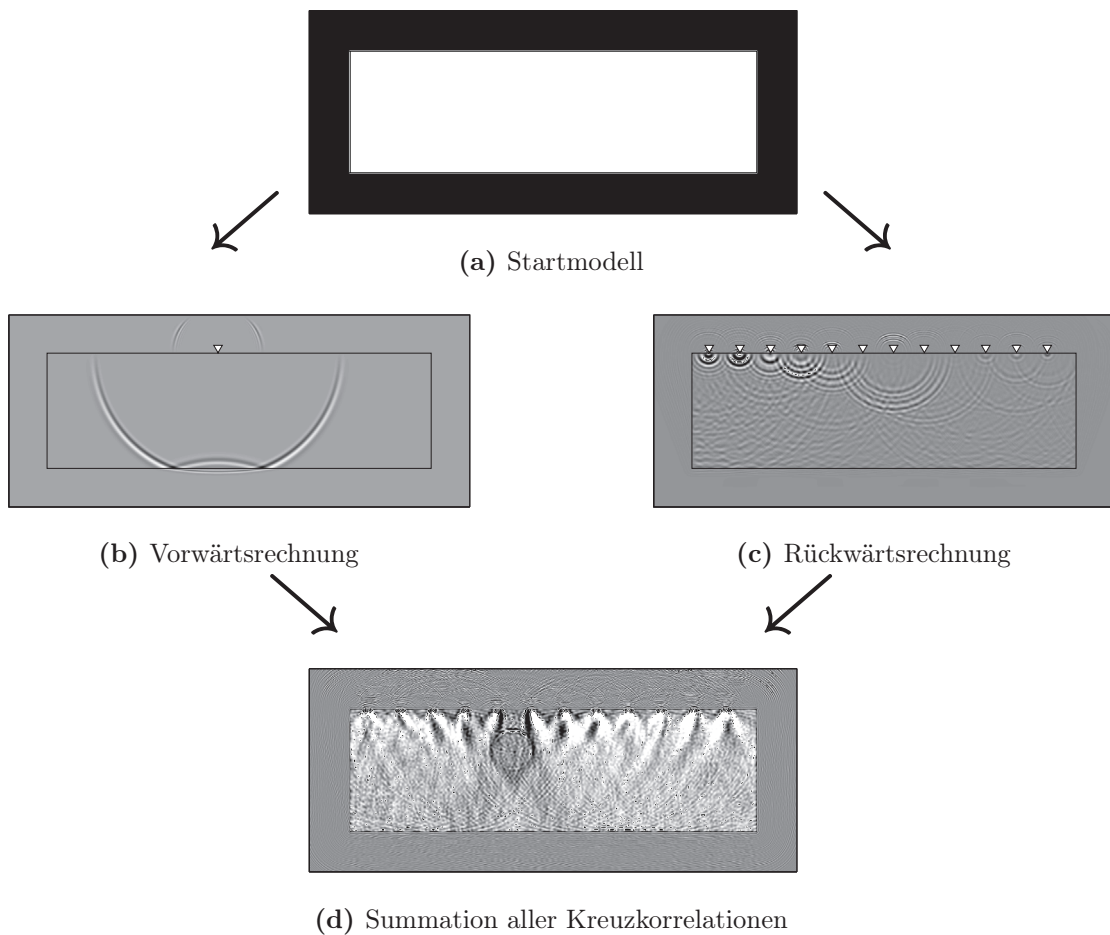


Abbildung 3.2: Funktionsweise der Reverse Time Migration

3.3 Anmerkung zum Programmcode

Für alle in der Arbeit erstellten Simulationen und für die Auswertung der gemessenen Daten wurde der 2D akustische Code von André Kurzmann verwendet. Dieser entstand im Rahmen seiner Dissertation zur Wellenformtomografie [Kurzmann12]. Er eignet sich trotz seiner Beschränkung auf den akustischen Fall auch zur Auswertung der Messdaten, welche mit Scherwellenprüfköpfen aufgenommen wurden. Es wird der Effekt ausgenutzt, dass bei SH-Wellen keine Wellenumwandlungen stattfinden. Sie verhalten sich also bis auf die langsamere Geschwindigkeit wie Longitudinalwellen. Des Weiteren stimmt die Richtcharakteristik der verwendeten Scherwellenprüfköpfe mit der simulierten akustischen Welle gut überein (siehe auch Kapitel 6.1.1). Dank der Parallelisierbarkeit konnten die Rechnungen auf einem Großrechner durchgeführt werden. Da die berechneten Wellenfelder im Arbeitsspeicher vorgehalten werden, ist der Speicherbedarf sehr hoch.

3.3.1 Finite-Differenzen-Approximation der Wellengleichung

Die folgenden Ausführungen zur Finite-Differenzen-Approximation sind der Diplomarbeit von Maria Baumann-Wilke entnommen [Baumann-Wilke09].

Ein verbreitetes Verfahren in der Seismik ist die Simulation der Wellenausbreitung mit der Methode der finiten Differenzen. Die Methode ist einfach zu implementieren und auf komplexe Modelle anwendbar. Lediglich gekrümmte Strukturen sind schwer umsetzbar, da sie auf Grund der Berechnung auf einem rechteckigen Gitter mit Stufenfunktionen angenähert werden müssen. Ein großer Vorteil ist die Parallelisierbarkeit, die eine Rechenzeitverkürzung ermöglicht. Um die Finite-Differenzen-Methode anwenden zu können, muss das Modellgebiet auf ein Gitter mit einer endlichen Anzahl Gitterpunkten überführt werden. Dabei wird die akustische Wellengleichung (2.11) zeitlich und räumlich diskretisiert. Der Druck p wird auf diskreten Gitterpunkten zu diskreten Zeiten definiert. Für ein zweidimensionales Gitter gilt:

$$x_i = i \, dh \quad y_j = j \, dh \quad t^n = n \, dt \quad i, j, n \in N$$

Da ein äquidistantes Gitter genutzt wird, ist dh , der Abstand zweier benachbarter Gitterpunkte, in beiden Raumrichtungen gleich. Die Differenz zweier aufeinanderfolgender Zeitschritte wird als dt bezeichnet. Außerdem gilt:

$$i = 1, \dots, nx \quad j = 1, \dots, ny \quad n = 1, \dots, nt$$

Dabei bezeichnen nx und ny die Anzahl der Gitterpunkte in x - bzw. y -Richtung und nt die Anzahl der Zeitschritte. Es ergibt sich nun die Approximation der partiellen Ableitungen der Wellengleichung durch Differenzenquotienten mittels Taylorreihenentwicklung bis

zum Term zweiter Ordnung:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2}{\partial x^2} p(x, y, t) &\longrightarrow \frac{p_{i+1,j}^n - 2p_{i,j}^n + p_{i-1,j}^n}{dh^2} \\
\frac{\partial^2}{\partial y^2} p(x, y, t) &\longrightarrow \frac{p_{i,j+1}^n - 2p_{i,j}^n + p_{i,j-1}^n}{dh^2} \\
\frac{\partial^2}{\partial t^2} p(x, y, t) &\longrightarrow \frac{p_{i,j}^{n+1} - 2p_{i,j}^n + p_{i,j}^{n-1}}{dt^2}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Einsetzen in die akustische Wellengleichung ergibt:

$$\frac{p_{i+1,j}^n + p_{i-1,j}^n + p_{i,j+1}^n + p_{i,j-1}^n - 4p_{i,j}^n}{dh^2} = \frac{1}{v_P^2(x, y)} \left(\frac{p_{i,j}^{n+1} - 2p_{i,j}^n + p_{i,j}^{n-1}}{dt^2} \right) \tag{3.10}$$

In jedem Zeitschritt wird eine Aktualisierung des Drucks $p_{i,j}^{n+1}$ aus den vorhergehenden Zeitschritten berechnet. Die Umstellung der Gleichung (3.10) führt zum Finite-Differenzen-Schema

$$p_{i,j}^{n+1} = 2p_{i,j}^n - p_{i,j}^{n-1} + \alpha_{i,j}^2 (p_{i+1,j}^n + p_{i-1,j}^n + p_{i,j+1}^n + p_{i,j-1}^n - 4p_{i,j}^n) \tag{3.11}$$

mit

$$\alpha^2 = \frac{v_P^2(x, y) dt^2}{dh^2}$$

Treten Quellen auf, muss dieses Finite-Differenzen-Schema nur um den Quellterm s^n erweitert werden.

3.3.2 Perfectly matched layers

Die Modellierung des Wellenfeldes ist auf ein begrenztes Gebiet beschränkt. Aus diesem Grund müssen an der Außengrenze des Gebietes sinnvolle Randbedingungen gewählt werden. In der vorliegenden Diplomarbeit von Maria Baumann-Wilke wurden absorbierende Ränder verwendet. Inzwischen entwickelte André Kurzmann vom KIT Karlsruhe den Code für die Wellenforminversion, aus dem das Programm für die Reverse Time Migration hervorging, weiter. Eine Neuerung ist die Einführung einer neuen Randbedingung. In den nachfolgenden Modellen werden an den Außengrenzen des Gebietes so genannte „perfectly matched layers“ (PML) verwendet. Dabei werden Gebiete definiert, welche das Wellenfeld absorbieren und im Idealfall keine Reflexionen in das Berechnungsgebiet zurück verursachen. Ursprünglich wurde die Methode der PML von Bérenger 1994 für die Maxwell-Gleichungen entwickelt [Bérenger94] und wurde später auch für andere Wellengleichungen genutzt.

Die folgenden Ausführungen sind einem Vorlesungsskript am MIT (Massachusetts Institute of Technology) entnommen [Johnson10]. Bei Anwendung der PML werden alle in

3 Reverse Time Migration

der Wellengleichung vorkommenden partiellen Ableitungen nach x durch den Ausdruck

$$\frac{\partial}{\partial x} \longrightarrow \frac{1}{1 + i \frac{\sigma_x(x)}{\omega}} \frac{\partial}{\partial x} \quad (3.12)$$

ersetzt. Dabei ist ω die Kreisfrequenz und σ ein Absorptionskoeffizient. Für $\sigma_x > 0$ kommt es zur exponentiellen Dämpfung der oszillierenden Lösung. Für $\sigma_x = 0$ bleibt die Wellengleichung und damit auch deren Lösung unverändert. $\sigma(x)$ kann beispielsweise eine Stufenfunktion sein. Innerhalb des Rechengebietes wäre $\sigma = 0$ und die Wellengleichung bliebe unverändert, zum Rand hin würde $\sigma > 0$ sein und damit die Welle gedämpft werden.

4 Vorüberlegungen für Simulationsrechnungen und Datenauswertung

Für die späteren Simulationsrechnungen (Kapitel 5) und Auswertung der Messdaten (Kapitel 6) müssen Geschwindigkeitsmodelle erstellt werden. Dafür wird im Folgenden auf die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit von Luft und Polyamid eingegangen. Des Weiteren wird die Planung eines Polyamidprobekörpers beschrieben, dessen Größe auch in den Simulationen verwendet wird.

4.1 Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten

4.1.1 Schallgeschwindigkeit von Luft

In den später genutzten Modellen wird Luft als Umgebungsmedium verwendet. Der zu untersuchende Probekörper wird also vollständig von Luft umschlossen. Wichtig ist dabei vor allem, dass ein großer Teil der Energie wieder reflektiert wird, wie es auch bei Messungen an echten Probekörpern stattfindet. Diese sind ebenfalls, bis auf Auflagerungspunkte, vollständig von Luft umgeben. Lediglich im Praxisbeispiel Leinebrücke (Kapitel 7.1) ist dies nicht der Fall. Dort wird dann an den Stellen, an denen sich das Brückenbauwerk außerhalb des Modells fortsetzt, mit absorbierenden Randbedingungen gearbeitet.

Die Schallgeschwindigkeit von Luft ist temperaturabhängig. Da es sich um ein nahezu ideales Gas handelt, ist die Druckabhängigkeit zu vernachlässigen. Für die Simulationsrechnungen wurde ein Wert von $v_p = 333 \text{ m/s}$ gewählt, da die Luft nur als Hilfsmedium verwendet wird, welches Randreflexionen hervorrufen soll. Die exakte Amplitude wird in den Migrationen jedoch nicht ausgewertet. Außerdem sollen keine Aussagen über Bereiche außerhalb des Probekörpers getroffen werden. Aus diesem Grund ist auch eine exakte Anpassung der Schallgeschwindigkeit von Luft nicht notwendig. Für die Auswertung der Longitudinalwellenmessdaten in Kapitel 6 und Anhang A.1 wurde die Schallgeschwindigkeit für Luft dennoch auf $v_p = 343 \text{ m/s}$ angepasst. Dies entspricht dem Wert für eine Temperatur von 20°C und liegt damit näher an der tatsächlichen Temperatur der Laborhalle, in der die Messungen stattfanden. Für Rechnungen und Messungen mit Scherwellenmessdaten soll eine Totalreflexion an der Grenze Probekörper/Luft stattfinden. Deshalb wird dort die Geschwindigkeit auf $v_p = 0 \text{ m/s}$ festgelegt. Die Variable

wird dabei ebenfalls v_p genannt, da ein akustischer Programmcode für die Reverse Time Migration genutzt wird, bei dem keine Scherwellengeschwindigkeiten v_s definiert sind. Auch hier handelt es sich nur um eine Hilfskonstruktion, da Scherwellendaten mit dem akustischen Code ausgewertet werden sollen. Der Grund, warum dies möglich ist, wird in Kapitel 6.1.1 erläutert.

4.1.2 Schallgeschwindigkeit von Polyamid

Die Longitudinalwellengeschwindigkeit von Polyamid wurde in der eigenen vorangegangenen Diplomarbeit experimentell bestimmt [Müller10]. Dazu wurden mehrere Transmissionsmessungen an einem Referenzkörper aus Polyamid durchgeführt. Aus diesen ergab sich eine Geschwindigkeit von $v_p = 2687 \text{ m/s}$. Für die Scherwellengeschwindigkeit wurde ein Wert aus einer an der BAM durchgeführten Dissertation übernommen. Dieser beträgt $v_s = 1121 \text{ m/s}$ [Maack12].

Für die Simulationsrechnungen in Kapitel 5 wurden diese Werte zunächst verwendet. Um bessere Ergebnisse zu erhalten musste jedoch die Scherwellengeschwindigkeit für die Auswertung der Messdaten mittels direkter Bestimmung aus den Messdaten noch einmal auf $v_s = 1150 \text{ m/s}$ angepasst werden. Dabei zeigte sich, dass die Reverse Time Migration empfindlich auf geringste Änderungen des Startmodells reagiert. Es muss also die Geschwindigkeit des Mediums möglichst genau bekannt oder ermittelbar sein, um genaue Aussagen über das Bauteil treffen zu können. Insbesondere die Genauigkeit der Bestimmung von Längen oder Durchmessern hängt eng mit der Geschwindigkeit des Mediums im Startmodell zusammen.

4.2 Planung der Probekörpergröße

Für spätere Messungen wurde schon für die vorangegangene eigene Diplomarbeit ein größerer Polyamidprobekörper, als für die Geschwindigkeitsbestimmung genutzt wurde, gegossen [Müller10]. Die Referenzmessungen dienten dabei als Grundlage für die gewünschten Abmessungen. Da nur eine zweidimensionale Reverse Time Migration zur Verfügung steht, war es dabei wichtig, möglichst wenige Reflexionen aus der dritten Dimension zu erhalten, die das Migrationsergebnis stören könnten. Aus diesem Grund musste die Größe des Probekörpers in dieser Dimension hinreichend groß gewählt werden. Für die Messungen, welche in dieser Arbeit vorgestellt werden, ist der große Abstand zur Seitenkante nicht mehr notwendig. Es werden nun Prüfköpfe genutzt, welche sehr gut fokussieren, und ein Schallfeld direkt unter dem zweidimensionalen Profil ausbilden (siehe Kapitel 6.1.1). Die Abmessungen in Breite und Höhe wurden nach den geplanten Messaufgaben bestimmt. Dabei wurde auf ausreichend Platz für eine zukünftige Bohrung geachtet. Außerdem sollte die Überlagerung von Oberflächenwellen mit der Rückwandreflexion vermieden werden. Die endgültigen Maße des Probekörpers betragen $1 \text{ m} \times 0,3 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$ ($B \times H \times T$) (siehe auch Kapitel 6.3).

5 Simulationen mit dem homogenen Material Polyamid

Im Vorfeld von Simulationen für Messungen an Polyamid und Beton wurden Parameter-tests an einem Polyamidmodell durchgeführt. Dabei wurde jeweils die Aufzeichnungszeit, der Empfängerabstand und der Abstand der Sender variiert. Außerdem wurden zur Planung einer Messung an Polyamid verschiedene Bohrungsgrößen simuliert. Für die Untersuchung von Aufzeichnungszeit, Empfängerabstand und Senderabstand wurden je zwei Modelle verwendet. Das Erste enthält eine Bohrung mit dem Radius 0,05 m, das Zweite eine Stufe von 0,06 m Höhe. Diese Defekte simulieren typische Prüfprobleme in der zerstörungsfreien Prüfung an Beton (siehe Kapitel 2). Die Modelle sind in Abbildung 5.1 und 5.2 zu sehen, markiert mit Dreiecken sind dabei die Sende- und Empfangspositionen. Die Kenngrößen für die Rechnungen sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Für sämtliche Migrationen wurde ein homogenes Startmodell (Abbildung 5.3) verwendet.

Abbildung 5.4 zeigt die simulierten Daten an einer Sendeposition an Polyamid mit Bohrung. Blau markiert ist die Reflexion der Bohrung, grün die Reflexion der Rückseite des Modells bzw. Probekörpers und gelb die Reflexionen der Seiten. Da bei der Simulation das Signal auch direkt an der Sendeposition simuliert werden kann, lässt sich im oberen Bereich das Sendesignal erkennen. Im späteren Verlauf der Arbeit können diese simulierten Daten mit Messdaten an Polyamid verglichen werden (Kapitel 6.3).

Abbildung 5.5 und 5.6 zeigen beispielhaft das Migrationsergebnis für jeweils das gesamte Modellgebiet für die Aufzeichnungszeit 0,0006 s und je 12 Sendern und Empfängern im Abstand von 0,08 m. Es wurde keine nachträgliche Bearbeitung der Ergebnisse

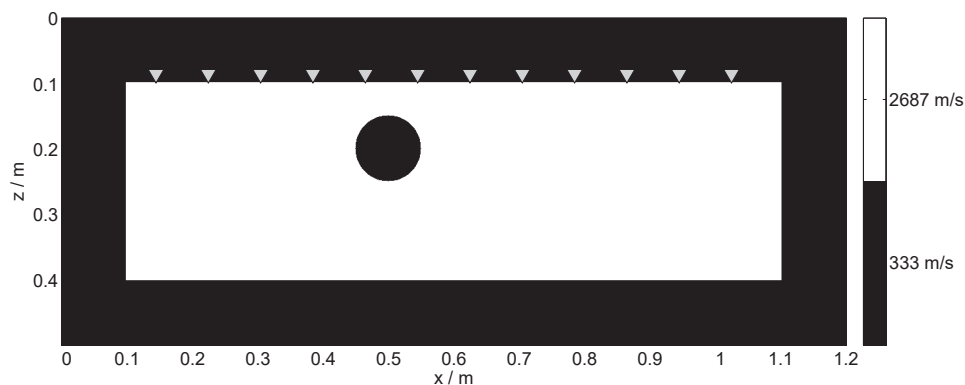


Abbildung 5.1: Modell „Polyamidblock mit Bohrung“ für die Simulation

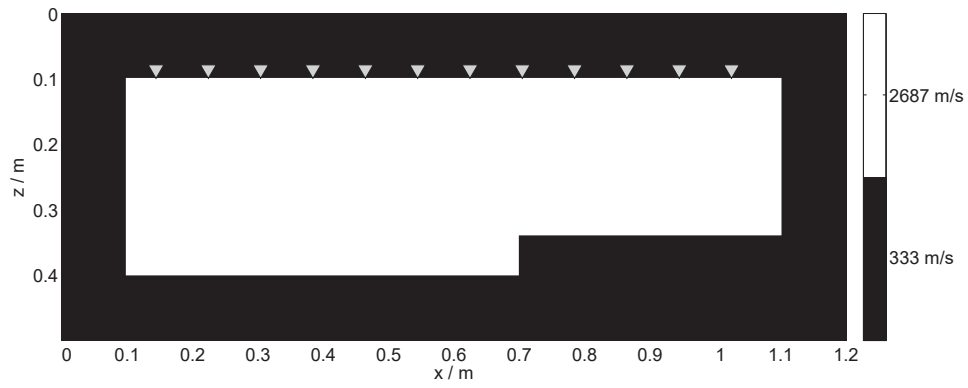


Abbildung 5.2: Modell „Polyamidblock mit Stufe“ für die Simulation

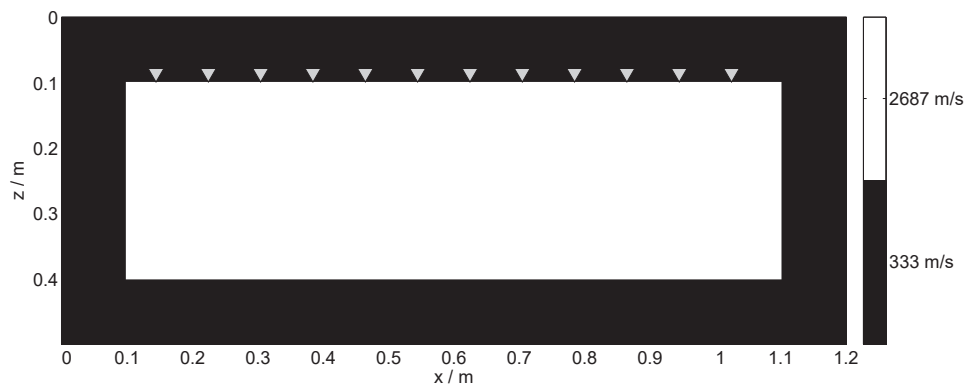


Abbildung 5.3: Homogenes Startmodell zur Migration der aus den Modellen in Abbildung 5.1 und 5.2 generierten Daten

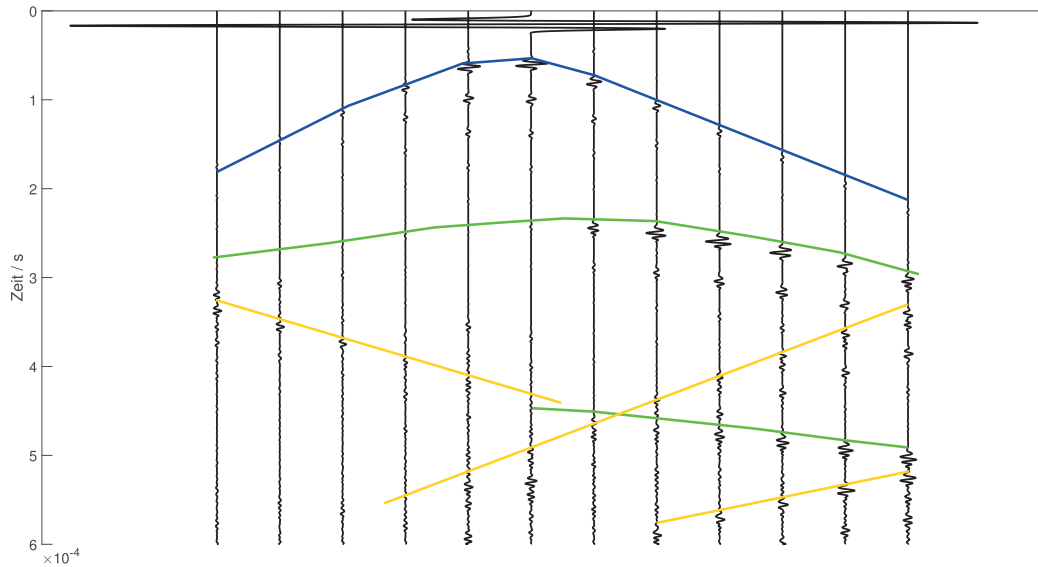


Abbildung 5.4: Datenbeispiel für Simulationsdaten an Polyamid mit Bohrung. Blau - Reflexion der Bohrung, grün - Reflexionen der Unterseite des Probekörpers, gelb - Reflexionen der Seiten des Probekörpers.

vorgenommen. Aus diesem Grund sind die Sendepositionen an der Oberfläche deutlich sichtbar. Des Weiteren lassen sich in dem Migrationsergebnis der Stufe Artefakte erkennen. Es handelt sich um horizontale Linien oberhalb der Stufe, welche durch die Kreuzkorrelation der Vielfachreflexionen der Rückwand entstehen. Im Folgenden wird nur noch ein Ausschnitt der Bohrung und der Stufe betrachtet.

5.1 Variation der Aufzeichnungszeit

Zunächst wurde untersucht, bei welcher Aufzeichnungszeit die Defekte gut abgebildet werden. Ziel ist es eine möglichst kurze Aufzeichnungszeit zu bestimmen, um die Rechenzeit und den Speicherbedarf der Reverse Time Migration möglichst gering zu halten. Außerdem werden durch eine kürzere Aufzeichnungszeit Artefakte durch Vielfachreflexionen verringert. Die Aufzeichnungszeit wurde zwischen 1,20 ms und 0,24 ms variiert. Dabei wurde die Zeit schrittweise jeweils um 10 % verkürzt. Die Positionen der Sender und Empfänger sind Tabelle 5.2 zu entnehmen.

Abbildung 5.7 zeigt die Migration von Daten mit unterschiedlich langer Aufzeichnungszeit an der Bohrung. Je kürzer die Aufzeichnungszeit ist, desto schlechter abgegrenzt wird die Bohrung abgebildet. Dabei sind die Unterkante und die Seiten die ersten schlechter zu erkennenden Begrenzungen. Passt man jedoch die Farbskala auf die geringere Aufzeichnungszeit an, ist die Bohrung auch bei kürzerer Zeit in vollem Umfang abgebildet. Bei 0,36 ms ist die Aufzeichnungszeit so kurz, dass die Unterkante gar nicht mehr zu erkennen ist, da die reflektierten Wellen der Probekörperrückwand über die Unterkante

5 Simulationen mit dem homogenen Material Polyamid

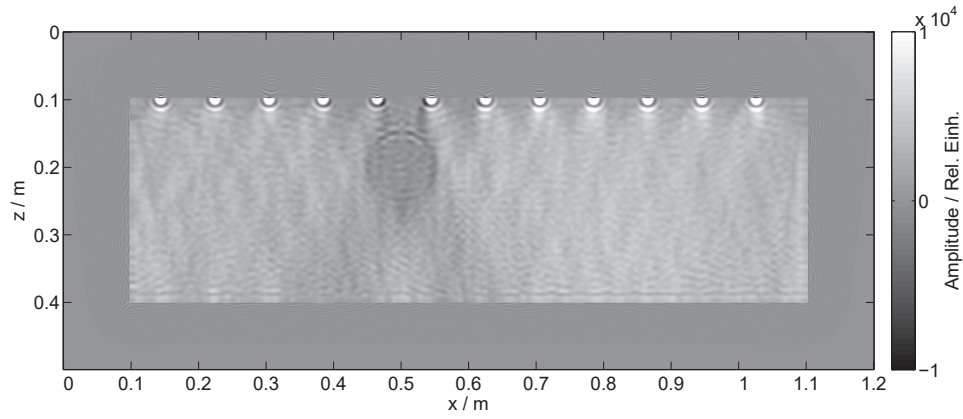


Abbildung 5.5: Migrationsergebnis für das Modell mit Bohrung bei einer Aufzeichnungszeit von 0,0006 s und je 12 Sendern und Empfängern im Abstand von 0,08 m

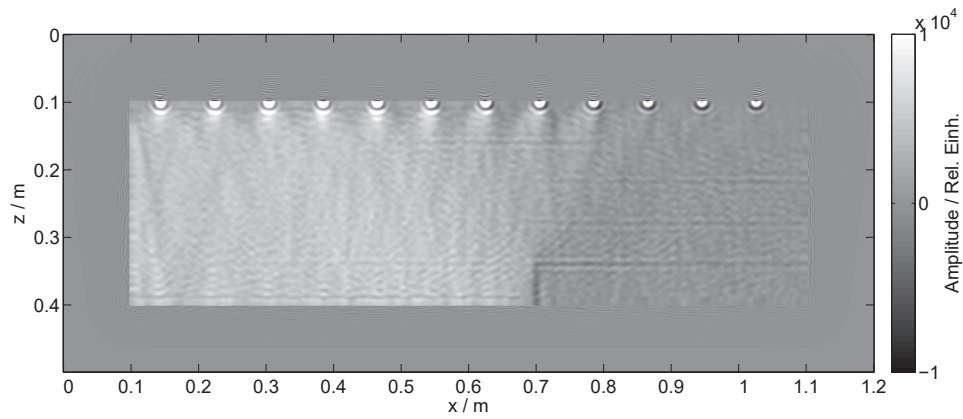


Abbildung 5.6: Migrationsergebnis für das Modell mit Stufe bei einer Aufzeichnungszeit von 0,0006 s und je 12 Sendern und Empfängern im Abstand von 0,08 m

Kenngröße	Modell Bohrung	Modell Stufe
Polyamid v_p	2687 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	
Polyamid ρ	1140 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	
Luft v_p	333 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	
Luft ρ	1,204 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	
Modellgröße	1200 $\times$ 500 Gitterpunkte	
Gitterpunktabstand	0,001 m	
Polyamidblock	1 $\times$ 0,3 m ²	1 $\times$ 0,3 m ² mit Stufe
Bohrung x	0,5 m	-
Bohrung y	0,2 m	-
Bohrung Radius	0,05 m	-
Höhe Stufe	-	0,06 m
Frequenz	100 kHz	
Samplerate	1 $\cdot$ 10 ⁻⁷ s	

Tabelle 5.1: Kenngrößen der Simulationsrechnungen der Parameterstudien

Kenngröße	Modell Bohrung	Modell Stufe
Anzahl Sender	12	
Anzahl Empfänger	12	
1. Sendeposition	$x = 0,145 \text{ m}$	$y = 0,101 \text{ m}$
Abstand der Sender	0,08 m	
Abstand der Empfänger	0,08 m	

Tabelle 5.2: Position der Sender und Empfänger für die Untersuchung der Variation der Aufzeichnungszeit

der Bohrung nicht mehr die Empfänger erreichen. Bei 0,24 ms ist die gesamte Bohrung nicht mehr zu erkennen.

Abbildung 5.8 zeigt die äquivalente Rechnung am Modell der Stufe. Hier ist die schlechtere Abbildung der Kanten bei kürzerer Aufzeichnungszeit nicht so signifikant wie bei der Bohrung, die Farbskala musste nicht angepasst werden. Dafür treten bei zu langer Aufzeichnungszeit (1,2 ms - 0,72 ms) starke horizontale Mehrfachabbildungen links von der Stufe und darüber auf. Diese resultieren aus zu vielen aufgezeichneten Mehrfachreflexionen der Stufe, die sich bei der Kreuzkorrelation wieder überlagern. Erst bei der kürzesten Aufzeichnungszeit von 0,24 ms wird die senkrechte Kante der Stufe nicht mehr abgebildet, die Oberkante ist aber weiterhin sichtbar. Bei stufenförmigen Grenzflächen muss für die Reverse Time Migration also eine Aufzeichnungszeit gewählt werden, die einen Kompromiss zwischen tolerierbaren Artefakten und einer artefaktfreien Abbildung darstellt.

Für die weiteren Parametertests wurde die Aufzeichnungszeit auf 0,6 ms festgelegt. Mit dieser war die Bohrung im gesamten Umfang zu erkennen und gleichzeitig die Mehrfachabbildungen der Stufe gering.

5.2 Variation des Empfängerabstandes

Im nächsten Schritt wurde der Einfluss des Empfängerabstandes auf das Migrationsergebnis untersucht. Hier steht insbesondere eine Verringerung des Messaufwandes im Vordergrund. Die Aufzeichnungszeit wurde bei 0,6 ms konstant gehalten und wie bisher 12 Sendepositionen im Abstand von 0,08 m verwendet. Der Empfängerabstand wurde von 0,01 m (92 Empfängern) bis 0,25 m (4 Empfängern) in 0,01 m-Schritten variiert. Abbildung 5.9 zeigt die Bohrung bei variierendem Empfängerabstand, Abbildung 5.10 die Stufe. Hier zeigt sich, je größer der Abstand, desto schlechter die Abbildung der Bohrung wie auch der Stufe. Man beachte auch hier die jeweils angepasste Farbskala zur besseren Darstellbarkeit von Bohrung und Stufe. Oberhalb der Stufe sind bei zu engem Abstand außerdem die Mehrfachreflexionen störend. Um Bohrung und Stufe gut abzubilden ist ein Abstand von 0,04 m bis 0,08 m ausreichend. In der Praxis steigt der Messaufwand mit zunehmender Empfängeranzahl stark an. Deshalb wird für die Rechnungen zunächst

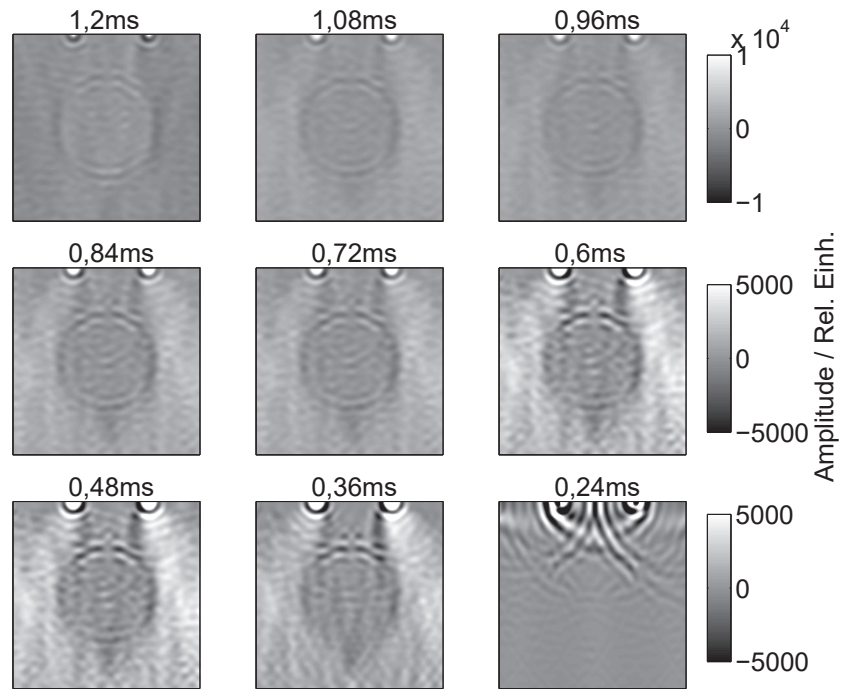


Abbildung 5.7: Abbildung der Bohrung bei unterschiedlich langer Aufzeichnungszeit

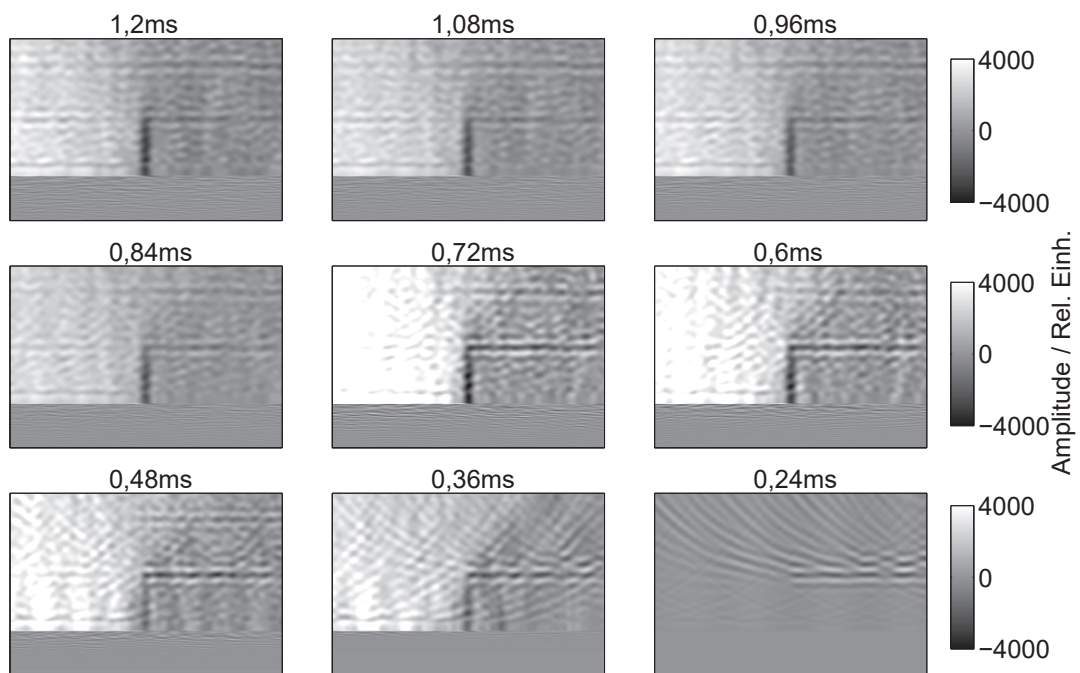


Abbildung 5.8: Abbildung der Stufe bei unterschiedlich langer Aufzeichnungszeit

ein Abstand von 0,08 m genutzt.

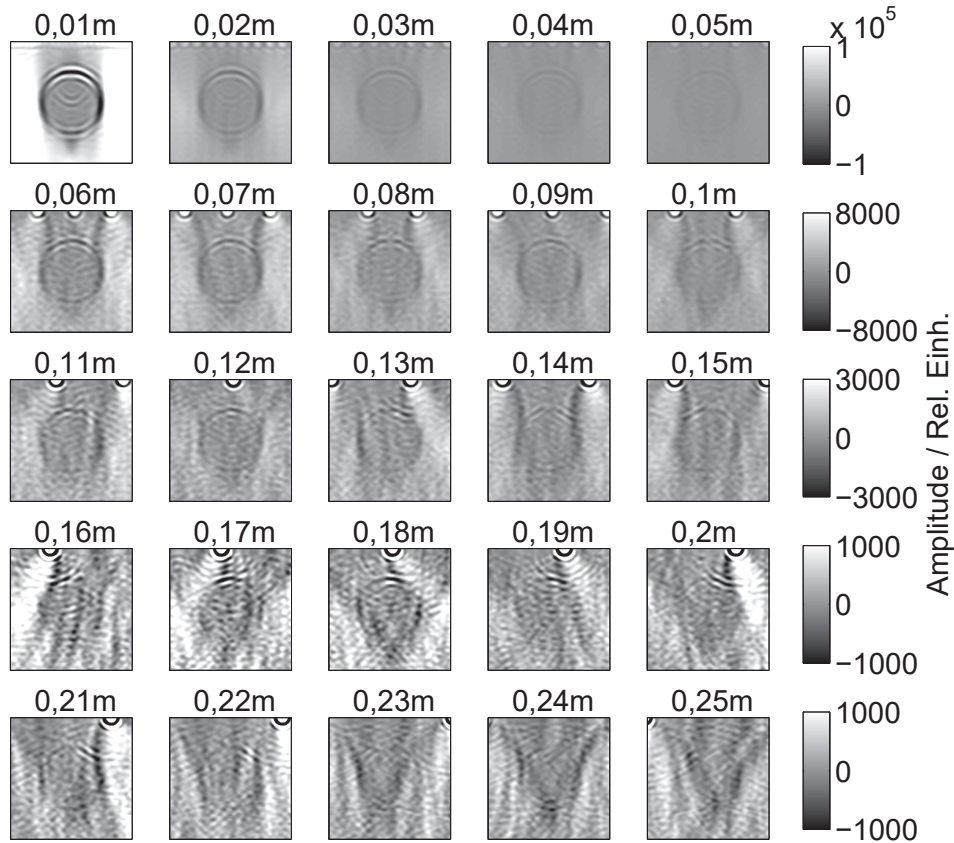


Abbildung 5.9: Abbildung der Bohrung bei verschiedenen Empfängerabständen

5.3 Variation des Senderabstandes

Weiterhin wurde der Senderabstand variiert, während der Empfängerabstand bei 0,08 m entsprechend 12 Empfangspositionen festgehalten wurde. Die Anzahl der Sendepositionen hat einen großen Einfluss auf den benötigten Speicherplatz. An je mehr Positionen gesendet wird, desto mehr Wellenfelder müssen berechnet und kreuzkorreliert werden. Gleichzeitig verlängert sich die Messzeit in der Praxis. Der Senderabstand wurde von 0,08 m entsprechend 12 Sendepositionen bis zu nur einer Sendeposition variiert. Dabei wurde der Abstand zwischen zwei Sendepositionen immer um 0,08 m vergrößert. Abbildung 5.11 zeigt die Bohrung bei den verschiedenen Senderabständen und jeweils angepasster Farbskala. Mit größer werdendem Abstand wird die Bohrung immer schlechter abgebildet. Unter realen Messbedingungen ist anzunehmen, dass schon bei einem Abstand von 0,24 m die Bohrung nicht mehr klar darstellbar ist.

Abbildung 5.12 zeigt die entsprechende Rechnung am Modell der Stufe, ebenfalls mit

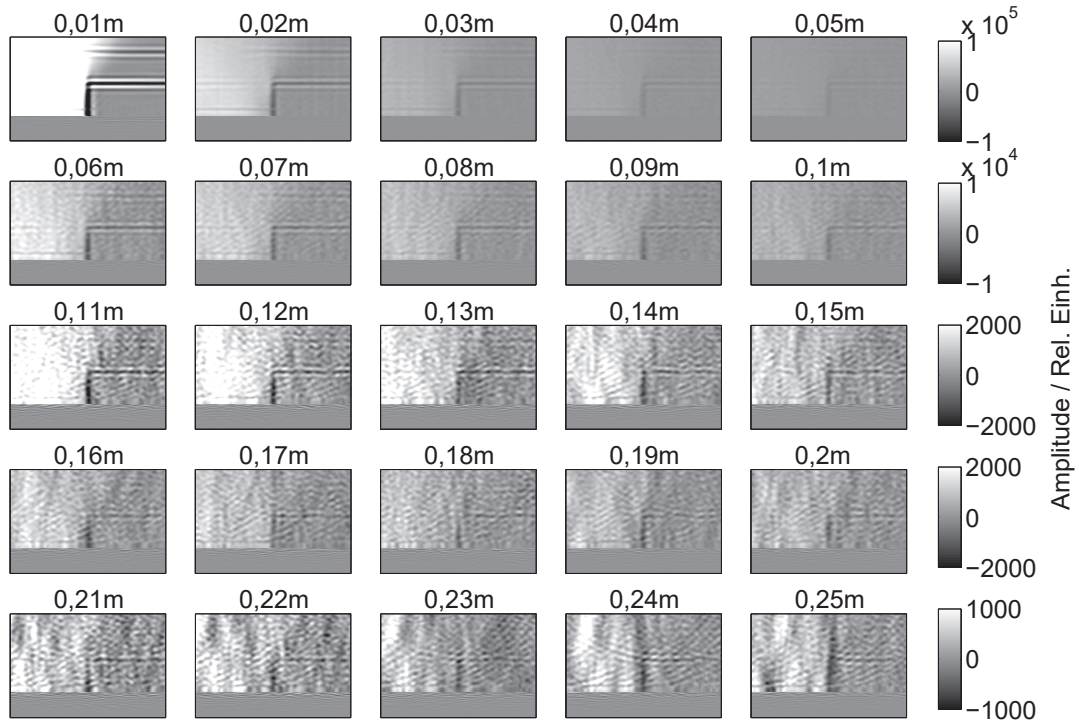


Abbildung 5.10: Abbildung der Stufe bei verschiedenen Empfängerabständen

angepasster Farbskala. Wie schon bei den vorangegangenen Migrationen ist hier der Einfluss des Senderabstandes nicht so signifikant wie bei der Bohrung. Die Stufe ist auch bei größerem Senderabstand auf Grund ihrer größeren Reflexionsfläche noch abbildbar. Bei Abständen größer 0,48 m wird die Abbildung jedoch so schwach, dass unter realen Messbedingungen die Detektierbarkeit deutlich schlechter sein wird.

5.4 Variation der Größe einer Bohrung

Als Vorbereitung für spätere Messungen an Polyamid wurden Simulationen durchgeführt, bei denen die Größe einer Bohrung variiert wurde (siehe Kapitel 6.3). Der Radius der Bohrung wurde von 0,05 m auf 0,005 m verringert. Die weiteren Parameter der Simulation sind in Tabelle 5.3 zu sehen. Abbildung 5.13 zeigt das Migrationsergebnis für die Bohrung unterschiedlicher Größe. Hier musste die Farbskala nicht an die unterschiedlichen Bohrungsgrößen angepasst werden. Bis zu einem Radius von 0,015 m ist die Bohrung in vollem Umfang abgebildet. Dies entspricht in etwa der halben Wellenlänge ($\lambda = 0,0269$ m). Bei kleineren Radien ist die Bohrung zwar noch als Reflexion erkennbar, jedoch ist die Unterkante nicht mehr erkennbar bzw. nicht von der Oberkante zu unterscheiden.

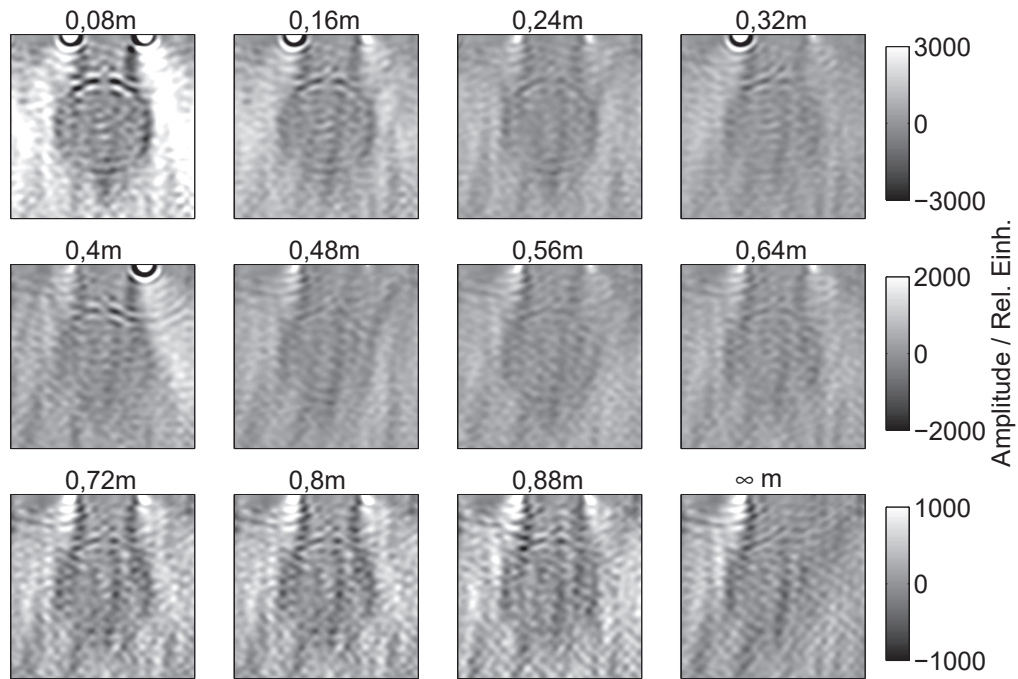


Abbildung 5.11: Abbildung der Bohrung bei variierendem Senderabstand

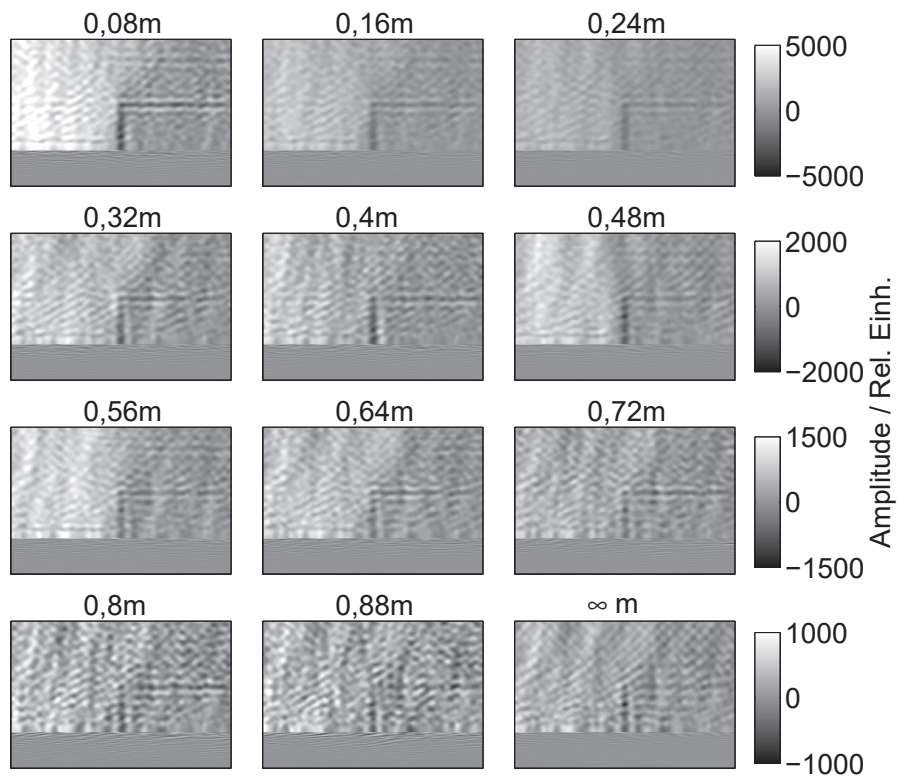


Abbildung 5.12: Abbildung der Stufe bei variierendem Senderabstand

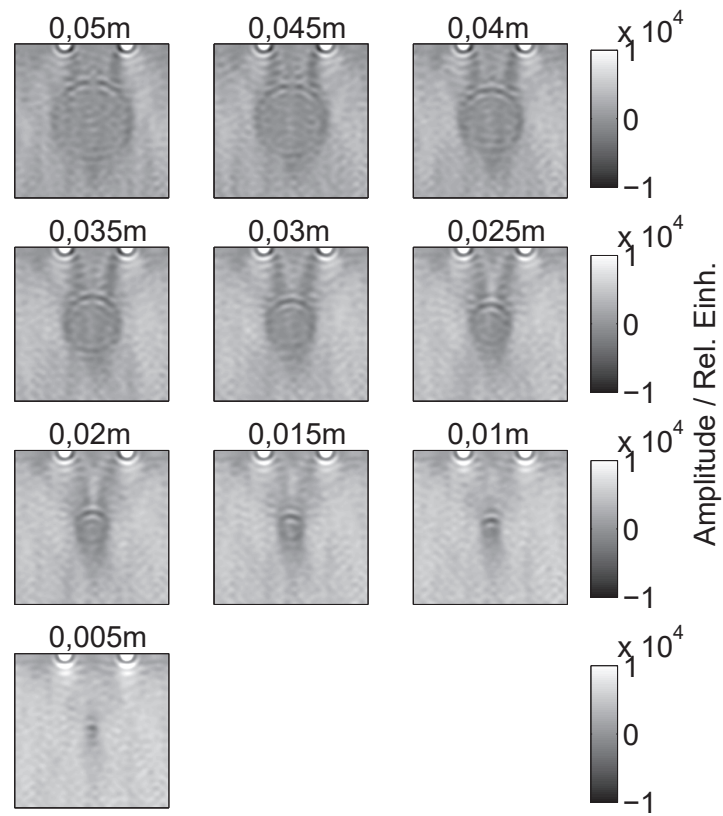


Abbildung 5.13: Abbildung der Bohrung mit variierenden Radien

Kenngröße	Modell Bohrung
Polyamid v_p	2687 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Polyamid ρ	1140 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Luft v_p	333 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Luft ρ	1,204 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Modellgröße	1200 $\times$ 500 Gitterpunkte
Gitterpunkt Abstand	0,001 m
Polyamidblock	1 $\times$ 0,3 m ²
Bohrung x	0,5 m
Bohrung y	0,2 m
Frequenz	100 kHz
Samplerate	1 $\cdot$ 10 ⁻⁷ s
Aufzeichnungszeit	0,6 ms
Anzahl Sender	12
Anzahl Empfänger	12
1. Sendeposition	x = 0,145 m y = 0,101 m
Abstand der Sender	0,08 m
Abstand der Empfänger	0,08 m

Tabelle 5.3: Kenngrößen der Simulationsrechnung für die Messplanung einer Bohrung in Polyamid

6 Messungen an Testobjekten

Im folgenden Kapitel wird die Anwendung der Reverse Time Migration an realen Ultraschall-Messdaten beschrieben. Zunächst wurden Messungen an einem Polyamidprobekörper mit einer Bohrung durchgeführt. Außerdem erfolgte eine Messung an einem Betonprobekörper mit Spannkanal im Labor. Um alle genannten Messungen zu ermöglichen, wurde ein Scannersystem entwickelt, welches zusammen mit der genutzten Messapparatur vorgestellt wird. Außerdem wird die Bearbeitung der Daten vor der Auswertung erläutert, die notwendig ist, um zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten.

6.1 Messtechnik

6.1.1 Prüfköpfe und Richtcharakteristik

Für die Messungen wurde ein den Bedürfnissen angepasstes Prüfkopfarray entwickelt. Kriterien sind dabei einerseits das Einbringen von genügend Energie in den Probekörper, andererseits die Erzeugung eines Schallfeldes, welches günstig für die Auswertung der Daten mit einem zweidimensionalen akustischen Programmcode ist. Ähnlich der Anordnung im kommerziellen A1040 MIRA-System der Firma Acoustic Control Systems Ltd. (siehe Kapitel 2.3.1), wurden in einer Halterung vier Punktkontaktprüfköpfe in einer Reihe angeordnet (Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2). Dabei werden Punktkontaktprüfköpfe genutzt, bei denen die Bewegung umschaltbar ist und die somit sowohl Longitudinalwellen als auch Scherwellen aussenden können. Es ergeben sich also drei verschiedene Messvarianten mit nur einem Prüfkopf: eine Longitudinalwellenmessung und zwei Polarisationen der Scherwellenmessung. Durch die Nutzung mehrerer Punktkontaktprüfköpfe lässt sich mehr Energie in den Probekörper einbringen und damit höhere Signalamplituden erreichen. Das beschriebene Prüfkopfarray wird als Sende- und Empfangsprüfkopf gleichermaßen eingesetzt.

Die Anordnung der Punktkontaktprüfköpfe in einer Reihe erzeugt ein Schallfeld, welches wie eine Scheibe unterhalb des Profils fokussiert ist. Zur Untersuchung dieser Schallfelder wurden mit dem Prüfkopf Messungen an einer Polyamidhalbkugel durchgeführt. Das Verfahren dazu ist in der Dissertation von Maack beschrieben [Maack12]. Abbildung 6.3 zeigt die Richtcharakteristik der Prüfköpfe für eine Longitudinalwellenmessung, Abbildung 6.4 die für eine Scherwellenmessung im Polardiagramm. Abgebildet ist jeweils die Verteilung der maximalen Amplitude je Richtungswinkel. Die blaue Kurve stellt die Verteilung in x-Richtung, also in Richtung des Messprofils, dar. Die rote Kurve zeigt die Verteilung der maximalen Amplitude senkrecht zur Messrichtung. Für die Longitu-

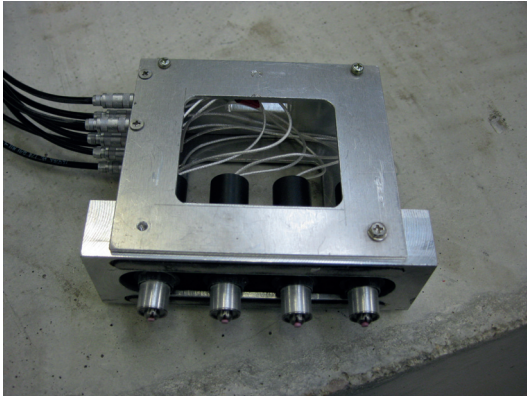


Abbildung 6.1: Ultraschallprüfkopf bestehend aus vier Punktkontaktprüfköpfen

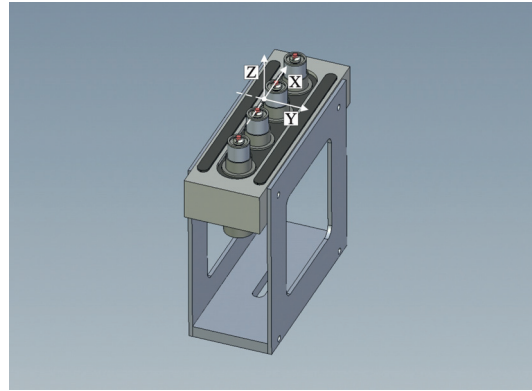


Abbildung 6.2: Technische Zeichnung des verwendeten Ultraschallprüfkopfes

dinalwellenmessung zeigt sich also, dass die maximale Amplitude nicht gleichmäßig auf einem Halbkreis verteilt ist. Die höchste Amplitude tritt direkt unterhalb des Prüfkopfes bei 90° auf. In einem Winkel von 30° bzw. 150° beträgt sie bereits nur noch 60% des Maximalwertes. Vergleicht man diese Messergebnisse mit der Ausbreitung der Welle im akustischen Simulationscode (Abbildung 3.2b) zeigt sich jedoch eine klare Übereinstimmung der Simulation mit der Messung von Scherwellen (hier im Speziellen SH-Wellen). Dort ist die Maximalamplitude nahezu gleichmäßig auf einem Halbkreis verteilt und fällt nicht auf unter 80% ab. Auf Grund von Oberflächenwellen, welche nur bei den Scherwellenprüfköpfen auftreten, kann die Richtcharakteristik unter einem Winkel von etwa 10° und über einem Winkel von etwa 170° nicht dargestellt werden. Durch die Anordnung der Prüfköpfe in einer Reihe erreicht man mit Longitudinal- wie auch Scherwellenprüfköpfen eine Fokussierung der Schallwellen in Profilrichtung. Somit lassen sich die Daten zweidimensional auswerten.

Als Konsequenz ergibt sich aus den Vormessungen an den Polyamidhalbkugeln, dass sich nicht wie erwartet die Longitudinalwellenmessungen am besten mit dem genutzten akustischen Programmcode auswerten lassen, sondern die Scherwellenmessung, bei der die Polarisation senkrecht zum Messprofil ist. Dies ist durch den Aufbau der Prüfköpfe begründet. Auch verhalten sich die Reflexionskoeffizienten von Longitudinalwellen und SH-Wellen gleich (siehe Kapitel 2.1).

6.1.2 Messelektronik

Für die im Folgenden beschriebenen Messungen wurde eine Apparatur verwendet, die bereits ähnlich bei anderen Forschungsaufgaben zum Einsatz kam. Der Messaufbau besteht aus einem Messrechner, einem DAQ-Pad, einem Rechtecksender, einem Gerät, mit dem die Prüfköpfe zwischen Longitudinal- und Scherwellenaussendung umgeschaltet werden können, und einem Empfangsverstärker. Mit einem auf dem Messrechner installierten LabVIEWTM-Programm (BAM-Eigenentwicklung) wird die Messung gest-

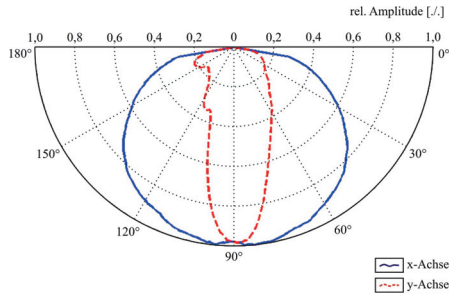


Abbildung 6.3: Richtcharakteristik der genutzten Prüfköpfe bei Aussendung von Longitudinalwellen

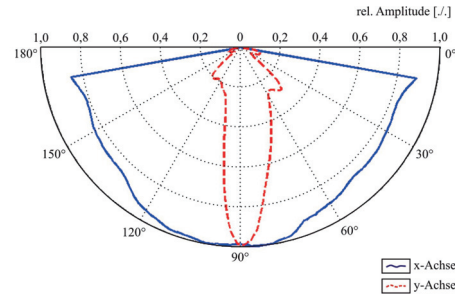


Abbildung 6.4: Richtcharakteristik der genutzten Prüfköpfe bei Aussendung von Scherwellen

artet, der in Kapitel 6.1.3 beschriebene Scanner gesteuert und die Daten aufgezeichnet. Das am Messrechner angeschlossene DAQ-Pad der Firma National InstrumentsTM (DAQ = data acquisition) dient dazu, die elektrischen Signale der Prüfköpfe zu messen und an den Messrechner weiterzuleiten, aber auch der Synchronisierung von Sender und Empfänger. Von dort wird ein Trigger-Signal an den Rechtecksender gesendet und gleichzeitig die Aufzeichnung der Daten gestartet. Nach Erhalt des Trigger-Signals sendet der Rechtecksender ein Rechtecksignal an den Sendeprüfkopf. Dieses wird auf Grund der charakteristischen Eigenschaften des Prüfkopfes in eine sinusähnliche Schwingung umgewandelt. Das vom Empfangsprüfkopf empfangene Signal wird dann nach Verstärkung im Empfangsverstärker über das DAQ-Pad zum Messrechner weitergeleitet und dort gespeichert (Abbildung 6.5).

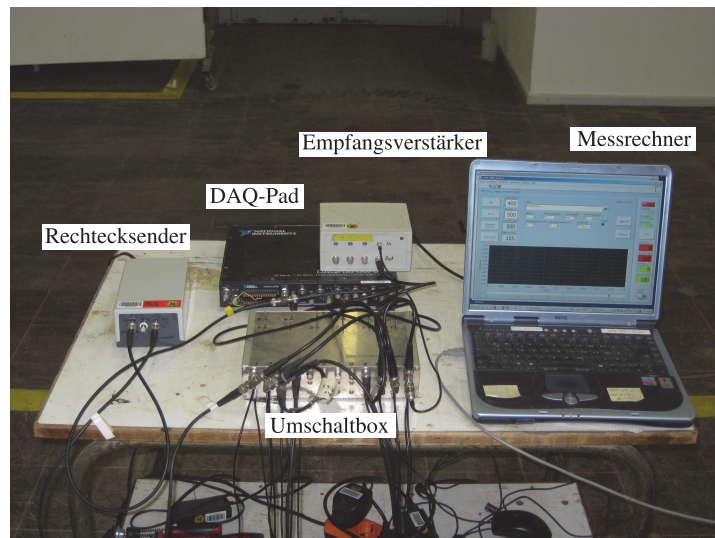


Abbildung 6.5: Messaufbau für die Ultraschallmessungen

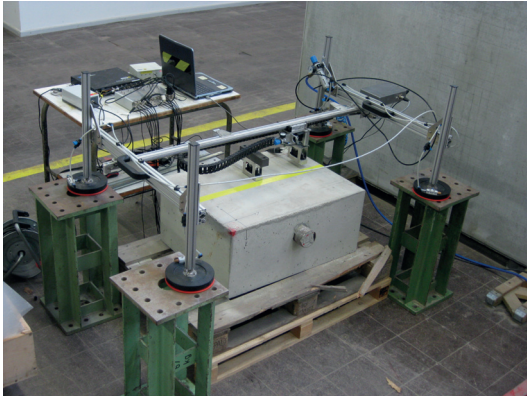


Abbildung 6.6: Scanner mit Messapparatur

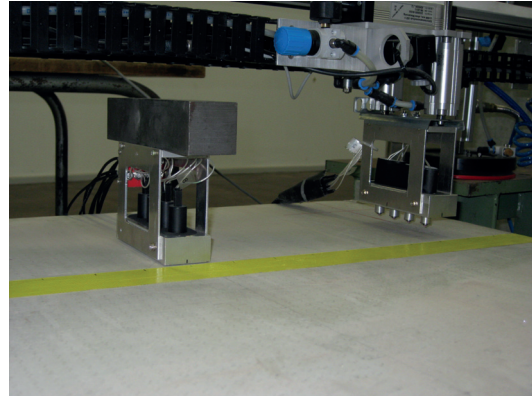


Abbildung 6.7: Detailaufnahme der Prüfköpfe während einer Messung

6.1.3 Scanner

Die ersten Messungen am Polyamidprobekörper wurden noch von Hand vorgenommen. Schnell stellte sich jedoch heraus, dass eine automatisierte Messung schneller und auch präziser sein würde. An der BAM wurden bereits früher eine Vielzahl an Scannermodellen entwickelt und sind für Forschungs- wie auch Messzwecke im Einsatz. Die vorhandenen Scanner ließen sich aber nicht ohne weiteres nutzen, da diese für klassische Ultraschall-Echo-Messungen optimiert sind. Dabei sind Sende- und Empfangsarray in einem Gehäuse zusammengefasst und werden auch gemeinsam verfahren. Mit den dann erzeugten Daten mit konstantem Offset werden die SAFT-Rekonstruktionen durchgeführt.

Für die Auswertung von Daten mit der Reverse Time Migration sind jedoch Daten mit unterschiedlichem Offset nötig. Dazu müssten Sende- und Empfangsprüfkopf getrennt voneinander auf dem Profil verfahrbar sein. Da außerdem immer Daten auf beiden Seiten des Sendeprüfkopfes aufgenommen werden sollten, stellt dieser beim Verfahren des Empfangsprüfkopfes ein Hindernis dar. Aus diesem Grund wurde auf ein halbautomatisches Scannersystem zurückgegriffen. Bei diesem wird der Empfangsprüfkopf automatisch versetzt, die Positionierung des Sendeprüfkopfes muss jedoch von Hand vorgenommen werden. Damit wird ermöglicht, den Sendeprüfkopf wenn nötig von Hand zu entfernen und nach Vorbeifahren des Empfangsprüfkopfes wieder auf das Messprofil zu setzen. Der Scanner ist in Abbildung 6.6 zu sehen. Abbildung 6.7 zeigt eine Detailaufnahme der Prüfköpfe. Links befindet sich der von Hand zu versetzende Sendeprüfkopf, rechts der am Scanner montierte Empfangsprüfkopf.

6.2 Datenprocessing

Die im Folgenden aufgenommenen Messdaten wurden vor der Auswertung mit dem Reverse Time Migration mit den nachfolgenden Methoden mit eigenen Skripten in der

kommerziellen Software MATLAB[®] prozessiert.

Interpolation Mit dem in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Messaufbau konnten die Daten nur mit einer Samplerate von $dt = 1 \cdot 10^{-6}$ s aufgenommen werden. Da dies aber bei der Simulation zu numerischen Instabilitäten führt, mussten die Daten interpoliert werden. Die genutzte MATLAB[®]-Funktion „interp“ füllt dafür den zu interpolierenden Vektor mit Nullen auf und wendet dann einen speziellen Tiefpassfilter an [The MathWorks, Inc.11].

Filterung Die Filterung der Daten ist aus mehreren Gründen notwendig. Einerseits weisen die Daten Störungen durch die Messumgebung auf (Umgebungsgeräusche des Labors, Störungen durch die Bewegung der Kabel bei der Messung), welche das Migrationsergebnis verzerren. Andererseits muss der sich bei 0 Hz befindliche Gleichanteil, welcher sich in einer vertikalen Verschiebung des Signals äußert, herausgefiltert werden. Das gemessene Signal schwingt also nicht exakt um 0 und die im Anschluss folgende 3D/2D-Korrektur wäre nicht möglich.

Für die Filterung wurde in MATLAB[®] ein Butterworth-Filter vierter Ordnung erstellt. Diese Filter sind kontinuierliche Frequenzfilter, bei denen im Durchlassbereich die Übertragungsfunktion möglichst horizontal flach verläuft. An der Grenzfrequenz beträgt die Amplitudenantwort des Filters noch $\sqrt{1/2}$. Die Steilheit des Filters, also wie stark die Filterung rund um die Grenzfrequenz ist, bestimmt sich durch die Ordnung. Die Übertragungsfunktion hat einen durchgehend monotonen Verlauf. Für die Anwendung der Filterfunktion auf das Signal wurde im Anschluss die Funktion „filtfilt“ verwendet. Diese Funktion führt eine so genannte zero-phase Filterung durch. Realisiert wird dies durch Prozessieren der Daten in zwei Richtungen. Nach klassischer Filterung in Vorwärtsrichtung wird das Signal umgekehrt und erneut gefiltert. Das Resultat ist dann ein gefiltertes Signal, dessen Phase nicht verschoben ist [The MathWorks, Inc.11]. Dies ist gerade für die Reverse Time Migration wichtig, da sonst aus der verwendeten Kreuzkorrelation als Abbildungsbedingung Fehler resultieren würden.

Für die Filterung der folgenden Messdaten wurde stets ein Hochpass verwendet, dessen Grenzfrequenz an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst wurde.

3D/2D-Korrektur Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, wird für die Auswertung der Daten ein zweidimensionaler Code verwendet. Die simulierte Ausbreitung einer Welle im zweidimensionalen Modell unterscheidet sich jedoch zur Ausbreitung der Welle im dreidimensionalen Probekörper. Um die 3D-Messdaten mit den 2D-Simulationsdaten über eine Abbildungsbedingung verknüpfen zu können, müssen die Messdaten einer 3D/2D-Korrektur unterzogen werden. Crase et al. haben eine solche Korrektur 1990 beschrieben [Crase90]. Mit dieser Methode werden die Amplitude und die Phase des Messsignals korrigiert. Obwohl in dieser Arbeit keine amplitudenbewahrende Migration durchgeführt wird, wurde aus Gründen der Konsistenz die Amplitudenkorrektur ebenfalls durchge-

führt. Für diese wird das Signal mit $\sqrt{t}$ multipliziert (t : Laufzeit). Für die Korrektur der Phase wird das Signal mit $1/\sqrt{t}$ gefaltet. Dafür wird in MATLAB® die Funktion „conv“ genutzt.

Automatic Gain Control Für einige Tests wurde eine Amplitudenverstärkung genutzt. Mit dieser sollte die Abbildung einer Bohrung in Polyamid verbessert werden. Eine klassische tiefenabhängige Verstärkung kommt aber in den vorliegenden Beispielen nicht in Frage, da die Reflexionen und Mehrfachreflexionen der Oberflächenwellen an den Seitenkanten des Probekörpers hohe Amplituden besitzen und sich im Seismogramm mit dem Nutzsignal überlagern. Eine rein tiefenabhängige Verstärkung würde also diese Seitenreflexionen sehr stark hervorheben. Für die Migration sind diese Signale aber störend, da im vorhandenen Programmcode diese Oberflächenwellen nicht erklärt sind.

Zur Abhilfe wurde nach Yilmaz [Yilmaz01] eine Amplitudenverstärkung mit Hilfe des quadratischen Mittels (RMS Amplitude AGC) in MATLAB® programmiert. Für diese Verstärkung wird das Signal zunächst in gleich große Zeitfenster unterteilt und für jedes Zeitfenster das quadratische Mittel der Amplitude bestimmt. Danach wird ein Verhältnis zu einem gewünschten Amplitudenwert (desired rms) bestimmt. Dieses Verhältnis ist der Wert der Verstärkungsfunktion $g(t)$ in der Mitte des jeweiligen Zeitfensters.

$$g(t) = \frac{\text{desired rms}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}} \quad (6.1)$$

Hierbei sind x_i die Amplitudenwerte der Spur und N ist die Anzahl der Werte innerhalb des Zeitfensters. Nach Berechnung der Werte der Verstärkungsfunktion $g(t)$ für den Mittelpunkt jedes Zeitfensters, wird zwischen ihnen interpoliert. Somit erhält man einen Verstärkungsvektor, welcher die gleiche Länge wie das Signal hat. Nach Multiplikation des Verstärkungsvektors mit dem Signal erhält man das verstärkte Signal. Vorteil dieser Methode ist, dass die Amplituden über das gesamte Signal angeglichen werden. Sehr hohe Amplituden, wie die der Oberflächenwellen, werden damit abgeschwächt, sehr niedrige Amplituden angehoben.

6.3 Messungen an einem Polyamidprobekörper

Für die folgenden Messungen wurde ein Polyamidprobekörper mit den Abmessungen von $1\text{ m} \times 0,6\text{ m} \times 0,3\text{ m}$ gegossen. Polyamid bietet die Möglichkeit Ultraschalldaten aufzunehmen, welche anders als bei Beton frei von Streuungen sind. Es ist damit ein geeignetes Material um den verwendeten Algorithmus auf seine Praxistauglichkeit zu testen. Abbildung 6.8 zeigt den Block in unbearbeitetem Zustand. Für eine Messreihe wurde eine Bohrung in den Block eingebracht und schrittweise von 2 cm auf 5 cm vergrößert. Abbildung 6.9 zeigt den Bohrvorgang, welcher von der Zentralwerkstatt der BAM durchgeführt wurde. Der Mittelpunkt der Bohrung wurde asymmetrisch im Probekörper ge-

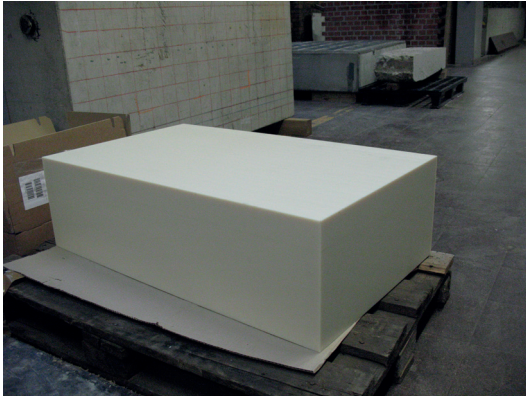


Abbildung 6.8: Polyamidblock nach Guss

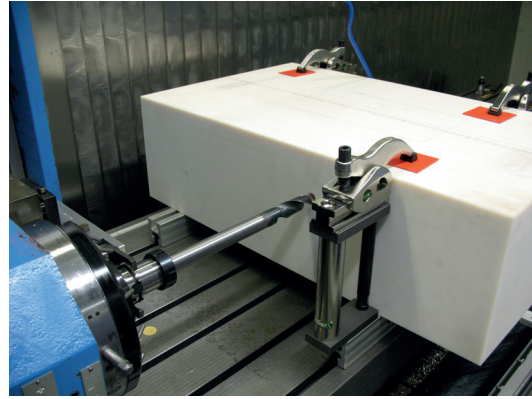


Abbildung 6.9: Einbringen der Bohrung in den Probekörper

wählt und befindet sich bei $x = 40$ cm und $y = 10$ cm. Für jede Bohrungsgröße wurden von beiden Messflächen Daten aufgenommen. Es wurde je Seite eine Messung mit Longitudinalwellen durchgeführt und zwei weitere mit beiden Polarisationsrichtungen der Scherwellen. Für alle Bohrungen und zusätzlich einer Nullmessung ohne Bohrung ergibt sich damit eine Gesamtzahl von 27 Messungen.

Für die Messungen wurde das in Kapitel 6.1.3 beschriebene Scannersystem genutzt. Lediglich die Nullmessungen ohne Bohrung im Probekörper und die Messungen an der Bohrung mit 2 cm Durchmesser wurden noch von Hand durchgeführt, da das Scannersystem zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung stand. Da der Sendeprüfkopf trotz Scannermessung von Hand versetzt werden muss, wurde zunächst mit 12 Sendepositionen im Abstand von 0,08 m gearbeitet. Der Abstand der 45 Empfangspositionen betrug 0,02 m. Abbildung 6.10 zeigt den Probekörper mit Scanner und montiertem Empfangsprüfkopf. Am Prüfkopf wurde ein Rechtecksignal mit einer Frequenz von 100 kHz für Longitudinalwellen und 50 kHz für Scherwellen angelegt. Daraus ergibt sich für die Longitudinalwellenmessung eine Wellenlänge von $\lambda = 2,7$ cm und für die Scherwellenmessung eine ähnliche Wellenlänge von $\lambda = 2,3$ cm. Auf Grund der Übertragungsfunktion des Prüfkopfes wird eine Art Sinusschwingung in den Probekörper eingespeist. An den Empfängern wurde 2 ms aufgezeichnet und der Datensatz für die Auswertung nach Bedarf gekürzt. Tabelle 6.1 fasst alle Parameter für die Messungen zusammen.

Um den Unterschied zu einer Messung mit mehr als 12 Sendepositionen zu zeigen, wurden an der Bohrung mit 5 cm Durchmesser Messungen mit 45 Sendepositionen mit dem Scherwellenprüfkopf durchgeführt. Diese Messungen waren außerdem Grundlage für Versuche mit interferometrischen Konzepten [Niederleithinger14]. Alle weiteren Parameter wie Frequenz und Aufzeichnungszeit wurden wie in den vorangegangenen Messungen mit weniger Sendepositionen gewählt.

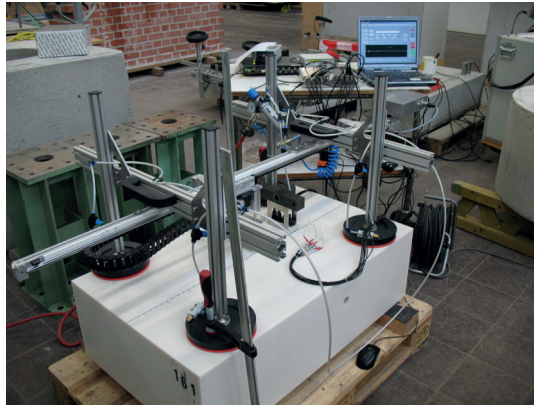


Abbildung 6.10: Scanner mit Polyamidprobekörper

Kenngröße	Scherwelle	Longitudinalwelle
Polyamidblock	$1 \times 0,6 \times 0,29 \text{ m}^3$	
Bohrung x	0,4 m	
Bohrung y	0,1 m	
Frequenz	50 kHz	100 kHz
Samplerate	$1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	
Aufzeichnungszeit	0,002 s	
Anzahl Sender	12 bzw. 45	12
Anzahl Empfänger	45	
1. Sende-/Empfangsposition	x = 0,06 m y = 0 m	
Abstand der Sender	0,08 m bzw. 0,02 m	0,08 m
Abstand der Empfänger	0,02 m	

Tabelle 6.1: Kenngrößen für die Messungen am Polyamidprobekörper

6.3.1 Bearbeitung der Messdaten

Die gemessenen Daten wurden vor der Auswertung mit der Reverse Time Migration mit den in Kapitel 6.2 beschriebenen Methoden bearbeitet. Zunächst war es notwendig die Daten zu interpolieren. Das verwendete Messsystem konnte lediglich mit einer Samplerate von $1 \cdot 10^{-6}$ s aufzeichnen. Diese Samplerate ist aber für die numerischen Rechnungen der Reverse Time Migration nicht ausreichend und würde zu Stabilitätsproblemen führen. Für Messungen mit Scherwellen mit einer Frequenz von $f = 50$ kHz war eine Interpolation auf $dt = 1 \cdot 10^{-7}$ s nötig, auf $dt = 5 \cdot 10^{-8}$ s für Messungen mit Longitudinalwellen mit einer Frequenz von $f = 100$ kHz.

Anschließend wurden die interpolierten Daten gefiltert. Dazu wurde ein Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 15 kHz genutzt. Diese Filterung dient dazu niederfrequente Signalteile zu entfernen, welche hauptsächlich durch Umgebungseinfluss wie Arbeiten in der Laborhalle oder elektronische Störungen im Messsystem entstehen. Abbildung 6.11 zeigt die Amplitudenspektren eines ausgewählten Messsignals vor und nach der Filterung. Im Amplitudenspektrum der Originalspur ist bei 0 Hz ein Signalanteil sichtbar. Dieser DC-shift, welcher zu einer Verschiebung des Signals aus der Nulllinie heraus führt, wird ebenfalls durch den Hochpassfilter entfernt. Ohne die Korrektur des Signals zu einer Schwingung um null wäre die folgende 3D/2D-Korrektur nicht möglich. Diese wurde nach der Filterung wie in Kapitel 6.2 beschrieben angewendet. Abbildung 6.12 zeigt den Vergleich von der interpolierten Spur mit der Spur, welche gefiltert und 3D/2D-korrigiert wurde. Durch die Bearbeitung wurde gleichzeitig die Amplitude des elektronischen Übersprechens, welches sich am Anfang des Signals zeigt, stark verringert.

Da die Aufzeichnungszeit höher gewählt wurde, als es für die Reverse Time Migration nötig ist, wurde diese Zeit nach dem Datenprozessing für die Scherwellendaten auf 12000 Samples entsprechend 0,0012 s und für Longitudinalwellendaten auf 12000 Samples entsprechend 0,0006 s gekürzt. Die Zeit wurde so gewählt, dass eine Mehrfachreflexion der Rückwand enthalten ist.

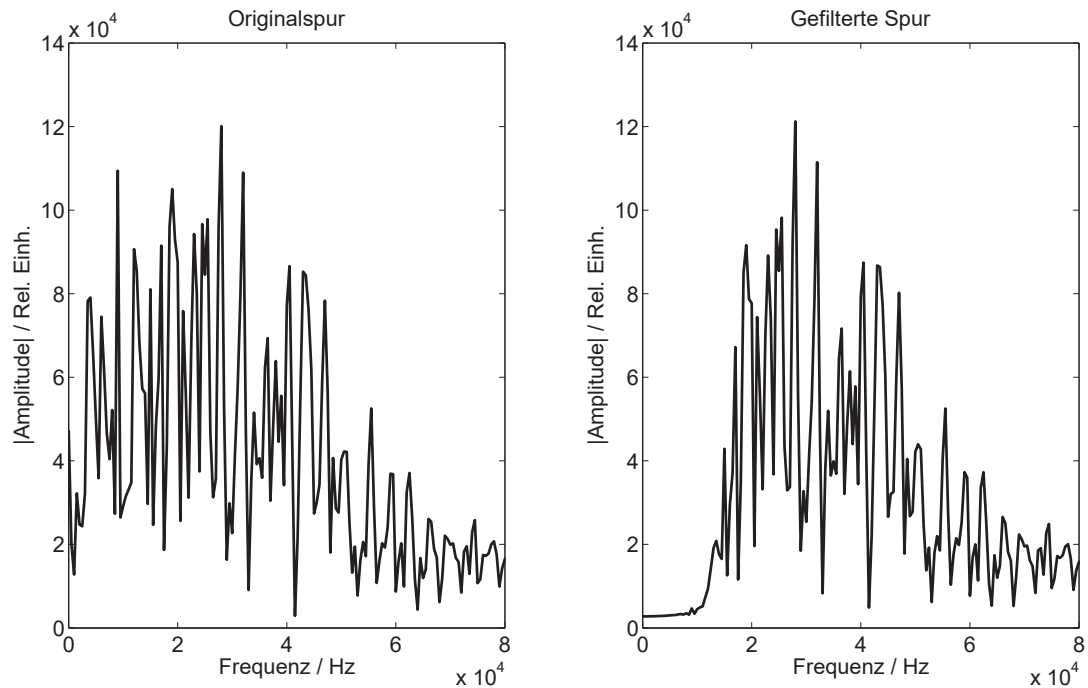


Abbildung 6.11: Amplitudenspektren einer einzelnen Spur vor und nach der Bearbeitung mit einem Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 15 kHz

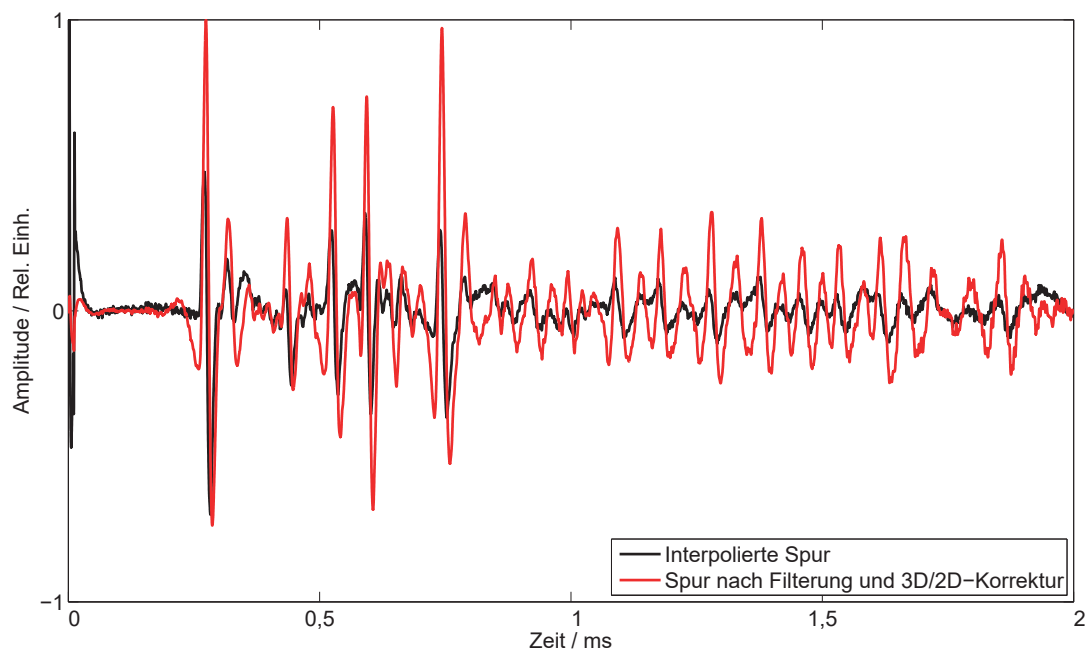


Abbildung 6.12: Vergleich der originalen interpolierten Spur (schwarz) und der Spur nach Filterung und 3D/2D-Korrektur (rot)

6.3.2 Datenbeispiele

Die Abbildungen 6.13-6.15 zeigen für jede gemessene Wellenart, also Longitudinalwellen und beide möglichen Polarisationen der Scherwellen, ein Datenbeispiel. Es wurde die Sendeposition gewählt, welche sich etwa über dem Bohrloch von 50 mm Durchmesser befindet. Auf Grund der nicht erreichbaren Empfangspositionen neben der Sendeposition befindet sich in der Mitte der Abbildungen eine Datenlücke. In den Abbildungen wurden die wichtigsten Reflexionen farblich markiert. Rot ist die direkte Welle bzw. die Welle, die an der Oberfläche läuft, blau ist die Reflexion an der Bohrung, grün die Reflexion und auch die Multiple der Unterseite des Probekörpers und gelb die Reflexionen der Seitenwände des Probekörpers.

Am Beispiel der Longitudinalwellen in Abbildung 6.13 zeigt sich, dass sich die Oberflächenwellen und die Reflexion an der Bohrung teils stark überlagern. Des Weiteren ist die Reflexion an der Rückwand nur schwach ausgeprägt. Bei der Messung mit senkrecht zum Profil polarisierten Scherwellen in Abbildung 6.14 hingegen sind Oberflächenwelle und Reflexion der Bohrung besser getrennt. Außerdem lassen sich gut zwei Reflexionen der Unterseite des Probekörpers erkennen. Die stark ausgeprägten Reflexionen der Seiten des Probekörpers führen nicht zu ungünstigen Überlagerungen mit anderen Reflexionen. Das Datenbeispiel für die Messung mit parallel zum Profil polarisierten Scherwellen in Abbildung 6.15 zeigt verrauschtere Messdaten als die senkrechte Polarisationsrichtung. Die zweite Reflexion der Unterseite des Probekörpers ist teils nicht mehr eindeutig vom Rauschen zu unterscheiden. Außerdem sind Oberflächenwelle und Reflexion an der Bohrung teilweise überlagert.

Verglichen werden können diese Beispiele mit dem Datenbeispiel für Simulationsdaten in Abbildung 5.4, da mit diesen die Messdaten in der Migration erklärt werden sollen (Vorwärtsrechnung). In der Simulation werden wegen des akustischen Programmcodes keine Oberflächenwellen berechnet. Die in den Messdaten vorkommenden Oberflächenwellen können in der Migration deshalb zu Artefakten führen. Im Idealfall sollte die Amplitude der gemessenen Oberflächenwellen also möglichst klein gegenüber den Nutzsignalen sein. Dies ist bei der Messung mit Scherwellen, welche senkrecht zum Profil polarisiert sind, der Fall. Bei diesen kommt es auch zu den geringsten Überlagerungen von Oberflächenwellen und der Reflexion an der Bohrung. Diese Beobachtung deckt sich ebenfalls mit den Untersuchungen zur Richtcharakteristik der Prüfköpfe in Kapitel 6.1.1. Es ist also zu erwarten, dass die Migrationsergebnisse der senkrecht zum Profil polarisierten Scherwellen am besten sein werden.

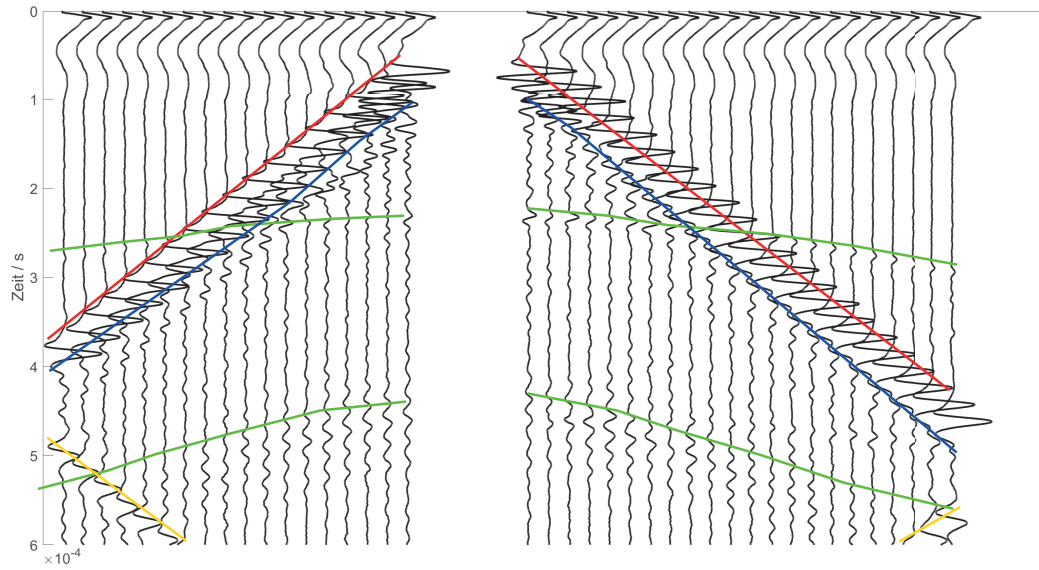


Abbildung 6.13: Datenbeispiel für Messdaten. Messung an einem Polyamidprobekörper mit 50 mm-Bohrung mit Longitudinalwellen. Rot - direkte Welle/Oberflächenwelle, blau - Reflexion der Bohrung, grün - Reflexionen der Unterseite des Probekörpers, gelb - Reflexionen der Seiten des Probekörpers.

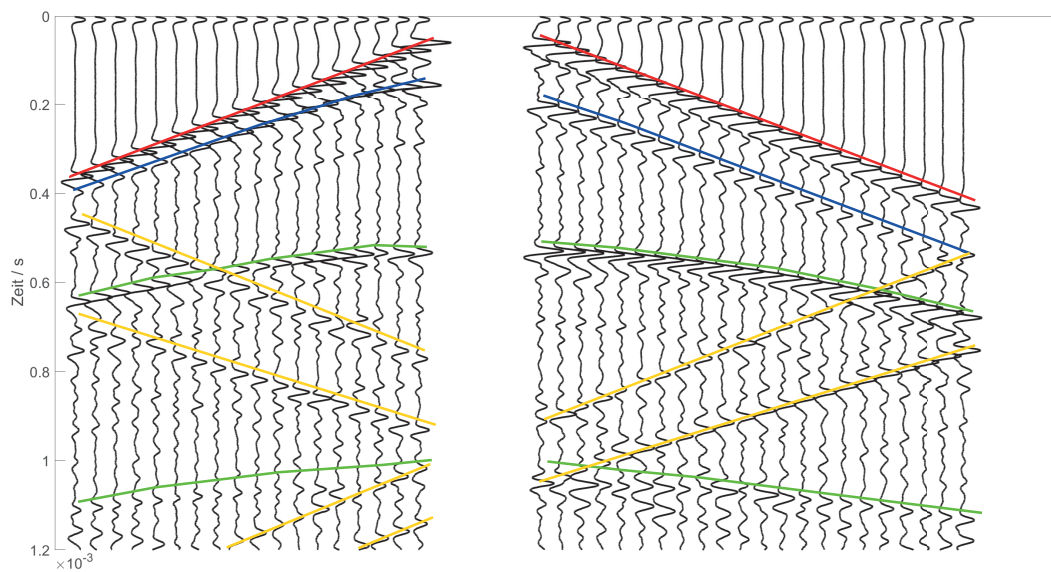


Abbildung 6.14: Datenbeispiel für Messdaten. Messung an einem Polyamidprobekörper mit 50 mm-Bohrung mit senkrecht zum Profil polarisierten Scherwellen. Rot - direkte Welle/Oberflächenwelle, blau - Reflexion der Bohrung, grün - Reflexionen der Unterseite des Probekörpers, gelb - Reflexionen der Seiten des Probekörpers.

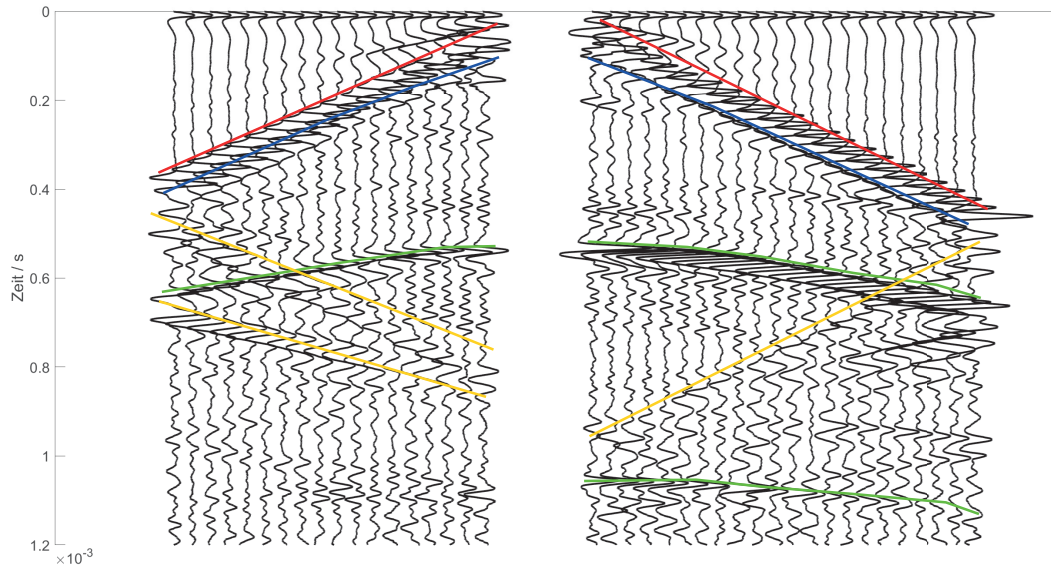


Abbildung 6.15: Datenbeispiel für Messdaten. Messung an einem Polyamidprobekörper mit 50 mm-Bohrung mit parallel zum Profil polarisierten Scherwellen. Rot - direkte Welle/Oberflächenwelle, blau - Reflexion der Bohrung, grün - Reflexionen der Unterseite des Probekörpers, gelb - Reflexionen der Seiten des Probekörpers.

6.3.3 Reverse Time Migration der Messdaten

Für die Reverse Time Migration der Messdaten muss zunächst ein Geschwindigkeitsmodell gewählt werden. Hier wird ein homogenes Modell genutzt, welches keine Informationen über die Bohrung enthält, jedoch die möglichst genaue Geschwindigkeit von Polyamid. Diese wurde aus mehreren Stichproben mit Hilfe der Rückwandreflexion bestimmt. Die Abbildungen 6.16 und 6.17 zeigen die beiden Startmodelle für die Longitudinalwellen- und Transversalwellenauswertung. Der Polyamidblock (weiß), von dem die Größe als bekannt vorausgesetzt wird, ist von einer 10 cm starken Luftschicht (schwarz) umgeben. Die Sende- und Empfangspositionen sind mit Dreiecken im Modell markiert. Tabelle 6.2 listet alle wichtigen Parameter für die Berechnungen auf.

In den folgenden Abschnitten werden für die Nullmessung und die 20mm-Bohrung zum Beleg der Ausführungen in Kapitel 6.1.1 beispielhaft die Ergebnisse für alle Wellentypen gezeigt, für die weiteren Bohrungsgrößen jedoch nur noch die Auswertungen der Scherwellendaten, die senkrecht zum Profil polarisiert sind. Alle weiteren Migrationsergebnisse finden sich in Anhang A.1.

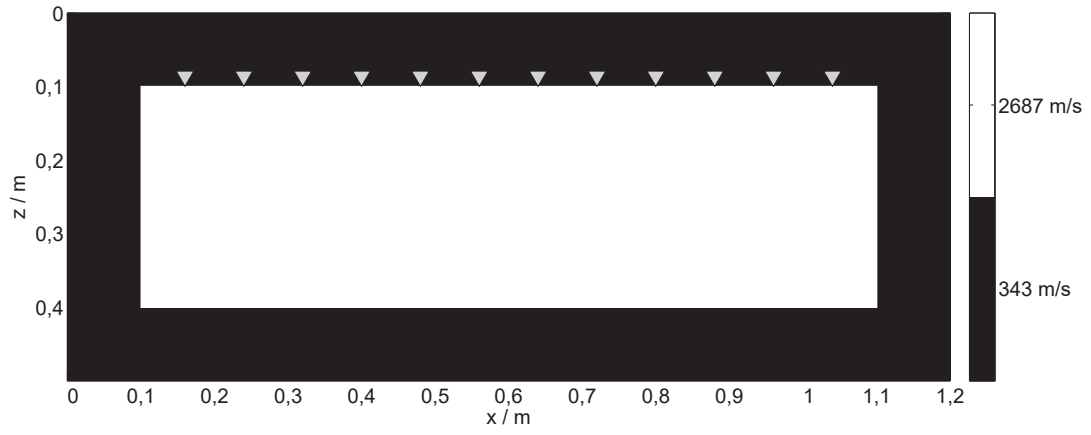


Abbildung 6.16: Homogenes Startmodell für die Reverse Time Migration der Longitudinalwellendaten

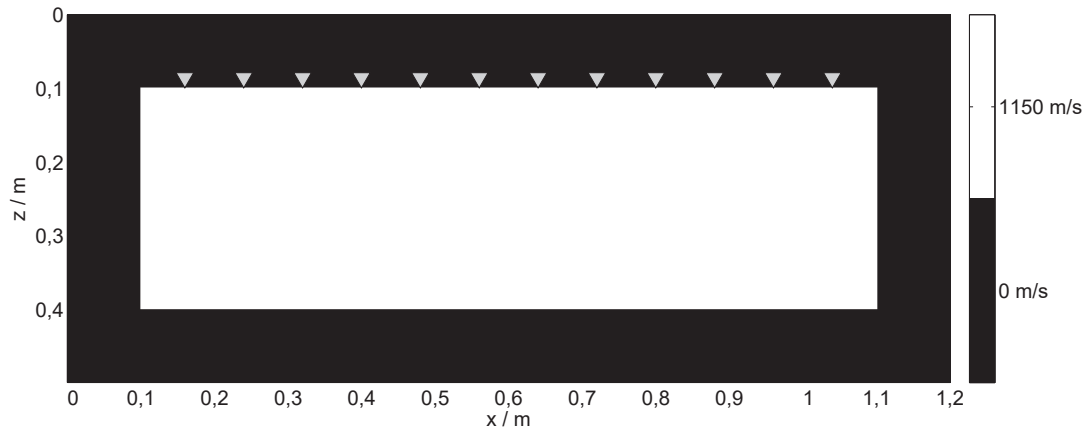


Abbildung 6.17: Homogenes Startmodell für die Reverse Time Migration der Scherwellendaten

Kenngröße	Scherwelle	Longitudinalwelle
Polyamid v_p		2687 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Polyamid v_s	1150 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	
Polyamid ρ	1140 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	
Luft v_p		343 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Luft v_s	0 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	
Luft ρ	1,204 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	
Modellgröße	3000 × 1250 Gitterpunkte	6000 × 2500 Gitterpunkte
Gitterpunktabstand	0,0004 m	0,0002 m
Polyamidblock im Modell	1 × 0,3 m ²	
Bohrung x	0,4 m	
Bohrung y	0,1 m	
Frequenz	50 kHz	100 kHz
Samplerate	1 · 10 ⁻⁷ s	5 · 10 ⁻⁸ s
Aufzeichnungszeit	0,0012 s	0,0006 s

Tabelle 6.2: Kenngrößen für die Reverse Time Migration der Messungen am Polyamidprobekörper

6.3.3.1 Nullmessung ohne Bohrung

Die Abbildungen 6.18, 6.19 und 6.20 zeigen die Migrationsergebnisse für alle drei gemessenen Wellenarten am Polyamidprobekörper ohne Bohrung. Im Ergebnis der Longitudinalwellenmessung sind weder Rückwand noch Seitenwände abgebildet. Außerdem sind in einer Probekörpertiefe von 10 cm Artefakte der Wellenfelder erkennbar. In Abbildung 6.19 für die Migration der Scherwellendaten, welche parallel zum Profil polarisiert sind, ist hingegen die Rückwand erkennbar. Die Seitenwände des Probekörpers sind aber nicht deutlich abgebildet. Ebenfalls sind Artefakte in Form von waagerechten Linien im Ergebnis sichtbar. Wie erwartet ist das Migrationsergebnis der Scherwellendaten, welche senkrecht zum Profil polarisiert sind, am besten (Abbildung 6.20). Hier sind Rückwand und Seitenwände klar abgebildet. Trotzdem sind kreuzförmige Artefakte aus der Rechnung sichtbar. In allen Abbildungen sind an den Sende- und Empfangspositionen an der Oberfläche starke Amplituden sichtbar. Durch Anpassung des Grenzwertes der Amplitudenskala wurde erreicht, dass dieser Effekt nicht das restliche Migrationsergebnis mit kleineren Amplituden überdeckt.

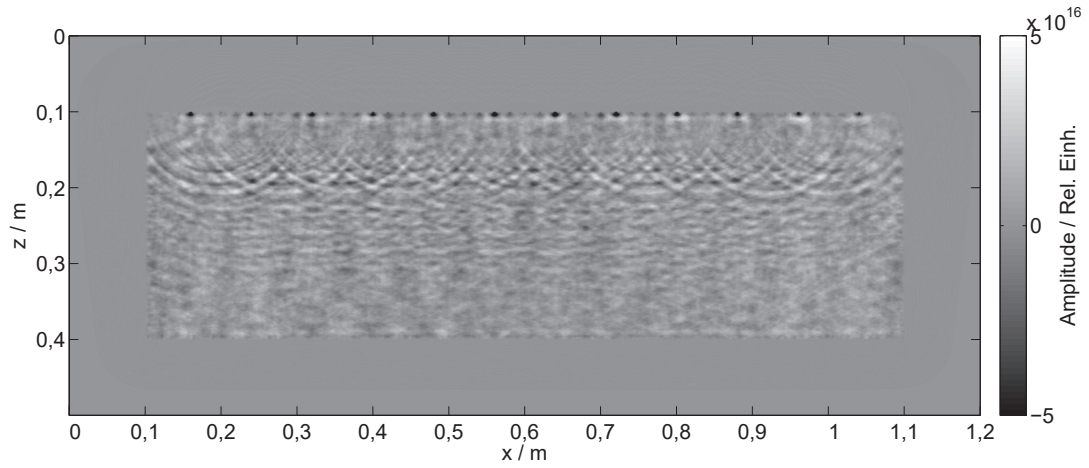


Abbildung 6.18: Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung ohne Bohrung

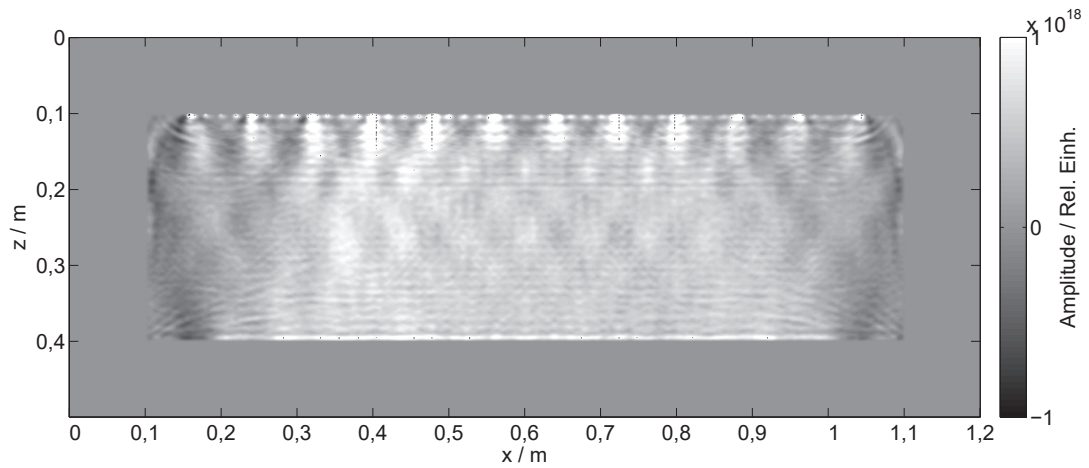


Abbildung 6.19: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert ohne Bohrung

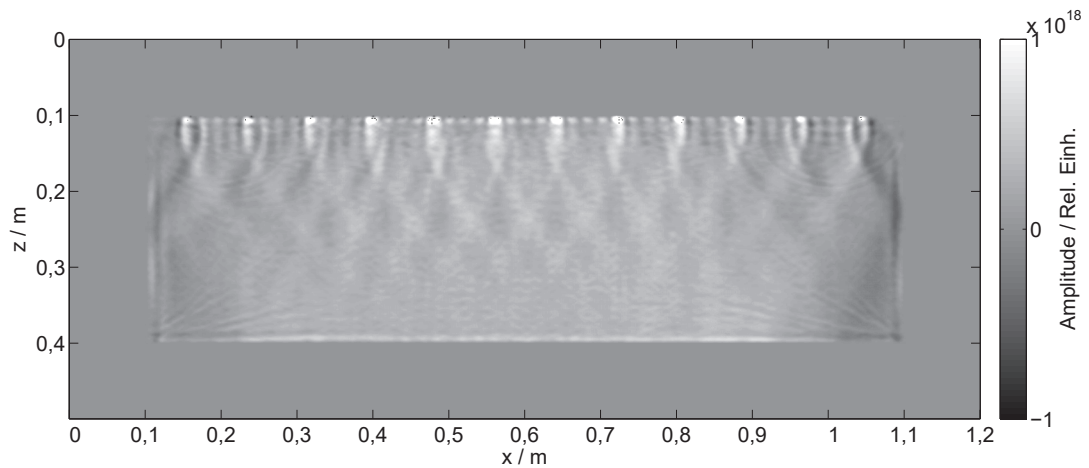


Abbildung 6.20: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert ohne Bohrung

6.3.3.2 Bohrung mit 2 cm Durchmesser

Die Abbildungen 6.21, 6.22 und 6.23 zeigen die Migrationsergebnisse für alle drei gemessenen Wellenarten am Polyamidprobekörper mit einer Bohrung mit einem Durchmesser von 2 cm. Hier ist deutlich erkennbar, dass mit der Longitudinalwellenmessung keine Abbildung der Bohrung erreicht werden konnte. Ebenso ist im Migrationsergebnis der Scherwellenmessung, bei der die Prüfköpfe parallel zum Profil polarisiert wurden, die Bohrung nicht zu sehen. Im Migrationsergebnis der Scherwellendaten, welche senkrecht zum Profil polarisiert sind, ist die Bohrung abgebildet. Sie ist an der richtigen Position, jedoch nicht in ihrem vollen Umfang dargestellt. Ein Grund dafür ist, dass die Wellenlänge mit $\lambda = 2,3 \text{ cm}$ nur wenig größer als die gesuchte Bohrung ist. Des Weiteren findet eine Abbildung der Unterseite der Bohrung durch Mehrfachreflexionen über die Rückwand des Probekörpers statt. Auf Grund von Streuung, Dämpfung und des kleinen Querschnitts (auf Grund des kleinen Durchmessers der Bohrung) wird die an den Empfängern aufgezeichnete Amplitude der Reflexion klein sein. Dadurch fällt die konstruktive Überlagerung in der Kreuzkorrelation ebenso klein aus und die Unterseite der Bohrung bleibt unsichtbar. Abbildung 6.24 zeigt das Migrationsergebnis der Messung von der anderen Seite. Die Bohrung befindet sich nun nahe der Unterseite des Probekörpers. Auch hier ist sie zwar als Bohrung erkennbar, jedoch wiederum nicht in vollem Umfang abgebildet.

Da für die Longitudinalwellenmessung und die parallel zum Profil polarisierte Scherwellenmessung keine Abbildung der Bohrung erreicht werden konnte, werden im Folgenden nur noch die Scherwellenmessungen gezeigt, bei denen die Polarisation der Welle senkrecht zum Profil war. Alle weiteren Migrationsergebnisse befinden sich in Anhang A.1.

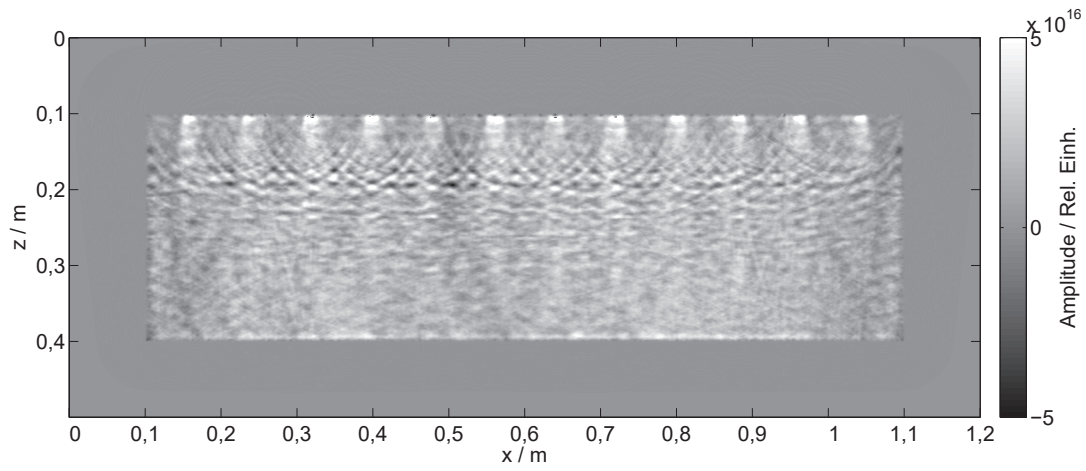


Abbildung 6.21: Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 2 cm-Bohrung oben

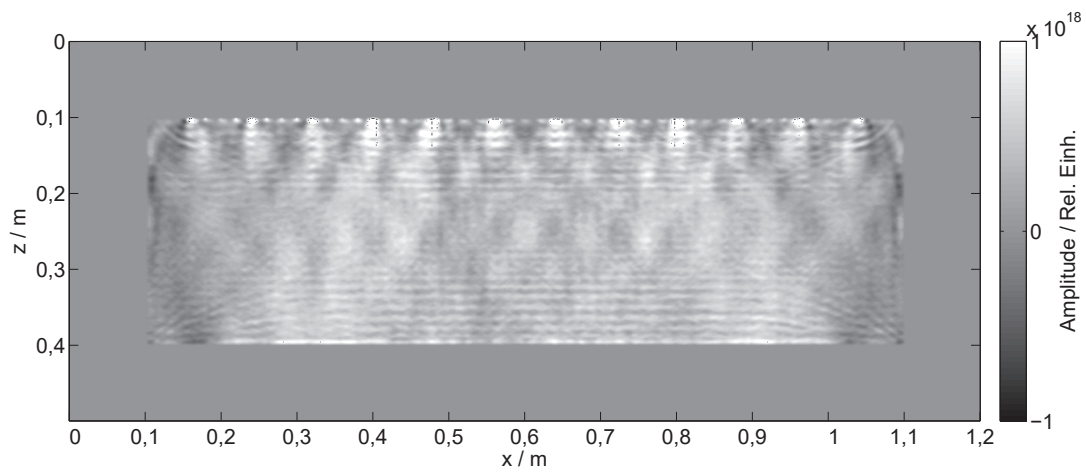


Abbildung 6.22: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 2 cm-Bohrung oben

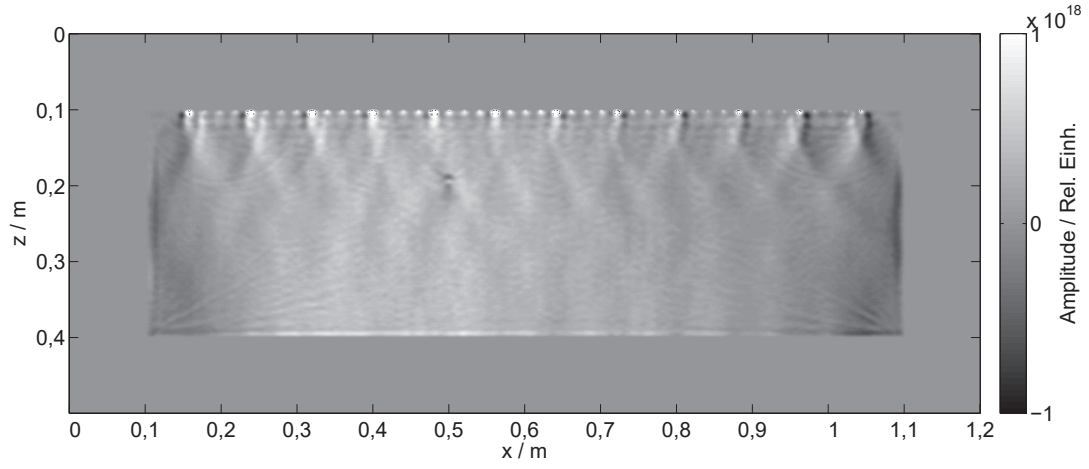


Abbildung 6.23: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 2 cm-Bohrung oben

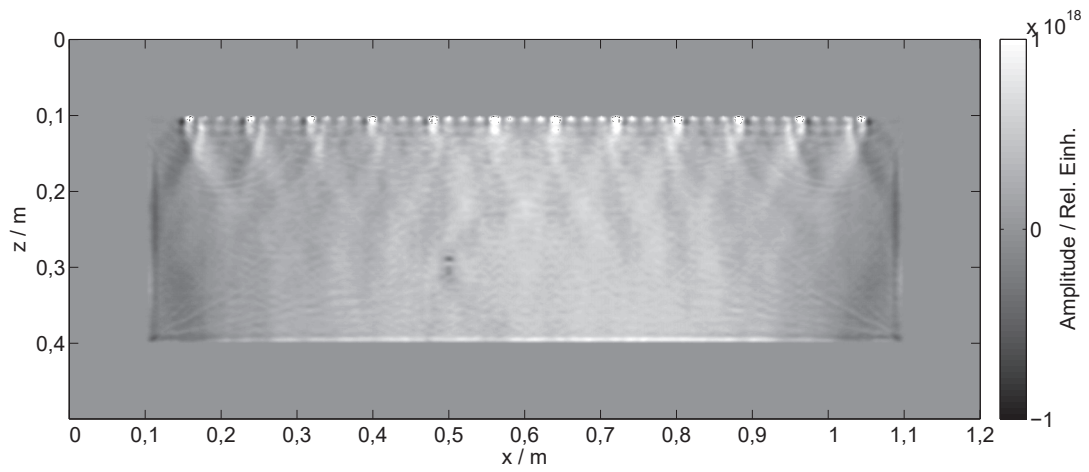


Abbildung 6.24: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 2 cm-Bohrung unten

6.3.3.3 Bohrung mit 3 cm Durchmesser

Die Abbildungen 6.25 und 6.26 zeigen die Migrationsergebnisse für die Bohrung mit auf 3 cm erweitertem Durchmesser und senkrecht polarisierten Scherwellen. Auch hier ist die Bohrung abgebildet, aber noch nicht in vollem Umfang erkennbar. Befindet sich die Bohrung aber nahe der Unterkante des Probekörpers, ist eine Abbildung der Unterseite der Bohrung schon leicht sichtbar.

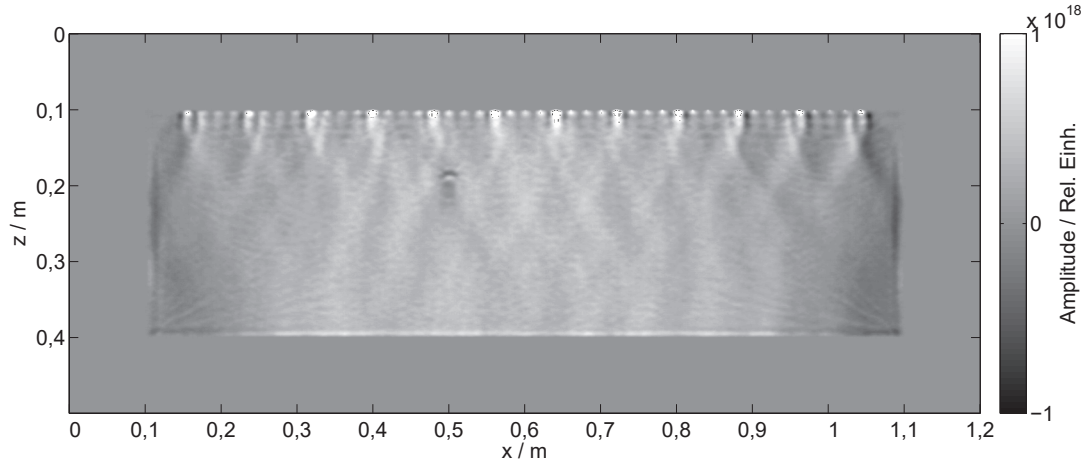


Abbildung 6.25: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 3 cm-Bohrung oben

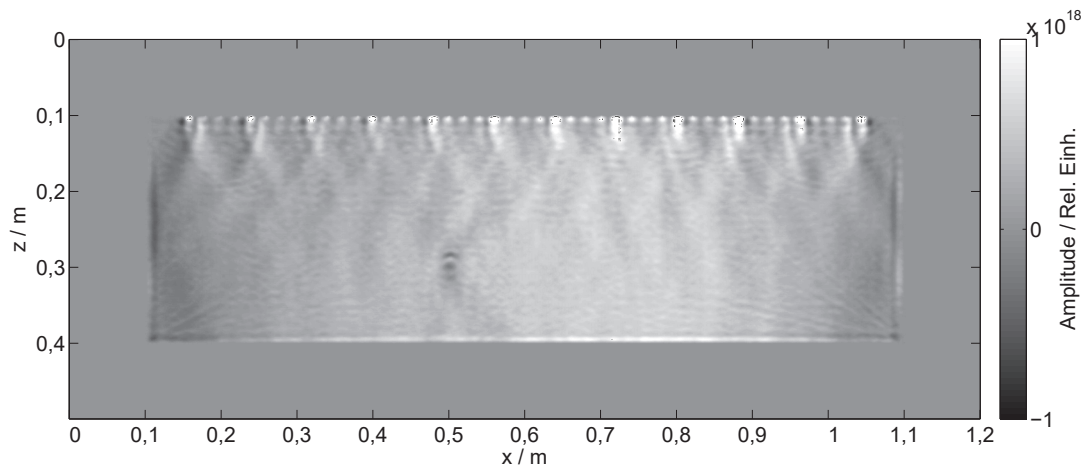


Abbildung 6.26: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 3 cm-Bohrung unten

6.3.3.4 Bohrung mit 4 cm Durchmesser

Die Abbildungen 6.27 und 6.28 zeigen die Migrationsergebnisse für die Bohrung mit 4 cm Durchmesser und senkrecht polarisierten Scherwellen. Die Bohrung ist nun deutlicher als kreisrunde Störung zu erkennen, jedoch ist sie nur im gesamten Umfang abgebildet, wenn sie sich nahe der Unterkante befindet. Dann lässt sich auch bereits ein Durchmesser von 3,88 cm aus dem Migrationsergebnis ablesen. Dies entspricht einer Abweichung von lediglich 3 %.

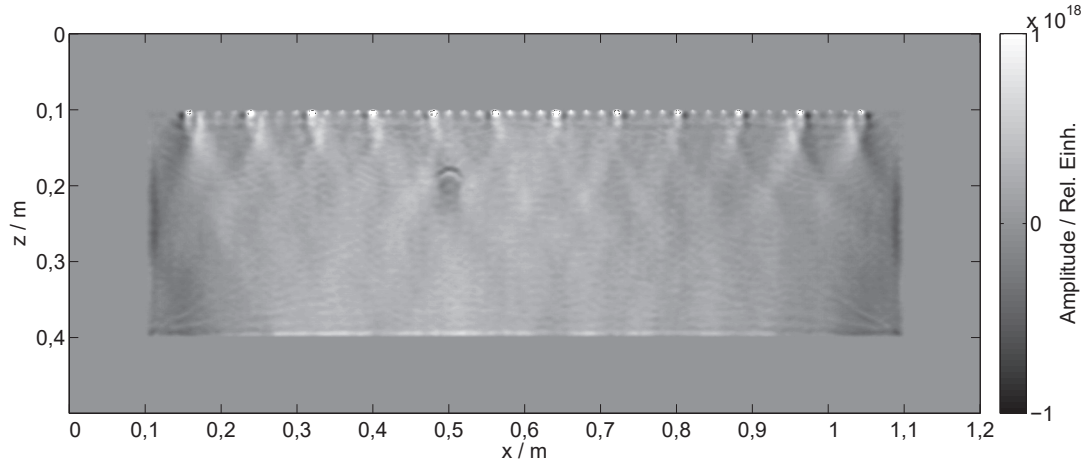


Abbildung 6.27: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 4 cm-Bohrung oben

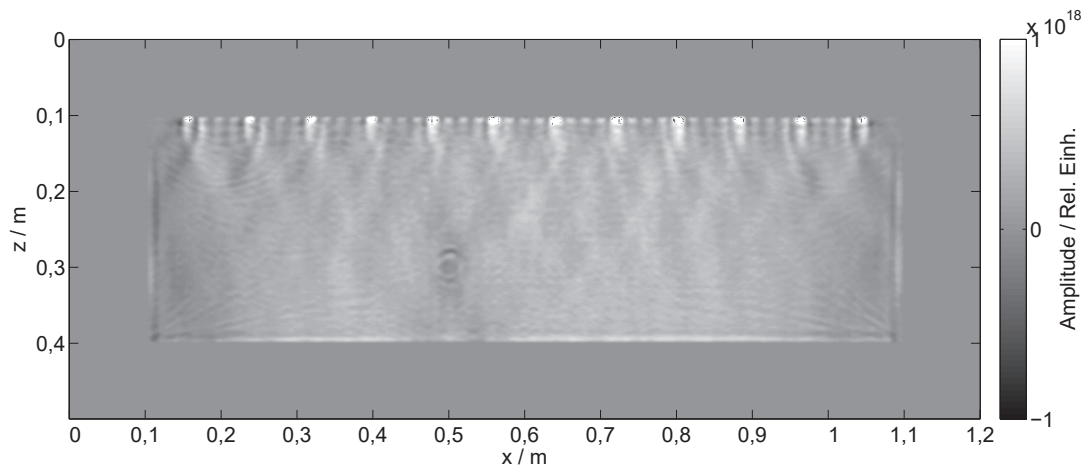


Abbildung 6.28: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 4 cm-Bohrung unten

6.3.3.5 Bohrung mit 5 cm Durchmesser

Die Abbildungen 6.29 und 6.30 zeigen die Migrationsergebnisse für die Bohrung mit 5 cm Durchmesser und senkrecht polarisierten Scherwellen. Für diese Bohrungsgröße sind für beide möglichen Positionen, also die nahe an der Oberkante und die nahe an der Unterseite, die Bohrungen im vollständigen Umfang abgebildet. Jedoch ist in Abbildung 6.29 die Unterkante der Bohrung nicht so gut erkennbar wie in Abbildung 6.30. Aus diesem Grund wurde der Durchmesser nur für die Bohrungsposition, welche sich nahe der Unterkante befindet, bestimmt. Er beträgt 5,24 cm und weicht damit 4,8 % von der wahren Größe ab.

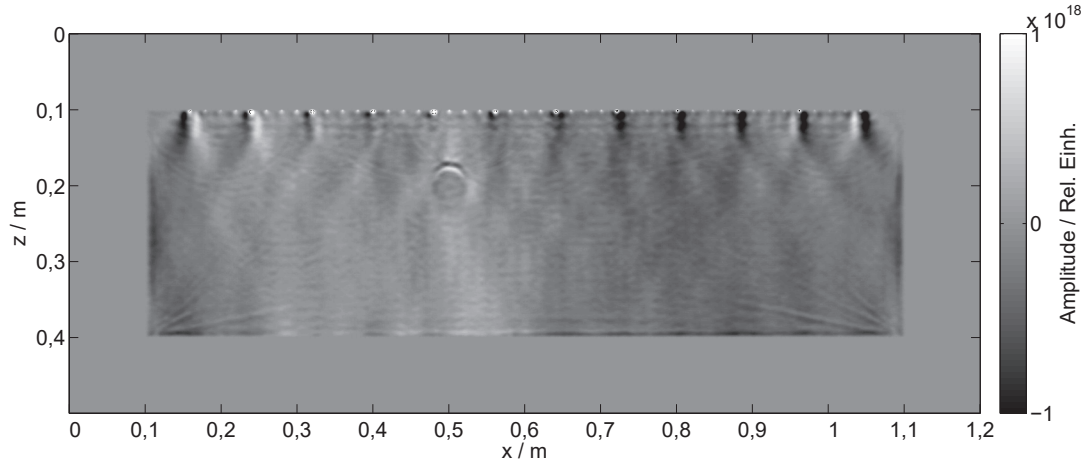


Abbildung 6.29: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung oben

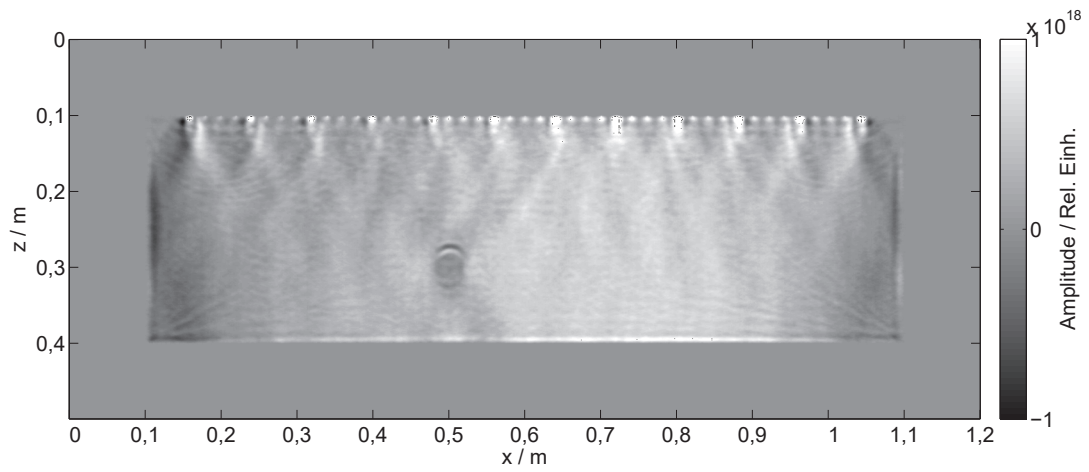


Abbildung 6.30: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung unten

6.3.3.6 Bohrung mit 5 cm Durchmesser mit Anwendung einer Amplitudenverstärkung (AGC)

Um die Abbildung zu verbessern wurde auf die Daten eine Amplitudenverstärkung wie in Kapitel 6.2 beschrieben angewendet. Dabei wurde keine tiefenabhängige Verstärkung verwendet, die die Seitenreflexionen der Oberflächenwellen unnötig stark hervorheben würde, sondern eine Variante, welche die Amplituden der gesamten Spur auf ein Niveau hebt. Die Abbildungen 6.31 und 6.32 zeigen die entsprechenden Migrationsergebnisse. Es zeigt sich ein gleichmäßigeres Amplitudenbild und Artefakte treten weniger stark hervor. Durch die Verstärkung ist die Unterkante der Bohrung in Abbildung 6.31 besser zu erkennen als ohne. Aus diesem Grund ließ sich jetzt auch hier eine Durchmesserbestimmung durchführen, die einen Wert von 5,2 cm entsprechend 4 % Abweichung vom wahren Wert ergab. Für die untere Bohrung konnte ein Durchmesser von 5,24 cm entsprechend 4,8 % Abweichung bestimmt werden.

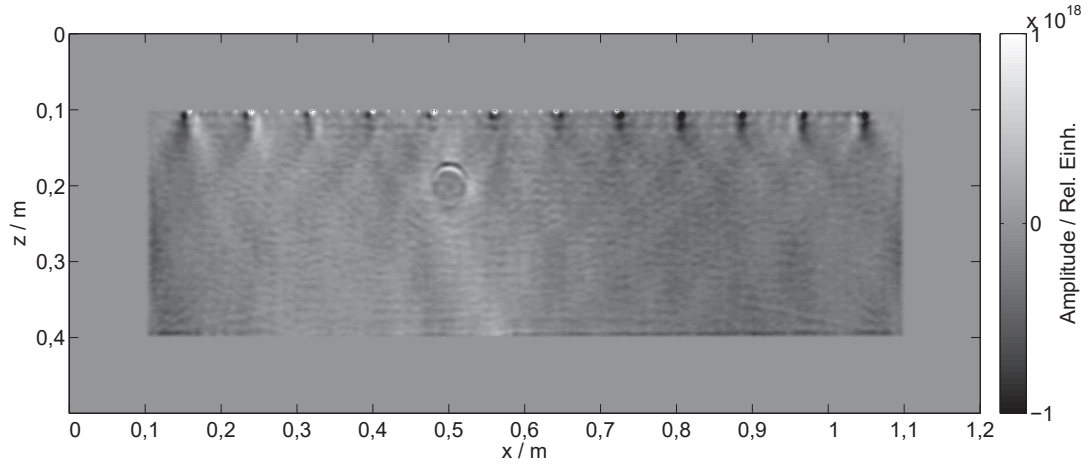


Abbildung 6.31: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung oben und AGC

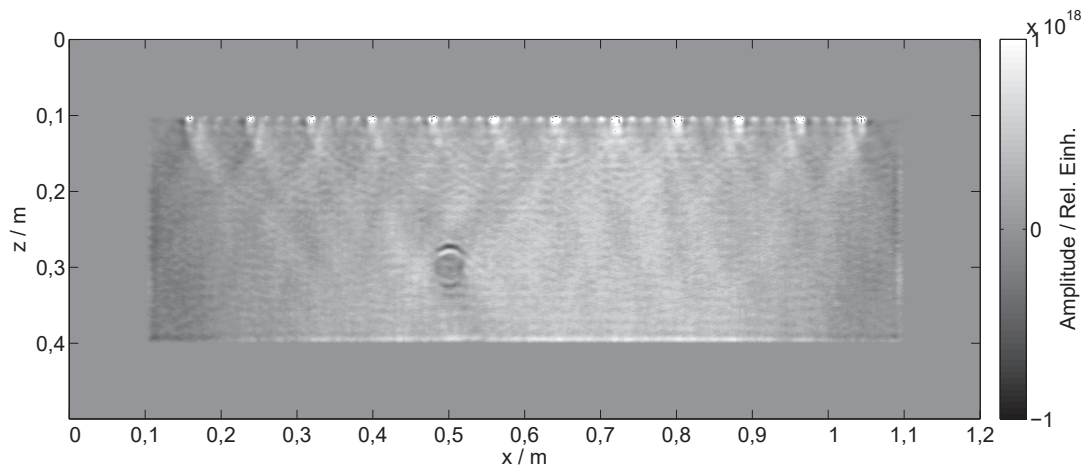


Abbildung 6.32: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung unten und AGC

6.3.3.7 Bohrung mit 5 cm Durchmesser gemessen mit 45 Sendepositionen

Auf Grund der halbautomatisierten Messung wurden bisher nur 12 Sendepositionen im Abstand von 0,08 m genutzt. Für die größte Bohrungsweite von 5 cm wurden zwei weitere Messungen mit jeweils 45 Sendepositionen durchgeführt. Wie bei den bisherigen Messungen befindet sich die Bohrung bei der ersten Messung nahe der Oberfläche. Die zweite Messung erfolgte von der anderen Probekörperseite, sodass sich die Bohrung nahe der Unterkante befindet. Die Messungen sind zwar mit einem deutlich höheren Aufwand verbunden, wurden aber durchgeführt, um mögliche Verbesserungen der Abbildungsqualität durch mehr Sendepositionen zu untersuchen. Alle weiteren Parameter waren identisch zu denen in der vorangegangenen Messung. Als Startmodell für die Auswertung der Daten diente wieder das bisher genutzte homogene Modell aus Abbildung 6.17. Die Abbildungen 6.33 und 6.34 zeigen die beiden Migrationsergebnisse. Die Bohrung ist ebenso gut zu erkennen, wie in den vorherigen Ergebnissen, jedoch scheint sie in der vertikalen Ausdehnung in die Länge gezogen. Dies ist jedoch nur ein optischer Effekt, da die Seiten der Bohrung schwächer abgebildet sind. Die Bestimmung des Bohrungsdurchmessers ergab auch hier für die Bohrung, welche sich nahe der Unterkante befindet, einen Wert von 5,12 cm und damit eine Abweichung von 2,4 % von der wahren Bohrungsgröße. Bei der Nutzung von mehr Sendepositionen ist auch die Durchmesserbestimmung der oberen Bohrung leichter möglich. Er beträgt 5,24 cm entsprechend 4,8 % Abweichung vom wahren Wert. Die Artefakte, die sich in Bereichen ohne Störung in den vorherigen Ergebnissen zeigten, sind mit der Nutzung von mehr Sendepositionen deutlich verringert.

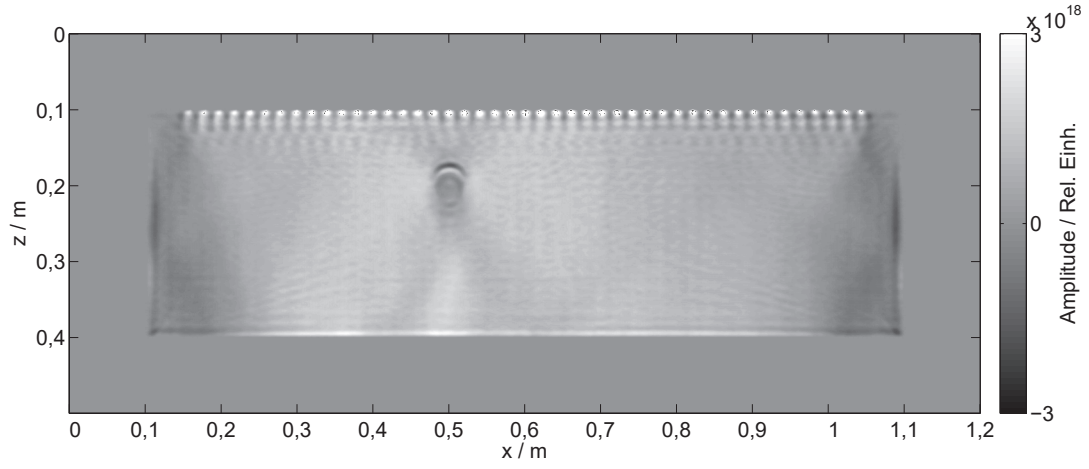


Abbildung 6.33: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung oben mit 45 Sendepositionen

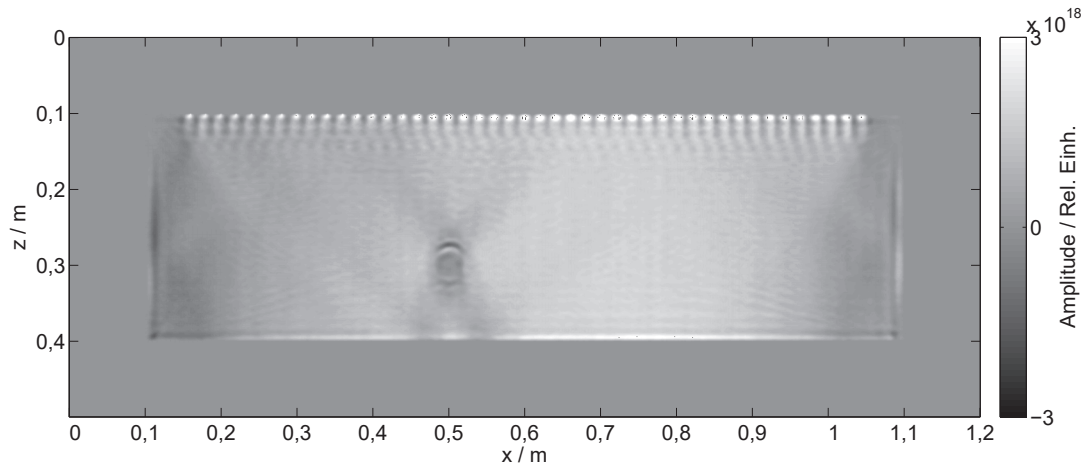


Abbildung 6.34: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung unten mit 45 Sendepositionen

6.3.4 Vergleich mit SAFT-Rekonstruktion

Zum Vergleich mit bisherigen Auswertemethoden wurde eine SAFT-Rekonstruktion eines gemessenen Datensatzes durchgeführt. Es handelt sich dabei um den senkrecht zum Profil polarisierten Scherwellendatensatz gemessen an Polyamid mit der 5 cm-Bohrung. Die Rekonstruktion wurde mit der Software Intersaft der Universität Kassel durchgeführt. Dabei wurde ebenso wie in der Reverse Time Migration eine Geschwindigkeit von 1150 m/s verwendet. Abbildung 6.35 zeigt das Ergebnis. Im Gegensatz zu den Migrationen mit der Reverse Time Migration ist die umgebende Luftschicht zur Berechnung nicht nötig und fehlt deshalb. Außerdem wurde die Einhüllende nach Hilbert gebildet, wie es nach Stand der Technik durchgeführt wird. Zu sehen ist deutlich die Rückwand mittig des Probekörpers, jedoch nicht über die gesamte Länge. Wie erwartet sind die Seitenwände des Probekörpers nicht abgebildet. Außerdem ist die Bohrung an der richtigen Position dargestellt. Aussagen über Form und Durchmesser lassen sich mit dieser Methode jedoch nicht treffen.

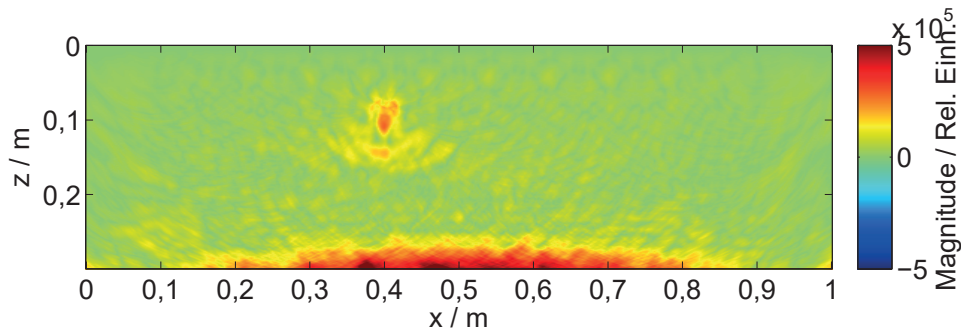


Abbildung 6.35: SAFT-Rekonstruktion der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung oben

6.3.5 Diskussion der Ergebnisse

Mit den Messungen am Polyamidprobekörper konnte die Nutzbarkeit der Reverse Time Migration für Ultraschallmessdaten in der zerstörungsfreien Prüfung nachgewiesen werden. Es wurden Bohrungen unterschiedlicher Größe (2 cm bis 5 cm) abgebildet. Es zeigte sich, dass mit steigendem Bohrungsdurchmesser auch eine bessere Abbildung des gesamten Umfangs der Bohrung erzielt werden konnte. Erst ab einem Durchmesser von 4 cm war es möglich auch die Unterseite der Bohrung abzubilden. Insbesondere bei Lage nahe zur Unterseite des Probekörpers wird die Bohrung vollständig abgebildet. Dies ist durch die Nähe von Probekörperrückwand und Unterseite der Bohrung begründet. Die Amplitude der reflektierten Welle von der Probekörperrückwand wird weniger gedämpft, bevor sie ein weiteres Mal von der Unterseite der Bohrung reflektiert wird. Dadurch ergibt sich letztendlich eine bessere Signalamplitude an den Empfängern an der Oberfläche. Aus diesem Grund ist eine Durchmesserbestimmung der Bohrungen nahe der Unterkante auch besser möglich, als wenn sich die Bohrung nahe der Oberkante befindet. Die Nutzung einer Amplitudenverstärkung erleichtert an Polyamid die Bestimmung des Durchmessers,

da durch sie schwache Reflexionen der Unterkante verstärkt werden. Die bestimmten Werte sind mit einer Abweichung von unter 5 % von der wahren Bohrungsgröße sehr gut. Die Reverse Time Migration ist also zur Größenbestimmung von Einbauten nutzbar, insofern die Geschwindigkeit des Mediums hinreichend genau bekannt ist.

Vorteil einer Messung mit vielen Sendepositionen ist die Verringerung von Artefakten. Da eine solche Messung aber auch deutlich mehr Aufwand bedeutet, muss eine Abwägung erfolgen, wie viele Sendepositionen ausreichen, um ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erhalten. Eine Durchmesserbestimmung ist für mehr Sendepositionen einfacher möglich, da sich die Reflexionskanten der Bohrung leichter erkennen lassen. Die Genauigkeit verbessert sich jedoch nicht. Sie bleibt weiterhin mit unter 5 % Abweichung sehr gut.

Gegenüber der SAFT-Rekonstruktion zeigen sich mit der Reverse Time Migration deutliche Verbesserungen in der Abbildung von Bohrungen und Seitenwänden. Mit dem SAFT-Algorithmus ist es nicht möglich die Bohrung in vollem Umfang darzustellen und ihren Durchmesser zu bestimmen.

6.4 Messung an einem Betonprobekörper mit Spannkanaal

Für eine erste Messung an Beton wurde ein vorhandener Probekörper genutzt. Dieser entstand mit weiteren ähnlichen Probekörpern im Rahmen einer Dissertation an der BAM [Schulze17]. Der Probekörper und der Messaufbau sind in den Abbildungen 6.36 und 6.37 zu sehen. Er hat die Abmessungen $0,8\text{ m} \times 0,6\text{ m} \times 0,35\text{ m}$ und einen eingebauten Spannkanaal. Dieser ist mit Mörtel verfüllt und weist an einer Seite eine geplante Fehlstelle auf, welche aber in den ersten Untersuchungen mit der Reverse Time Migration zunächst keine Rolle spielt. Der Spannkanaal hat einen Durchmesser von 8,5 cm. An diesem Probekörper wurde eine Messung mit senkrecht zum Profil polarisierten Scherwellen durchgeführt. Wie in den Kapiteln 6.1.1 und 6.3.3 gezeigt, liefert diese Messmethode die besten Migrationsergebnisse mit der Reverse Time Migration. Gemessen wurde an 19 Sendepositionen im Abstand von 4 cm, welche auch im homogenen Startmodell in Abbildung 6.39 mit Dreiecken markiert sind. Der Abstand der Empfangspositionen wurde dichter gewählt. Im Abstand von 2 cm wird an 37 Positionen empfangen. Es wurden die gleichen Prüfköpfe wie bei den vorherigen Messungen an Polyamid (Kapitel 6.3.3) verwendet. Die Frequenz des Sendesignals betrug 50 kHz und das Signal wurde 2 ms an den Empfängern aufgezeichnet. Tabelle 6.3 zeigt zusammenfassend alle Parameter, welche für die Auswertung mit der Reverse Time Migration genutzt wurden.

Vor Auswertung der Daten wurden diese wieder einem Processing unterzogen. Zunächst mussten die Daten auf $1 \cdot 10^{-7}\text{ s}$ interpoliert werden, um numerische Instabilität während der Rechnung zu vermeiden. Anschließend wurde ein Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 15 kHz angewendet und die Daten 3D/2D-korrigiert. Zum Schluss wurde die

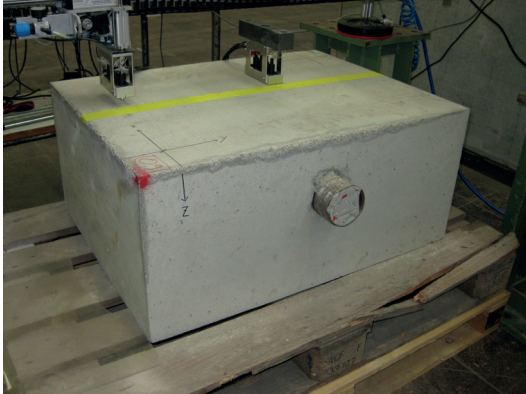


Abbildung 6.36: Betonprobekörper mit mit Mörtel gefülltem Spannkanal

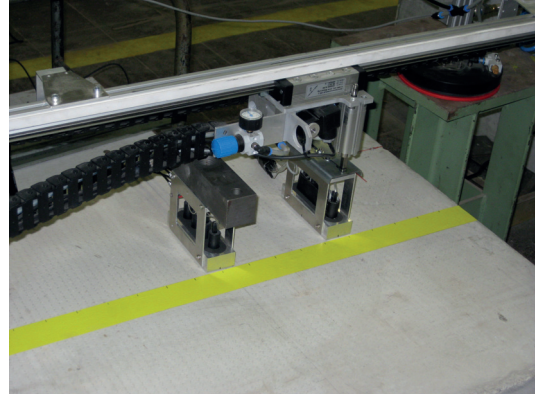


Abbildung 6.37: Scannermessung an einem Betonprobekörper

Kenngröße	Scherwelle
Beton v_s	$2700 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Beton ρ	$2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Luft v_s	$0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Luft ρ	$1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Modellgröße	2496×1375 Gitterpunkte
Gitterpunkt Abstand	$0,0004 \text{ m}$
Betonblock im Modell	$0,8 \times 0,35 \text{ m}^2$
Spannkanal x	$0,4 \text{ m}$
Spannkanal y	$0,13 \text{ m}$
Spannkanal $\emptyset$	$8,5 \text{ cm}$
Frequenz	50 kHz
Samplerate	$1 \cdot 10^{-7} \text{ s}$
Aufzeichnungszeit	$0,0012 \text{ s}$

Tabelle 6.3: Kenngrößen für die Reverse Time Migration der Messungen am Betonprobekörper mit Spannkanal

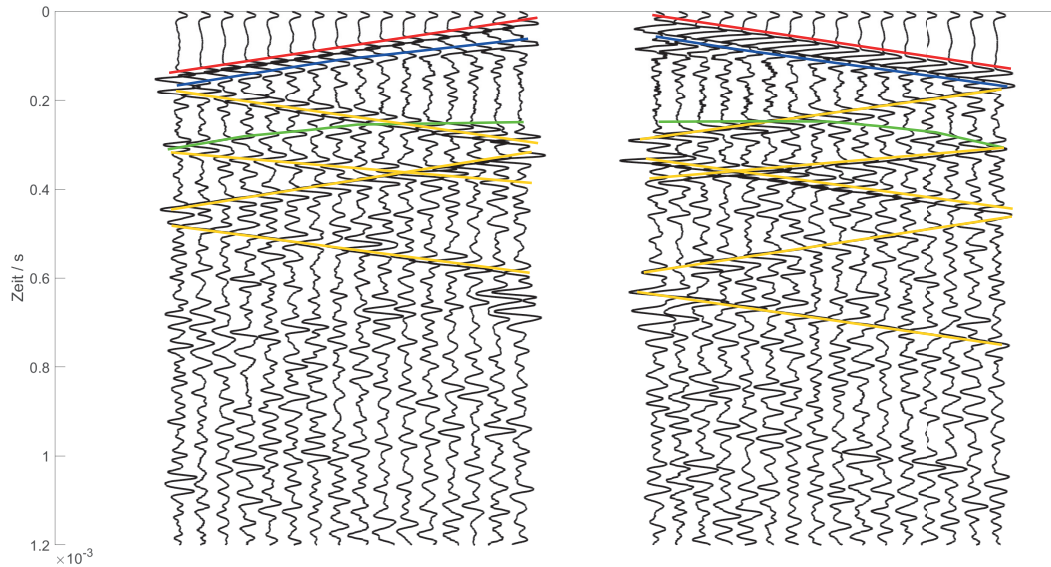


Abbildung 6.38: Datenbeispiel für Messdaten. Messung an einem Betonprobekörper mit Spannkanal mit senkrecht zum Profil polarisierten Scherwellen. Rot - direkte Welle/Oberflächenwelle, blau - Reflexion des Spannkannels, grün - Reflexionen der Unterseite des Probekörpers, gelb - Reflexionen der Seiten des Probekörpers.

Aufzeichnungszeit auf 1,2 ms gekürzt.

Abbildung 6.38 zeigt für eine Sendeposition über dem Spannkanal die zugehörigen Messdaten. Analog zu den Datenbeispielen der Messungen an Polyamid sind die Empfangspositionen direkt neben der Sendeposition nicht erreichbar und werden durch eine Lücke dargestellt. Rot markiert ist die direkte Welle bzw. Oberflächenwelle, blau die Reflexion am Spannkanal, grün die Reflexion der Unterseite des Probekörpers und gelb die Reflexionen der Seiten. Im Vergleich zur Messung an Polyamid sind die Daten erwartungsgemäß deutlich verrauschter. Die Reflexion des Spannkannels überlagert sich teils mit der Oberflächenwelle und ist nicht klar von dieser trennbar. Die Reflexion der Rückseite des Probekörpers ist nur sehr schwach. Die Seitenreflexionen führen zu starken Überlagerungen.

Als Startmodell zur Auswertung diene wieder ein homogenes Modell (Abbildung 6.39). Die mittlere Geschwindigkeit wurde aus den gemessenen Daten ermittelt, indem die Reflexion der Rückwand ausgewertet wurde. Abbildung 6.40 zeigt das Migrationsergebnis. Die Lage und Form des Spannkannels ist deutlich erkennbar. In diesem Beispiel zeigt sich jedoch auch der starke streuende Einfluss der Zuschläge im Beton. Gegenüber den Migrationsergebnissen an Polyamid ist das Ergebnis stark verrauscht. Der nach der Migration ermittelte Durchmesser weicht mit 7,5 cm um rund 12 % vom realen Durchmesser von 8,5 cm ab.

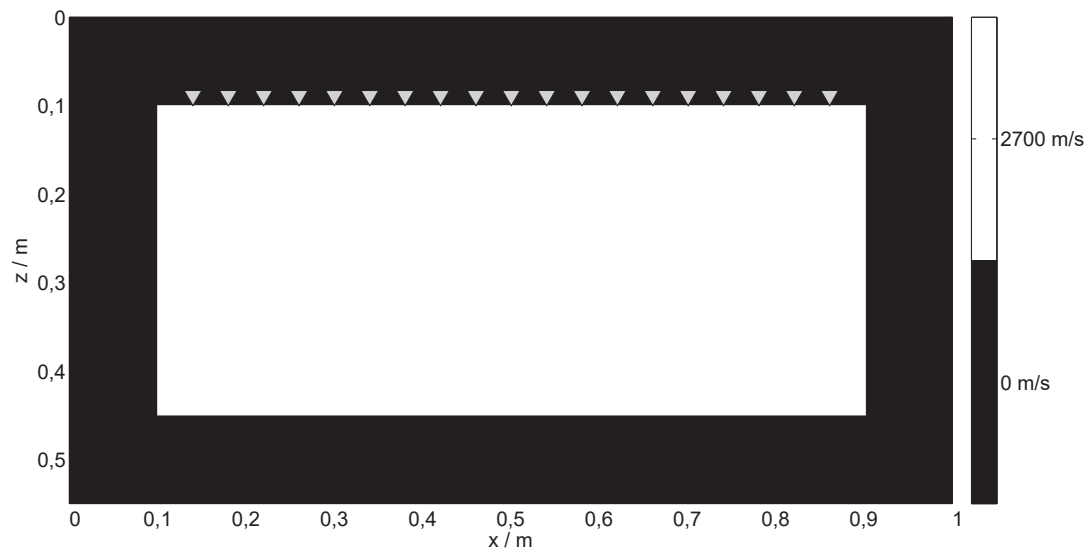


Abbildung 6.39: Homogenes Startmodell für die Migration der Ultraschallmessdaten des Betonprobekörpers mit Spannkanal

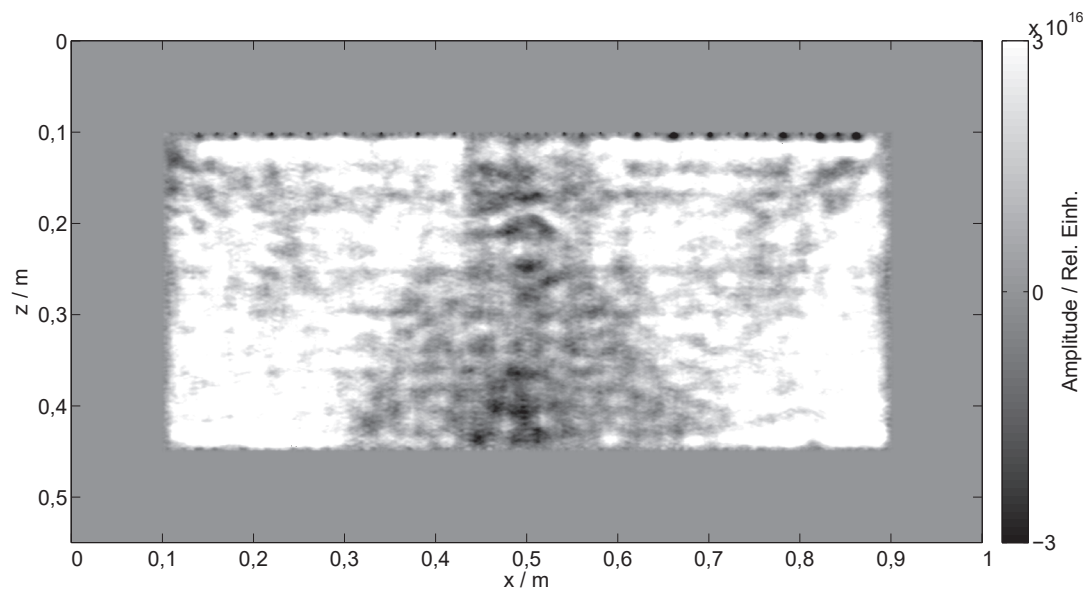


Abbildung 6.40: Migrationsergebnis an einem Betonprobekörper mit mit Mörtel gefülltem Spannkanal und Fehlstelle

7 Praxisbeispiel

In der Praxis werden Ultraschall-Echo-Messungen bisher mit etablierten Verfahren wie SAFT-Algorithmen ausgewertet. Mit diesen Algorithmen ist es nicht möglich z.B. vertikale Reflektoren oder die Unterseite von Spannkänen abzubilden. Das folgende Beispiel zeigt einen ersten Einsatz der Reverse Time Migration an einem Brückenbauwerk. Mit diesem sollte die Praxistauglichkeit des Verfahrens überprüft werden.

7.1 Messung an der Leinebrücke

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens fand ein Messeinsatz an einer Brücke über die Leine bei Schwarmstedt bei Hannover statt [Messbericht U1423914]. Dort konnte die in dieser Arbeit eingeführte Reverse Time Migration das erste Mal unter realen Bedingungen getestet werden. Die Brücke wurde 1953 im Zuge des Baus der B 214 über die Leine errichtet. Es handelt sich bei diesem Bauwerk um eine 3-feldrige Spannbetonbrücke. Diese weist Konstruktionselemente einer Plattenbalkenbrücke, Trägerrostbrücke und einer Hohlkastenbrücke auf [NLStBV10]. Die Abbildungen 7.1, 7.2 und 7.3 zeigen verschiedene Ansichten des Bauwerks.

Beim Messeinsatz wurden unter anderem großflächig Radarmessungen vorgenommen. Mittels dieser lassen sich Spannkäne und Bewehrung sehr gut lokalisieren und damit wichtige Informationen für Folgemessungen erlangen. Die Abbildungen 7.4 und 7.5 zeigen zwei Tiefenschnitte der Radarmessungen in 0,04 m und 0,08 m Tiefe. Die gemessenen Daten wurden dafür mit einem Bandpassfilter gefiltert und im Anschluss mit einer Kirchhoffmigration migriert. Zur Darstellung wurde danach eine Hilberttransformation angewendet. In Abbildung 7.4 ist die Bewehrung in Umgebung des Messprofils zu sehen, welche hauptsächlich senkrecht verläuft, in Abbildung 7.5 zwei Spannkäne, welche waagerecht verlaufen. Auf Grundlage dieser Messungen wurde für die Ultraschallmessung ein Profil festgelegt, unter dem ein Spannkänel verläuft und möglichst wenig Bewehrung vorhanden ist. Das gemessene Profil befindet sich bei $x = 1$ m und ist in den Abbildungen mit einer roten Linie markiert. Es liegt zwischen zwei Bewehrungsstäben, damit direkte Reflexionen an der Bewehrung vermieden werden. Damit wurde sichergestellt, dass in der Auswertung ein Spannkänel abgebildet werden kann. Der obere Spannkänel konnte wegen seiner Lage nahe der Oberseite der Brücke mit der Ultraschallmessung nicht abgebildet werden. Auf Grund der Scannergeometrie konnte diese Stelle nicht mit ausreichend Sende- und Empfangspositionen abgedeckt werden. Ziel der Messung war es nicht nur den Spannkänel zu detektieren, sondern ihn auch in seinem gesamten Umfang darzustellen und Aussagen über Form und Maße zu treffen. Diese Informationen ließen



Abbildung 7.1: Fahrbahn mit Rad- und Fußweg der Leinebrücke



Abbildung 7.2: Seitenansicht der Leinebrücke in Schwarmstedt



Abbildung 7.3: Plattenbalken der Leinebrücke im mittleren Spannfeld in der Ansicht von unten

sich aus den Bestandsplänen nicht sicher ermitteln. Mit Hilfe erfolgreicher Messungen lassen sich Rückschlüsse über den weiteren Verlauf der Spannkanäle im Bauwerk ziehen und Aussagen über statische Aspekte treffen.

Das Anbringen des Scanners an die Brücke in Position des gewählten Messprofils ist in Abbildung 7.6 zu sehen. Senkrecht zum Spanngliedverlauf wurde eine Multi-Offset-Messung durchgeführt, um nach Möglichkeit dessen Unterseite abzubilden und Aussagen über Form und Größe treffen zu können. Abbildung 7.7 zeigt die laufende Messung. Wie bei den Labormessungen wurde für die Messung an der Leinebrücke das in Kapitel 6.1.3 vorgestellte Scannersystem mit den in Kapitel 6.1.1 vorgestellten Scherwellenprüfköpfen (Abbildung 7.8) und dem in Kapitel 6.1.2 vorgestellten Messsystem genutzt. Zu sehen ist der senkrecht hängende Scanner an der Seitenwand des Brückenträgers. Für die Messung wurden 23 Sendepositionen und 45 Empfangspositionen genutzt. Die Frequenz betrug 50 kHz, die Aufzeichnungszeit 4 ms bei einer Samplerate von $1 \cdot 10^{-6}$ s.

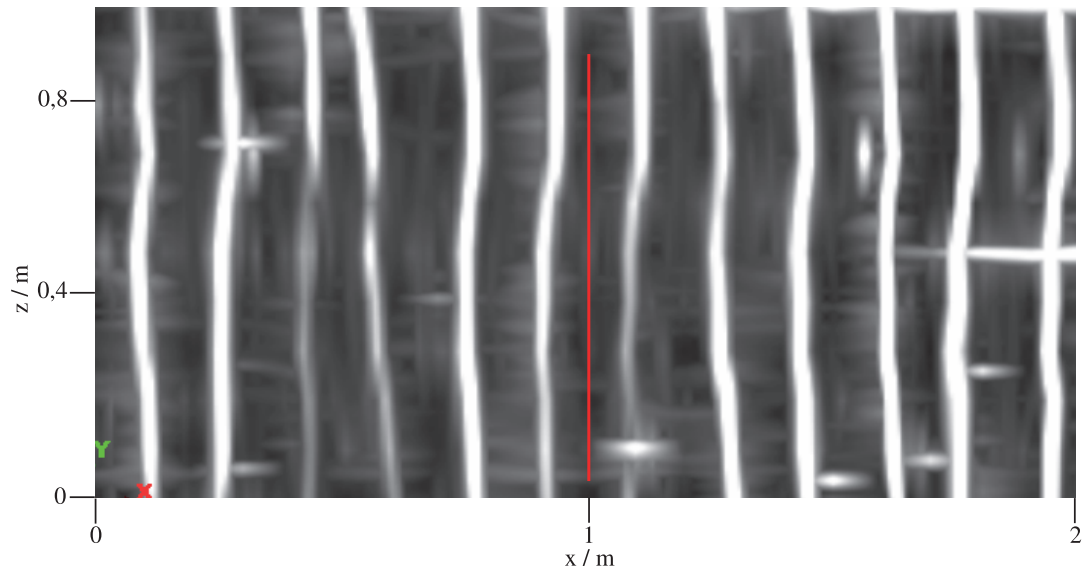


Abbildung 7.4: Migrierte Radardaten, Tiefenschnitt bei 0,04 m. Rote Linie: Ultraschall-messprofil

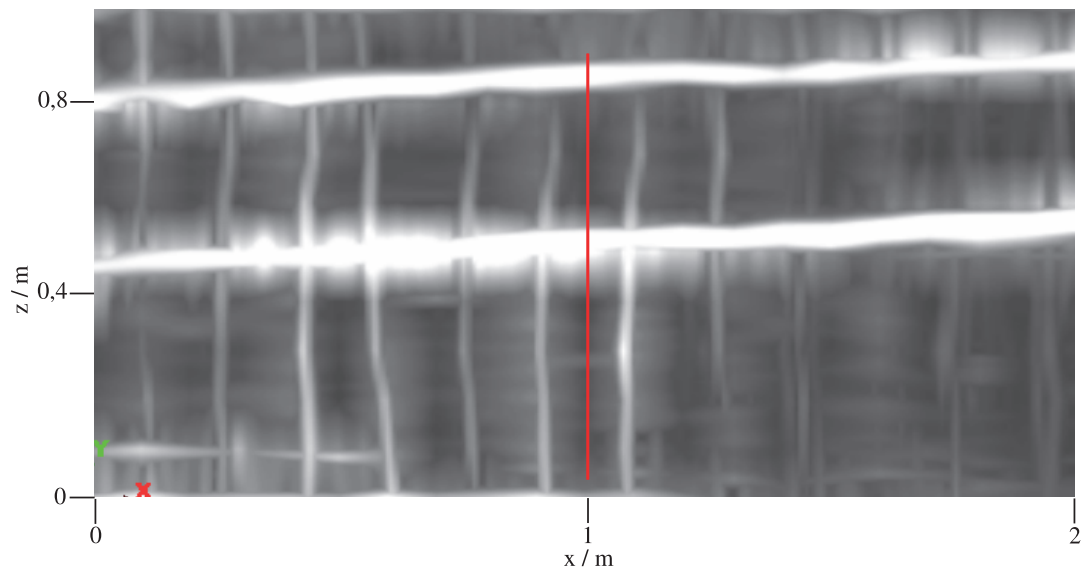


Abbildung 7.5: Migrierte Radardaten, Tiefenschnitt bei 0,08 m. Rote Linie: Ultraschall-messprofil



Abbildung 7.6: Anbringen des Scanners an die Leinebrücke



Abbildung 7.7: Ultraschall-Echo-Messung an der Leinebrücke

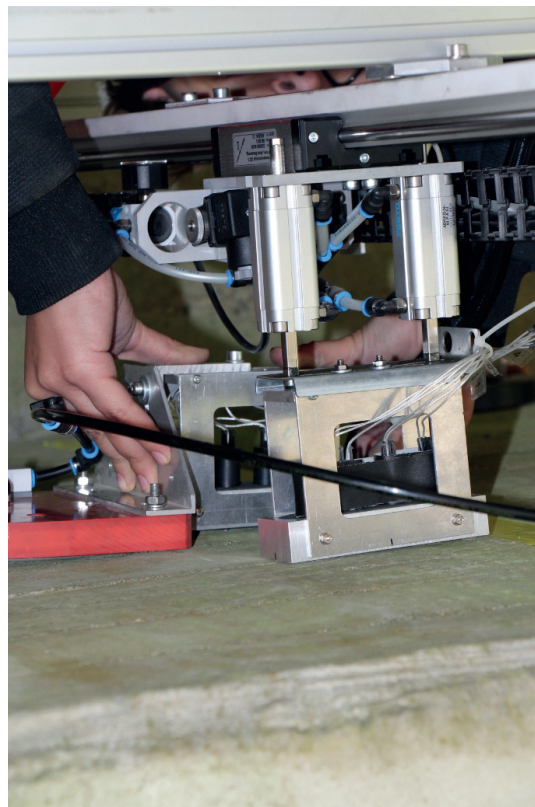


Abbildung 7.8: Detailansicht der Prüfköpfe bei der Ultraschall-Echo-Messung an der Leinebrücke

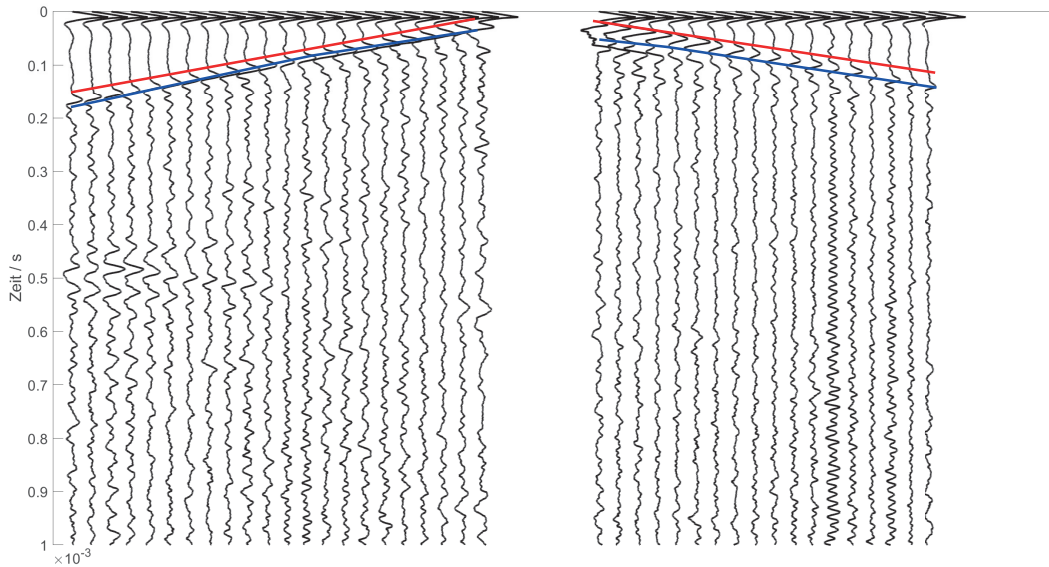


Abbildung 7.9: Datenbeispiel für Messdaten. Messung an der Leinebrücke mit senkrecht zum Profil polarisierten Scherwellen. Rot - direkte Welle/Oberflächenwelle, blau - Reflexion des Spannkkanals.

7.2 Auswertung der Messdaten der Leinebrücke

Eine Vorbearbeitung der aufgenommenen Messdaten der Leinebrücke ist unerlässlich, da die Datenqualität von Ultraschall-Messdaten an realen Bauwerken deutlich schlechter ist als an Polyamid oder Betonprobekörpern aus dem Labor. Eine unebene Oberfläche führt zu Ankopplungsproblemen der Sensoren und einer schlechteren Schallübertragung. Des Weiteren weist der Steg des Plattenträgers an dieser Stelle eine Bauteildicke von 0,6 m auf, also mehr als die bisher betrachteten Bauteile. Der vergleichsweise lange Laufweg des Signals von mindestens 1,2 m und die streuenden Effekte der Gesteinskörnung führen in der Summe zu einer starken Schallschwächung. Die Daten wurden aus numerischen Gründen wieder interpoliert, sodass sich eine Samplerate von $5 \cdot 10^{-8}$ s ergibt. Zusätzlich wurde ein Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 10 kHz angewendet und die Daten 3D/2D-korrigiert. Die Daten wurden auf eine Aufzeichnungszeit von 1 ms gekürzt, um die Rechenzeit und den Speicherbedarf für die Reverse Time Migration zu verringern. Dabei ist theoretisch neben der Reflexion der Rückwand noch eine weitere Mehrfachreflexion in den Daten enthalten.

Abbildung 7.9 zeigt für eine Sendeposition direkt über dem Spannkkanal die zugehörigen Messdaten. Die nicht erreichbaren Empfangspositionen direkt neben der Sendeposition zeigen sich durch Datenlücken. Rot markiert ist die direkte Welle bzw. Oberflächenwelle und blau die vermutete Reflexion des Spannkkanals. Diese fällt sehr schwach aus und überlagert sich mit den Oberflächenwellen. Reflexionen der Rückseite und der Seiten sind innerhalb des Rauschens nicht erkennbar.

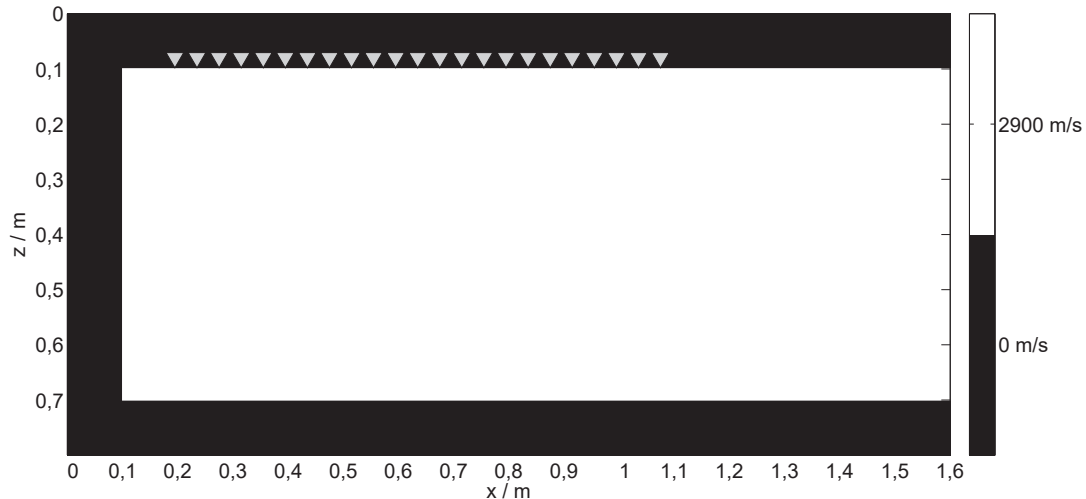


Abbildung 7.10: Homogenes Startmodell für die Migration der Ultraschallmessdaten der Leinebrücke

Abbildung 7.10 zeigt das zur Migration genutzte Geschwindigkeitsmodell mit den mit Dreiecken markierten Sendepositionen. Aus Darstellungsgründen wurde das Modell gegenüber der tatsächlichen Orientierung von Sendern und Empfängern am Bauwerk um 90° im Uhrzeigersinn gedreht. Im rechten Bereich des Modells (entsprechend zum oberen Teil der Brücke hin) wurde kein Geschwindigkeitskontrast im Modell vorgegeben. In diesem Bereich wird die Messung durch die sich dort befindliche Fahrbahnplatte eingeschränkt. Da keine Geschwindigkeiten und Reflexionshorizonte bekannt sind, wurde das Modell zu dieser Seite hin offen gelassen. Mit Hilfe der absorbierenden Randbedingung werden die Wellenfelder zur Außenkante des Modells gedämpft und es finden keine unerwünschten Reflexionen der Modellränder statt. Auch im Inneren des Modells werden keine Reflexionshorizonte vorgegeben. Das Modell ist intern homogen mit einer Geschwindigkeit von 2900 m/s und von einer Luftschicht umgeben. Die Geschwindigkeit wurde aus den Daten durch Picken der Laufzeit des Rückwandsignals und der bekannten Dicke des Trägers ermittelt.

Abbildung 7.11 zeigt das Migrationsergebnis. Deutlich erkennbar ist im unteren Bereich die Rückseite des untersuchten Brückenabschnitts. In einer Tiefe von $z = 0,08 \text{ m}$ und bei $x = 0,56 \text{ m}$ bis $x = 0,61 \text{ m}$ (Maßangaben abzüglich der umrandenden Luftschicht des Modells) ist die Oberseite des gesuchten Spannkanaals sichtbar. Er stellt sich als eine annähernd waagerechte Linie dar. Die Position ist in der Abbildung mit einem roten Pfeil markiert. Die Seiten oder die Rückseite des Spannkanaals sind jedoch nicht abgebildet. Dafür gibt es verschiedene Erklärungen. Einerseits wird das Signal durch die Zuschläge im Beton stark gestreut. Des Weiteren hat das Bauteil mit $0,6 \text{ m}$ Dicke verhältnismäßig große Ausmaße, sodass Mehrfachreflexionen über die Seitenwand bzw. Rückwand des Spannkanaals, zur Rückseite des Bauteils und wieder zurück zum Empfänger schon durch die geometrische Amplitudenabnahme relativ schwach sind. Abbildung 7.13 illus-

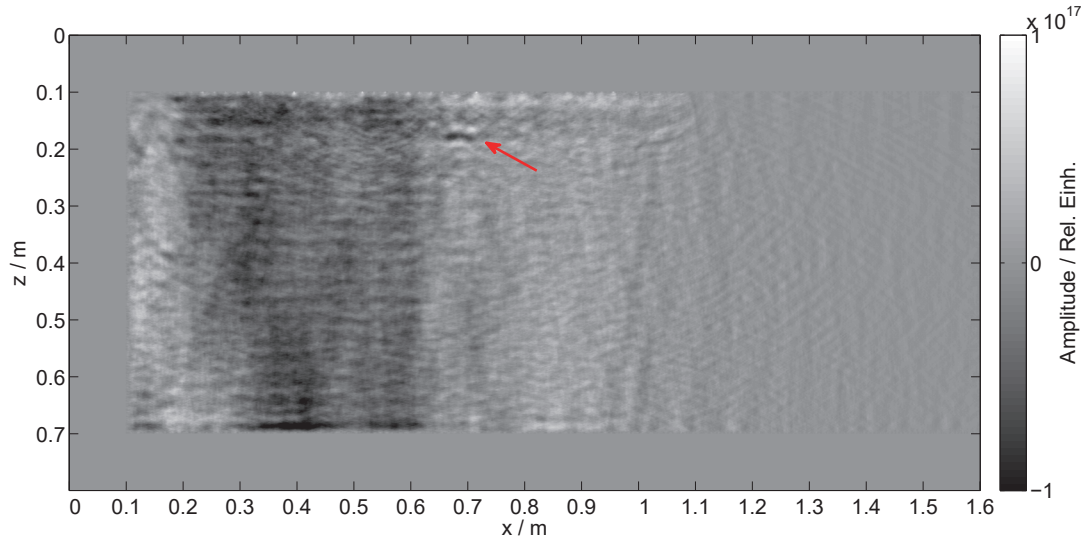


Abbildung 7.11: Migrationsergebnis für das Messprofil an der Leinebrücke. Pfeil: Lage eines rechteckigen Spannkanals

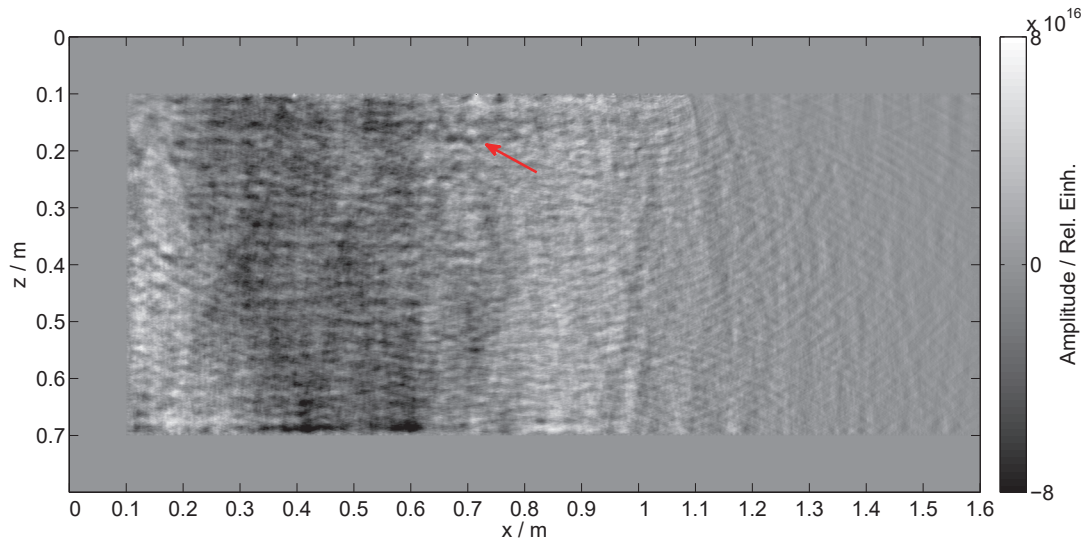


Abbildung 7.12: Migrationsergebnis für das Messprofil an der Leinebrücke mit Amplitudenverstärkung. Pfeil: Lage eines rechteckigen Spannkanals

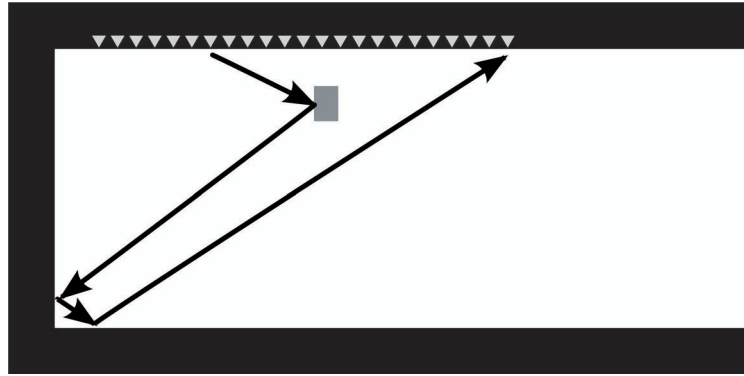


Abbildung 7.13: Skizze einer möglichen Reflexion über die Seitenwand des Spannkanals zurück zum Empfänger am Beispiel der Leinebrücke

triert beispielhaft einen solchen langen Strahlenweg. Im Bereich der Rückwand befindet sich zusätzlich noch eine Lage schlaife Bewehrung, an welcher es zu Streueffekten kommt. Abhilfe würden Prüfköpfe schaffen, welche aus mehr zusammengeschalteten Punktkontaktprüfköpfen auf einer größeren Fläche bestehen (siehe z.B. die kommerziell genutzten Prüfköpfe des A1220). Diese erfüllen aber nicht mehr die Kriterien, um sie mit einem zweidimensionalen Programmcode zu nutzen, sondern erfordern einen dreidimensionalen Code. Testweise wurde auf die Daten der Leinebrücke die in Kapitel 6.2 beschriebene Amplitudenverstärkung angewendet, um eventuelle schwache Reflexionen hervorzuheben. Abbildung 7.12 zeigt das Migrationsergebnis mit diesen Daten. Der sich in einer waagerechten Linie zeigende Spannkanal ist wieder mit einem roten Pfeil markiert. Hier ist im Vergleich zum Migrationsergebnis ohne Amplitudenverstärkung keine deutliche Verbesserung des Ergebnisses zu erreichen. Dies lässt sich damit begründen, dass auch die Signalanteile der Streuungen der Zuschläge im Beton verstärkt werden, welche dann im Migrationsergebnis größere Störungen hervorrufen.

7.3 Simulation der Messung an der Leinebrücke

Als Hilfe bei der Interpretation der Migrationsergebnisse von der Leinebrücke wurde eine Simulationsrechnung durchgeführt. Hierbei wurde exakt die Messgeometrie und der Messaufbau nachgebildet. Abbildung 7.14 zeigt das entsprechende Modell. Die Hintergrundgeschwindigkeit des Betons wurde, wie an der Brücke ermittelt, auf 2900 m/s festgelegt. An der Position, an der beim Messeinsatz ein Spannkanal durch Radar- wie auch Ultraschallmessungen detektiert wurde, befindet sich ein rechteckiges Objekt mit der Geschwindigkeit von Stahl (3200 m/s [Rose04]). Die Form des Spannkanals wurde auf Grund von Informationen aus dem Bericht der Bauteilöffnung gewählt [Messbericht U1423914]. Da der Spannkanal selbst und die sich in ihm befindlichen Litzen aus Stahl bestehen und der Anteil des Verpressmörtels im Gegensatz dazu gering ist, kann die Geschwindigkeit von Stahl als Näherung im Modell angenommen werden. Die rechteckige Anomalie ist jedoch keine wirklichkeitsgetreue Nachbildung des Spann-

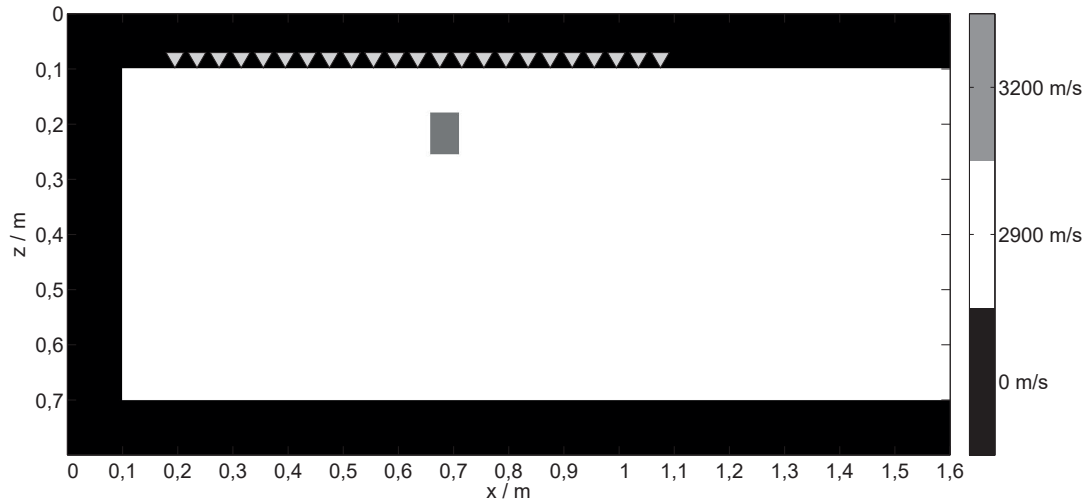


Abbildung 7.14: Modell zur Simulation der Messung an der Leinebrücke

kanals. Umgeben ist der Beton von einer Luftschicht. Zur Generierung der Simulationsdaten wurde dieselbe Sender-Empfänger-Konfiguration und Signalfrequenz verwendet, welche auch bei der Messung zum Einsatz kam. Ebenso wurden Aufzeichnungszeit und Samplerate wie bei der Migration der Messdaten gewählt. Damit ist die Vergleichbarkeit von Simulation und Messung gegeben.

Abbildung 7.15 zeigt die simulierten Daten für die gleiche Sendeposition wie in Abbildung 7.9 für die Messdaten. Blau markiert ist die Reflexion am Spannkanal und ebenso die Reflexion der Unterseite des Spannkanals, grün die Reflexion an der Unterseite des Modells und deren Multiple, gelb die Reflexionen der Seite. Im Gegensatz zu den Messdaten an der Brücke sind Reflexionen der Unterseite und der Seiten klar erkennbar. Dies ist darauf zurück zu führen, dass die Simulation in einem homogenen Modell durchgeführt wurde. Der Beton der Brücke hingegen ist stark inhomogen und dämpfend. Deshalb ist ein Vergleich von Simulation und Messung auch nur eingeschränkt möglich.

Zur Migration der simulierten Daten wurde wie für die Migration der Messdaten das homogene Startmodell aus Abbildung 7.10 verwendet. Abbildung 7.16 zeigt das zugehörige Migrationsergebnis. Der rechteckige Spannkanal ist in vollem Umfang abgebildet. Auch die rechte Seite des Spannkanals ist deutlich sichtbar, obwohl das Modell zum rechten Rand hin offen ist und keine Reflexionen über diese Seitenwände stattfinden können. Die Reflexionen dazu stammen also von den anderen Grenzen der Stahlanomalie. Diese Reflexionen sind in den realen Messdaten nicht vorhanden, da der Spannkanal nicht komplett aus Stahl besteht, sondern aus vielen einzelnen Stahllitzen, welche mit Mörtel verpresst sind. An diesen wird das Signal gestreut. Zusammen mit den Streuungen an den Zuschlägen im Beton ergibt sich so ein verrauschtes Signal. Die linke Seite des Spannkanals ist mit höherer Amplitude abgebildet. Dies deutet darauf hin, dass auch Reflexionen der Seitenwand und Unterkante des Betons zum Migrationsergebnis beitragen. Auf Grund der gewählten Farbskala ist das Migrationsergebnis im Bereich

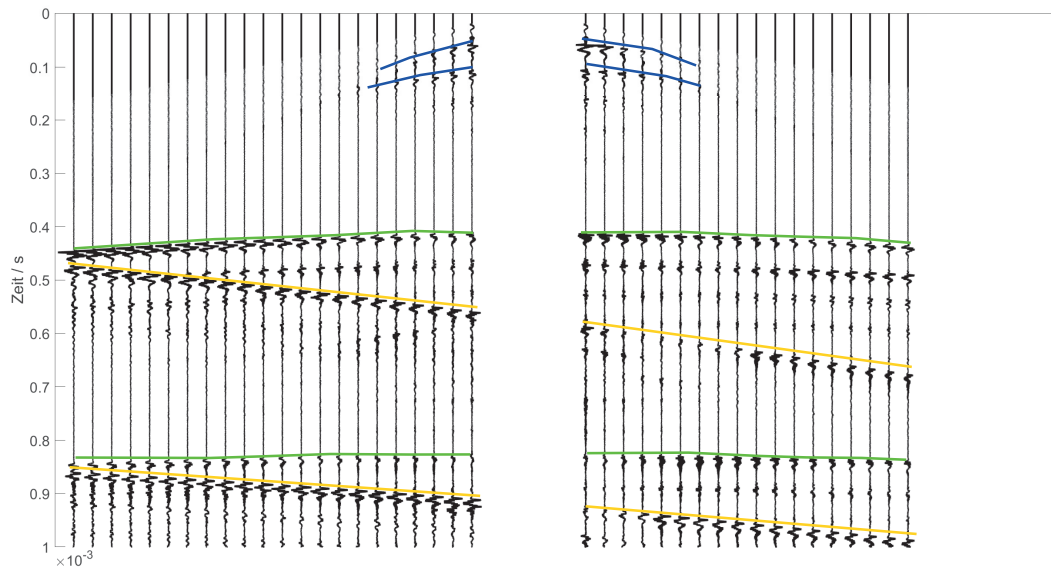


Abbildung 7.15: Datenbeispiel für Simulationsdaten zum Vergleich mit der Messung an der Leinebrücke. Blau - Reflexion des Spannkanals, grün - Reflexionen der Unterseite des Modells, gelb - Reflexionen der Seiten des Modells.

der Sende- und Empfangspositionen stark übersteuert.

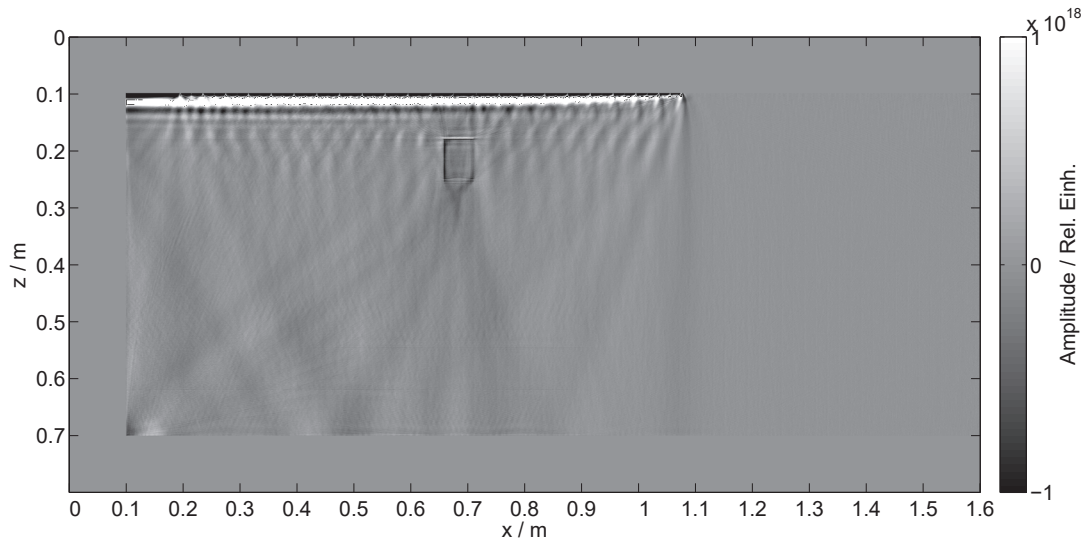


Abbildung 7.16: Migrationsergebnis der Simulationsdaten der Leinebrücke mit Nutzung des homogenen Startmodells aus Abbildung 7.10

7.4 Diskussion der Ergebnisse und Vergleich mit den Simulationsergebnissen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens, für das die Brücke untersucht wurde, fand eine Bauteilöffnung statt. Bei dieser wurden an einigen Stellen die Spannkanaäle freigelegt. Abbildung 7.17 zeigt einen solchen freigelegten Abschnitt, der jedoch nicht an der Messposition liegt. Es kann aber angenommen werden, dass die in der Brücke verbauten Spannkanaäle alle gleicher Ausführungsart sind. Bei der Bauteilöffnung zeigte sich, dass in dieser Brücke eckige Spannkanaäle verbaut wurden. In den Bestandsplänen gibt es keine genaueren Informationen zu den Spanngliedern, lediglich eine skizzenhafte rechteckige Darstellung in einem Querschnitt (Abbildung 7.18). In der Abbildung ist zusätzlich noch einmal das Messprofil eingetragen.

Die waagerechte Signatur im Migrationsergebnis der Messdaten stimmt mit der vermuteten Lage der Oberkante des eckigen Spannkanaals überein. Auch die für das Spannkanaalsystem typische horizontale Ausdehnung von $x = 5,2$ cm stimmt gut mit dem Migrationsergebnis ($x = 5$ cm) überein. Die aus der Migration ermittelte Betonüberdeckung betrug $z = 8$ cm. Da der erfasste Spannkanal nicht freigelegt wurde, kann hier nur ein Vergleichswert an anderer Stelle freigelegter Spannkanaäle angegeben werden. Diese befanden sich in 7 cm bis 9 cm Tiefe, also zum Migrationsergebnis sehr gut passend. Auch die Radarmessung bestätigt diese Tiefe. Die Maße der Spannkanaäle und Betonüberdeckungen sind dem Untersuchungsbericht der Bauteilöffnung entnommen [Messbericht U1423914]. Die im Plan aus Abbildung 7.18 eingezeichneten tieferen Lagen von Spannkanaälen konnten weder mit Radar noch Ultraschall und der Reverse Time Migration detektiert werden. Für die Radarmessung könnte dies dadurch begründet sein, dass die Spannkanaäle direkt



Abbildung 7.17: Freigelegter rechteckiger Spannkanal der Leinebrücke

hintereinander liegen und die unteren Lagen damit durch die erste Lage abgeschattet werden. Die Ultraschallmessung für die Reverse Time Migration wurde jedoch mit variablem Offset durchgeführt. Damit tritt der Abschattungseffekt wie bei der Radarmessung nicht auf. Jedoch können hier die langen Laufwege der Signale ein Grund sein, dass die Amplituden der Reflexionen an den tiefer liegenden Spannkanälen nicht hoch genug sind. Diese Erklärungen sind jedoch spekulativ. Es kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob der mittlere Spannkanal wirklich in der Brücke verbaut wurde.

Das mit Hilfe der Informationen aus der Messung und Plänen erstellte Simulationsmodell zeigte, dass die Parameter wie Aufzeichnungszeit und Messanordnung sich prinzipiell dazu eignen einen eckigen Spannkanal abzubilden. Dass der Spannkanal mit der Messung an der Brücke nicht in vollem Umfang abgebildet werden konnte, ist also auf andere Faktoren zurückzuführen. Hier ist der stark streuende Einfluss der Zuschläge im Beton zu nennen, welcher in der Simulation keine Berücksichtigung fand. Durch diese Streuung und Dämpfung sind die Signalamplituden an den Empfängern geschwächt und insbesondere die der Mehrfachreflexionen teilweise gar nicht mehr messbar. Abhilfe würden hier möglicherweise andere Prüfköpfe bzw. eine andere Messapparatur schaffen und daraus resultierend auch ein angepasster Programmcode. Dies erfordert jedoch weitere Versuchsreihen und eine Weiterentwicklung der vorhandenen Apparaturen und findet deshalb in dieser Arbeit keine Berücksichtigung.

Mit dem Messeinsatz konnte gezeigt werden, dass die Reverse Time Migration auch in der Praxis nutzbar ist. Weitere Arbeiten sind jedoch unerlässlich, um einen praktisch nutzbaren Fortschritt gegenüber bisher genutzten Verfahren zu erzielen. Mit SAFT-Algorithmen ist es bisher nur möglich die Oberseite eines Spannkanals abzubilden, nicht aber die Form. Ein großer Fortschritt der Reverse Time Migration ist die Abbildung des Spannkanals in vollem Umfang im Labor. Dieser Abbildungsfortschritt muss nun noch von der Simulation und der Labormessung in die Praxis übertragen werden.

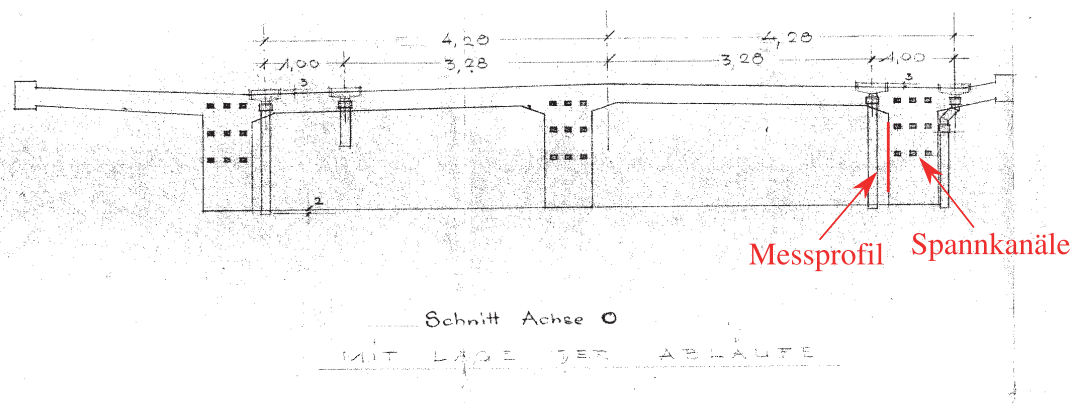


Abbildung 7.18: Ausschnitt aus dem Bestandsplan der Leinebrücke mit rot markiertem Messprofil (nach [NLStBV10])

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit behandelt als eine der ersten die Anwendbarkeit der Reverse Time Migration auf Ultraschall-Echo-Messungen in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen. Dabei wurde gezeigt, dass das Verfahren sich dazu eignet, Ultraschall-Messdaten an Polyamid und Beton auszuwerten.

Simulationen belegten die Möglichkeit, Bohrungen in einem Probekörper in vollem Umfang darzustellen. Außerdem wurde gezeigt, dass auch senkrechte Kanten abgebildet werden können. Mit dem bisher genutzten SAFT-Verfahren ist dies nicht möglich. Es ist jedoch erforderlich die Schallgeschwindigkeit der Wellen im Messobjekt möglichst genau zu kennen oder aus der Probekörpergeometrie und den Messdaten bestimmen zu können. Nur dann können Bohrungen bzw. andere Einbauten in der richtigen Tiefe und Größe abgebildet werden. Mittels Parameterstudien wurden Aufzeichnungszeit sowie Send- und Empfangspositionen auf das vorliegende Prüfproblem angepasst. Dies ist nötig, da die Reverse Time Migration einen hohen Speicherbedarf hat. Mit günstiger Wahl der Parameter kann dieser verringert werden. Zukünftig muss hier jedoch noch eine Verallgemeinerung stattfinden. Die hier ausgewählte Anzahl an Sendern und Empfängern, sowie die genutzte Aufzeichnungszeit kann nicht ohne weiteres auf andere Prüfprobleme angewendet werden.

Es wurden Ultraschallprüfköpfe identifiziert und weiterentwickelt, deren Messdaten sich mit dem vorhandenen Programmcode für die Reverse Time Migration auswerten lassen. Mittels Vermessung der Richtcharakteristik dieser Prüfköpfe wurde nachgewiesen, dass sie sich bei Aussendung von SH-Wellen analog zur Wellenfeldsimulation des Programmcodes verhalten. Des Weiteren wurde ein Scanner entwickelt, mit welchem sich die nötigen Messungen präzise und schneller als händisch durchführen lassen. Außerdem wurde ein passendes Datenprocessing erarbeitet, um die erzeugten Messdaten mit der Reverse Time Migration auswerten zu können.

Für Testmessungen wurde eigens ein Polyamidprobekörper gegossen, an dem sich rauscharme Messdaten erzeugen lassen. Anhand dieser Messungen konnte die Nutzbarkeit der Reverse Time Migration auch mit Messdaten nachgewiesen werden. Es war möglich mit senkrecht zum Messprofil polarisierten Scherwellen eine eingebrachte Bohrung in vollem Umfang darzustellen. Die Größenbestimmung war ab 4 cm Durchmesser möglich. Die Abweichung zum wahren Durchmesser betrug dann weniger als 5 %. Es zeigte sich jedoch, dass die Darstellung wie auch Größenbestimmung einer Bohrung auch von ihrer Position innerhalb des Probekörpers abhängig ist. Ein günstige Lage relativ zu den Grenzflächen verbessert die Abbildung signifikant. Befindet sich die Bohrung im Speziellen nahe einer

Grenzfläche, wird die Welle auf dem Weg zwischen Grenzfläche und Reflexion an der Bohrung weniger gedämpft und gestreut. Somit kann mehr Energie reflektiert werden und die spätere Kreuzkorrelation zeigt eine höhere Amplitude. Mit den Messungen an Polyamid konnten auch die Vorteile gegenüber dem bisherigen Auswerteverfahren SAFT hervorgehoben werden.

Eine Labormessung an Beton zeigte auf Grund des inhomogenen Materials die Schwierigkeiten bei der Darstellung eines Spannkanaals auf. Die Daten sind hier verrauschter als an Polyamid. Eine Größenbestimmung des Spannkanaals war trotzdem noch möglich. Mittels verbesserter Messtechnik und verbessertem Datenprozessing sind zukünftig jedoch sicher noch klare Fortschritte möglich.

Die zuletzt durchgeführte Messung an einer Brücke demonstrierte den Einsatz der Reverse Time Migration in der Praxis. Trotz verschiedener störender Einflüsse wie der großen Bauteildicke, schlechter Zugänglichkeit, Bewehrung und deutlich verrauschter Daten konnte zumindest die Oberkante eines Spannkanaals dargestellt werden. Des Weiteren stellte dieser sich als gerade Linie im Migrationsergebnis dar. Nach Bauteilöffnung zeigte sich, dass die verbauten Spannkanaäle rechteckig sind. Dies ist als klarer Erfolg für die Reverse Time Migration zu werten.

In der Praxis sind jedoch noch weitere Forschungsarbeiten nötig, auch wenn die vorliegenden Ergebnisse bereits vielversprechend sind. Die stark streuenden Eigenschaften von Beton machen bei steigender Bauteildicke ein genaues Detektieren von Einbauten mit den in der vorliegenden Arbeit genutzten Messgeräten nicht möglich. Hierbei sollte auch eine Erweiterung auf eine 3D-Auswertung und/oder den elastischen Fall in Betracht gezogen werden. Erste Arbeiten werden dazu bereits in einer weiteren laufenden Dissertation durchgeführt [Grohmann17].

Literaturverzeichnis

- [Asadollahi18] Asadollahi, A. und Khazanovich, L. Analytical reverse time migration: An innovation in imaging of infrastructures using ultrasonic shear waves. *Ultrasonics*, 88, 2018.
- [Asadollahi19] Asadollahi, A. und Khazanovich, L. Analytical Reverse Time Migration with New Imaging Conditions for One-Sided Nondestructive Evaluation of Concrete Elements Using Shear Waves. *Ultrasonics*, 99, 2019.
- [Baumann-Wilke09] Baumann-Wilke, M. *Amplitudenbewahrende akustische Reverse-Time Migration: Theorie und numerische Anwendung*. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 2009.
- [Baysal83] Baysal, E., Kosloff, D.D., und Sherwood, W.C. Reverse time migration. *Geophysics*, 48(11):1514–1524, 1983.
- [Beniwal15] Beniwal, S. und Ganguli, A. Defect Detection around Rebars in Concrete using Focused Ultrasound and Reverse Time Migration. *Ultrasonics*, 62:112–125, 2015. doi:10.1016/j.ultras.2015.05.008.
- [Bérenger94] Bérenger, J.P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 114(1):185–200, 1994.
- [Buur08] Buur, J. und Kühnel, T. Salt interpretation enabled by reverse-time migration. *Geophysics*, 73(5):VE211–VE216, 2008.
- [Chattopadhyay08] Chattopadhyay, S. und Mcmechan, G. Imaging conditions for prestack reverse-time migration. *Geophysics*, 73:S81–S89, 2008.
- [Choi16] Choi, H., Bittner, J., und Popovics, J.S. Comparison of Ultrasonic Imaging Techniques for Full-Scale Reinforced Concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2592:126–135, 2016. doi:10.3141/2592-14.

- [Crase90] Crase, E., Pica, A., Noble, M., McDonald, J., und Tarantola, A. Robust elastic nonlinear waveform inversion: Application to real data. *Geophysics*, 55(5):527–538, 1990. doi:10.1190/1.1442864.
- [DIN10] DIN. DIN EN 1330-4:2010 Zerstörungsfreie Prüfung - Terminologie - Teil 4: Begriffe der Ultraschallprüfung, 2010.
- [Grohmann17] Grohmann, M., Müller, S., Niederleithinger, E., und Sieber, S. Reverse time migration: introducing a new imaging technique for ultrasonic measurements in civil engineering. *Near Surface Geophysics*, 15(3):242–258, 2017.
- [Hertweck01] Hertweck, T., Hubral, P., Adler, F., Tygel, M., Shapiro, S., und Schleicher, J. Vorlesungsskript - Mathematische Grundlagen der Geophysik, 2001.
- [Johnson10] Johnson, S. Notes on perfectly matched layers (PMLs), 2010.
- [Kosloff83] Kosloff, D.D. und Baysal, E. Migration with the full acoustic wave equation. *Geophysics*, 48(6):677–687, 1983.
- [Krause04] Krause, M. Ultraschallechoverfahren an Betonbauteilen. In *Bauphysikkalender 2004*, Kap. 2.4, S. 341–352. 2004.
- [Krause09] Krause, M., Mayer, K., Friese, M., Milmann, B., Mielentz, F., und Ballier, G. Progress in ultrasonic tendon duct imaging. In *NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes*. 2009.
- [Krautkraemer86] Krautkraemer, J. und Krautkraemer, H. *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. 1986.
- [Kurzmann12] Kurzmann, A. *Applications of 2D and 3D full waveform tomography in acoustic and viscoacoustic complex media*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2012.
- [Langenberg10] Langenberg, K.J., Marklein, R., und Mayer, K. *Theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Materialprüfung mit Ultraschall*. 2010.
- [Loewenthal83] Loewenthal, D. und Mufti, I.R. Reversed time migration in spatial frequency domain. *Geophysics*, 48(5):627–635, 1983.
- [Maack12] Maack, S. *Untersuchungen zum Schallfeld niederfrequenter Ultraschallprüfköpfe für die Anwendung im Bauwesen*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2012.

- [McMechan83] McMechan, G.A. Migration By Extrapolation of Time-Dependent Boundary Values. *Geophysical Prospecting*, 31(3):413–420, 1983.
- [Messbericht U1423914] Messbericht U14239. Untersuchungsbericht Plattenbalkenbrücke BW4956, Schwarmstedt (unveröffentlicht), 2014.
- [Mora89] Mora, P. Inversion = migration + tomography. *Geophysics*, 54(12):1575–1586, 1989.
- [Müller10] Müller, S. Anwendung der Reverse-Time Migration auf Ultraschall-Echo-Prüfungen von Betonbauteilen, 2010.
- [Niederleithinger14] Niederleithinger, E. Neue Ideen für die zerstörungsfreie Prüfung von Beton: Seismische Interferometrie und mehr. In *DGZfP-Jahrestagung, Potsdam*. 2014.
- [NLStBV10] NLStBV. Bauwerksbuch des Teilbauwerks 3323507 0 (4956), 2010.
- [Rose04] Rose, J.L. *Ultrasonic Waves in Solid Media*. 2004.
- [Schickert03] Schickert, M., Krause, M., und Müller, W. Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 15(3):235–246, 2003.
- [Schulze17] Schulze, S. *Untersuchung von Spannbetonkonstruktionen mit bildgebenden Ultraschallecho-Verfahren*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2017.
- [Shevaldykin03] Shevaldykin, V.G., Samokrutov, A.A., und Kozlov, V.N. Ultrasonic Low-Frequency Short-Pulse Transducers with Dry Point Contact. Development and Application. In *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. 2003.
- [The MathWorks, Inc.11] The MathWorks, Inc. *MATLAB Product Help*, 2011.
- [Yilmaz01] Yilmaz, O. *Seismic data analysis*. 2001.
- [Zimmer08] Zimmer, A. *Abbildende zerstörungsfreie Prüfverfahren mit elastischen und elektromagnetischen Wellen*. Dissertation, Universität Kassel, 2008.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung der Reflexion, Brechung und Modenkonversion bei verschiedenen einfallenden Wellenarten	10
2.2	Punktkontaktprüfkopf der Firma ACSYS	12
2.3	Arrayprüfkopf des kommerziell erhältlichen Gerätes A1220 der Firma ACSYS	12
2.4	A1040 MIRA der Firma ACSYS in der Draufsicht mit im Display dargestelltem SAFT-Ergebnis	13
2.5	Seitenansicht der im A1040 MIRA eingebauten Prüfköpfe der Firma ACSYS	13
3.1	Datenaufnahme für die Reverse Time Migration	19
3.2	Funktionsweise der Reverse Time Migration	19
5.1	Modell „Polyamidblock mit Bohrung“ für die Simulation	25
5.2	Modell „Polyamidblock mit Stufe“ für die Simulation	26
5.3	Homogenes Startmodell zur Migration der aus den Modellen in Abbildung 5.1 und 5.2 generierten Daten	26
5.4	Datenbeispiel für Simulationsdaten an Polyamid mit Bohrung. Blau - Reflexion der Bohrung, grün - Reflexionen der Unterseite des Probekörpers, gelb - Reflexionen der Seiten des Probekörpers.	27
5.5	Migrationsergebnis für das Modell mit Bohrung bei einer Aufzeichnungszeit von 0,0006 s und je 12 Sendern und Empfängern im Abstand von 0,08 m	28
5.6	Migrationsergebnis für das Modell mit Stufe bei einer Aufzeichnungszeit von 0,0006 s und je 12 Sendern und Empfängern im Abstand von 0,08 m .	28
5.7	Abbildung der Bohrung bei unterschiedlich langer Aufzeichnungszeit . . .	30
5.8	Abbildung der Stufe bei unterschiedlich langer Aufzeichnungszeit	30
5.9	Abbildung der Bohrung bei verschiedenen Empfängerabständen	31
5.10	Abbildung der Stufe bei verschiedenen Empfängerabständen	32
5.11	Abbildung der Bohrung bei variierendem Senderabstand	33
5.12	Abbildung der Stufe bei variierendem Senderabstand	33
5.13	Abbildung der Bohrung mit variierenden Radien	34
6.1	Ultraschallprüfkopf bestehend aus vier Punktkontaktprüfköpfen	37
6.2	Technische Zeichnung des verwendeten Ultraschallprüfkopfes	37
6.3	Richtcharakteristik der genutzten Prüfköpfe bei Aussendung von Longitudinalwellen	38
6.4	Richtcharakteristik der genutzten Prüfköpfe bei Aussendung von Scherwellen	38

6.5	Messaufbau für die Ultraschallmessungen	38
6.6	Scanner mit Messapparatur	39
6.7	Detailaufnahme der Prüfköpfe während einer Messung	39
6.8	Polyamidblock nach Guss	42
6.9	Einbringen der Bohrung in den Probekörper	42
6.10	Scanner mit Polyamidprobekörper	43
6.11	Amplitudenspektren einer einzelnen Spur vor und nach der Bearbeitung mit einem Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 15 kHz	45
6.12	Vergleich der originalen interpolierten Spur (schwarz) und der Spur nach Filterung und 3D/2D-Korrektur (rot)	45
6.13	Datenbeispiel für Messdaten. Messung an einem Polyamidprobekörper mit 50 mm-Bohrung mit Longitudinalwellen. Rot - direkte Welle/Oberflächenwelle, blau - Reflexion der Bohrung, grün - Reflexionen der Unterseite des Probekörpers, gelb - Reflexionen der Seiten des Probekörpers.	47
6.14	Datenbeispiel für Messdaten. Messung an einem Polyamidprobekörper mit 50 mm-Bohrung mit senkrecht zum Profil polarisierten Scherwellen. Rot - direkte Welle/Oberflächenwelle, blau - Reflexion der Bohrung, grün - Reflexionen der Unterseite des Probekörpers, gelb - Reflexionen der Seiten des Probekörpers.	47
6.15	Datenbeispiel für Messdaten. Messung an einem Polyamidprobekörper mit 50 mm-Bohrung mit parallel zum Profil polarisierten Scherwellen. Rot - direkte Welle/Oberflächenwelle, blau - Reflexion der Bohrung, grün - Reflexionen der Unterseite des Probekörpers, gelb - Reflexionen der Seiten des Probekörpers.	48
6.16	Homogenes Startmodell für die Reverse Time Migration der Longitudinalwellendaten	49
6.17	Homogenes Startmodell für die Reverse Time Migration der Scherwellendaten	49
6.18	Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung ohne Bohrung	51
6.19	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert ohne Bohrung	51
6.20	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert ohne Bohrung	51
6.21	Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 2 cm-Bohrung oben	53
6.22	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 2 cm-Bohrung oben	53
6.23	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 2 cm-Bohrung oben	54
6.24	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 2 cm-Bohrung unten	54
6.25	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 3 cm-Bohrung oben	56
6.26	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 3 cm-Bohrung unten	56

6.27	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 4 cm-Bohrung oben	58
6.28	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 4 cm-Bohrung unten	58
6.29	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung oben	60
6.30	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung unten	60
6.31	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung oben und AGC	62
6.32	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung unten und AGC	62
6.33	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung oben mit 45 Sendepositionen	64
6.34	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung unten mit 45 Sendepositionen	64
6.35	SAFT-Rekonstruktion der Scherwellenmessung senkrecht zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung oben	65
6.36	Betonprobekörper mit mit Mörtel gefülltem Spannkanal	67
6.37	Scannermessung an einem Betonprobekörper	67
6.38	Datenbeispiel für Messdaten. Messung an einem Betonprobekörper mit Spannkanal mit senkrecht zum Profil polarisierten Scherwellen. Rot - direkte Welle/Oberflächenwelle, blau - Reflexion des Spannkanales, grün - Reflexionen der Unterseite des Probekörpers, gelb - Reflexionen der Seiten des Probekörpers.	68
6.39	Homogenes Startmodell für die Migration der Ultraschallmessdaten des Betonprobekörpers mit Spannkanal	69
6.40	Migrationsergebnis an einem Betonprobekörper mit mit Mörtel gefülltem Spannkanal und Fehlstelle	69
7.1	Fahrbahn mit Rad- und Fußweg der Leinebrücke	71
7.2	Seitenansicht der Leinebrücke in Schwarmstedt	71
7.3	Plattenbalken der Leinebrücke im mittleren Spannfeld in der Ansicht von unten	71
7.4	Migrierte Radardaten, Tiefenschnitt bei 0,04 m. Rote Linie: Ultraschallmessprofil	72
7.5	Migrierte Radardaten, Tiefenschnitt bei 0,08 m. Rote Linie: Ultraschallmessprofil	72
7.6	Anbringen des Scanners an die Leinebrücke	73
7.7	Ultraschall-Echo-Messung an der Leinebrücke	73
7.8	Detailansicht der Prüfköpfe bei der Ultraschall-Echo-Messung an der Leinebrücke	73

Abbildungsverzeichnis

7.9	Datenbeispiel für Messdaten. Messung an der Leinebrücke mit senkrecht zum Profil polarisierten Scherwellen. Rot - direkte Welle/Oberflächenwelle, blau - Reflexion des Spannkanaals.	74
7.10	Homogenes Startmodell für die Migration der Ultraschallmessdaten der Leinebrücke	75
7.11	Migrationsergebnis für das Messprofil an der Leinebrücke. Pfeil: Lage eines rechteckigen Spannkanaals	76
7.12	Migrationsergebnis für das Messprofil an der Leinebrücke mit Amplitudenverstärkung. Pfeil: Lage eines rechteckigen Spannkanaals	76
7.13	Skizze einer möglichen Reflexion über die Seitenwand des Spannkanaals zurück zum Empfänger am Beispiel der Leinebrücke	77
7.14	Modell zur Simulation der Messung an der Leinebrücke	78
7.15	Datenbeispiel für Simulationsdaten zum Vergleich mit der Messung an der Leinebrücke. Blau - Reflexion des Spannkanaals, grün - Reflexionen der Unterseite des Modells, gelb - Reflexionen der Seiten des Modells. . .	79
7.16	Migrationsergebnis der Simulationsdaten der Leinebrücke mit Nutzung des homogenen Startmodells aus Abbildung 7.10	80
7.17	Freigelegter rechteckiger Spannkanal der Leinebrücke	81
7.18	Ausschnitt aus dem Bestandsplan der Leinebrücke mit rot markiertem Messprofil (nach [NLStBV10])	82
A.1	Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 2 cm-Bohrung unten	96
A.2	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 2 cm-Bohrung unten	96
A.3	Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 3 cm-Bohrung oben	97
A.4	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 3 cm-Bohrung oben	97
A.5	Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 3 cm-Bohrung unten	98
A.6	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 3 cm-Bohrung unten	98
A.7	Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 4 cm-Bohrung oben	99
A.8	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 4 cm-Bohrung oben	99
A.9	Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 4 cm-Bohrung unten	100
A.10	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 4 cm-Bohrung unten	100
A.11	Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 5 cm-Bohrung oben	101
A.12	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung oben	101
A.13	Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 5 cm-Bohrung unten	102
A.14	Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung unten	102

Tabellenverzeichnis

5.1	Kenngrößen der Simulationsrechnungen der Parameterstudien	28
5.2	Position der Sender und Empfänger für die Untersuchung der Variation der Aufzeichnungszeit	29
5.3	Kenngrößen der Simulationsrechnung für die Messplanung einer Bohrung in Polyamid	35
6.1	Kenngrößen für die Messungen am Polyamidprobekörper	43
6.2	Kenngrößen für die Reverse Time Migration der Messungen am Polyamid- probekörper	50
6.3	Kenngrößen für die Reverse Time Migration der Messungen am Beton- probekörper mit Spannkanal	67

Symbolverzeichnis

P	Punkt in Volumen V
R_L, R_T	Reflexionskoeffizienten
V	Volumen
Z_1, Z_2	Schallimpedanz
c	Wellengeschwindigkeit
dh	Gitterabstand
dt	Samplerate
f	Frequenz
f_c	Hauptfrequenz
nt	Anzahl der Samples
nx, ny	Anzahl der Gitterpunkte in x- bzw. y-Richtung
p	Druck
r	Empfänger
s	Quelle
s(t)	Quellterm
t	Zeit
t_A	Aufzeichnungszeit
u	Sendewellenfeld
$\vec{v}$	Partikelgeschwindigkeit
v_p	P-Wellen-Geschwindigkeit
v_s	S-Wellen-Geschwindigkeit
w	Empfängerwellenfeld
α, β	Brechungswinkel
δ	Verschiebung
λ	Wellenlänge
ρ	Dichte
σ	Absorptionskoeffizient
ω	Kreisfrequenz
P-Wellen	Longitudinal- oder Primärwellen
S-Wellen	Transversal- oder Sekundär- oder Scherwellen
SH-Wellen	horizontal schwingender Anteil der S-Welle Partikelbewegung erfolgt parallel zur Oberfläche

Abkürzungsverzeichnis

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
RTM	Reverse Time Migration
SAFT	Synthetic Aperture Focusing Technique

Anhang

A.1 Reverse Time Migration mit Longitudinalwellendaten und Scherwellendaten parallel zum Profil polarisiert

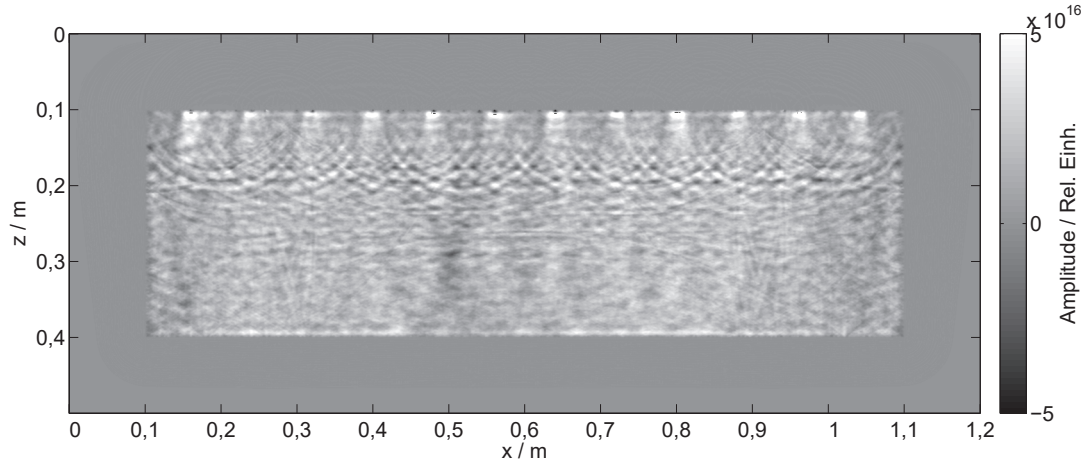


Abbildung A.1: Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 2 cm-Bohrung unten

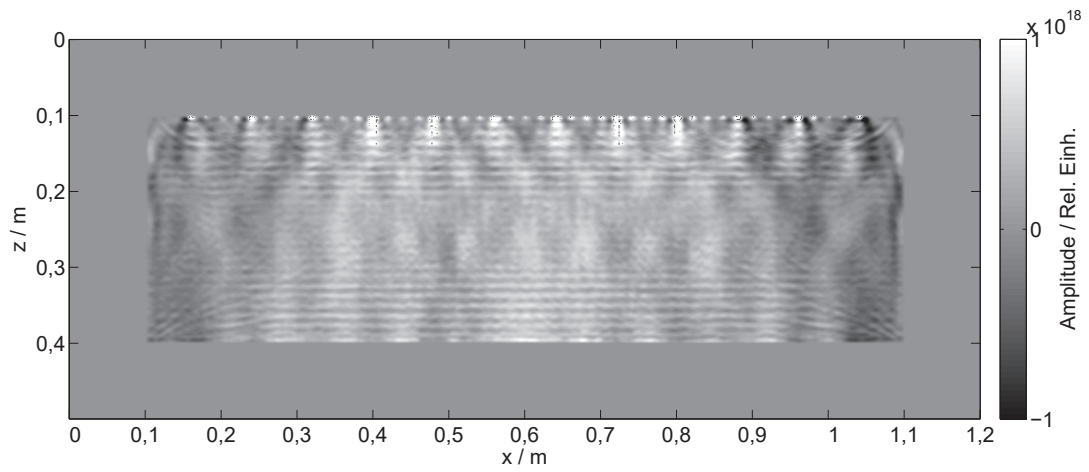


Abbildung A.2: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 2 cm-Bohrung unten

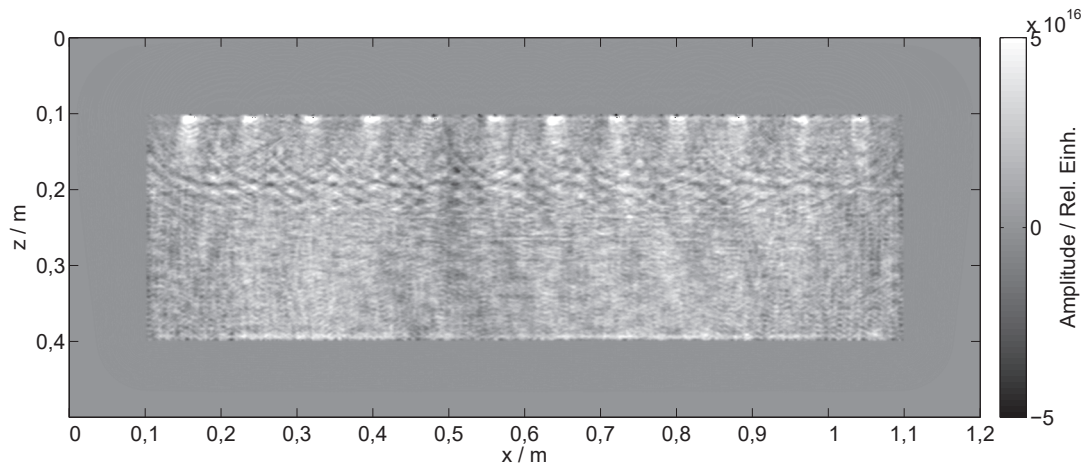


Abbildung A.3: Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 3 cm-Bohrung oben

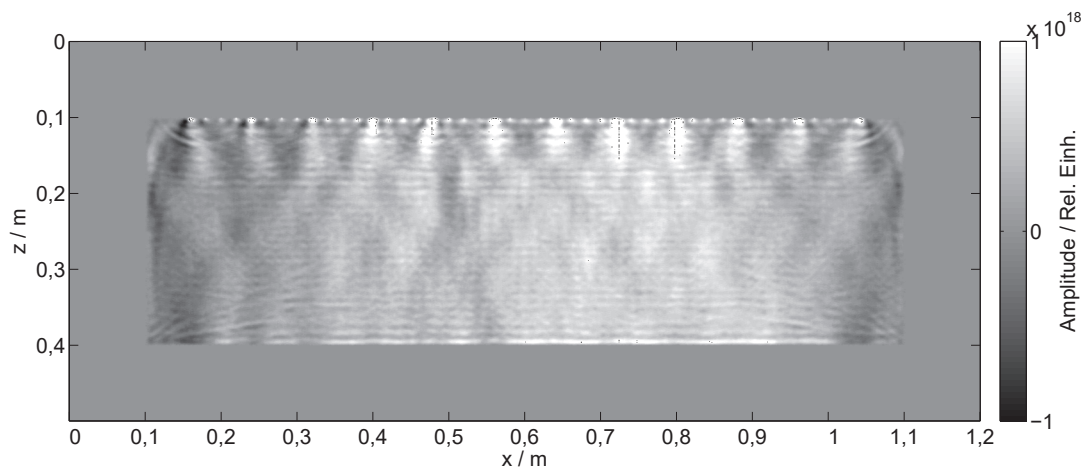


Abbildung A.4: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 3 cm-Bohrung oben

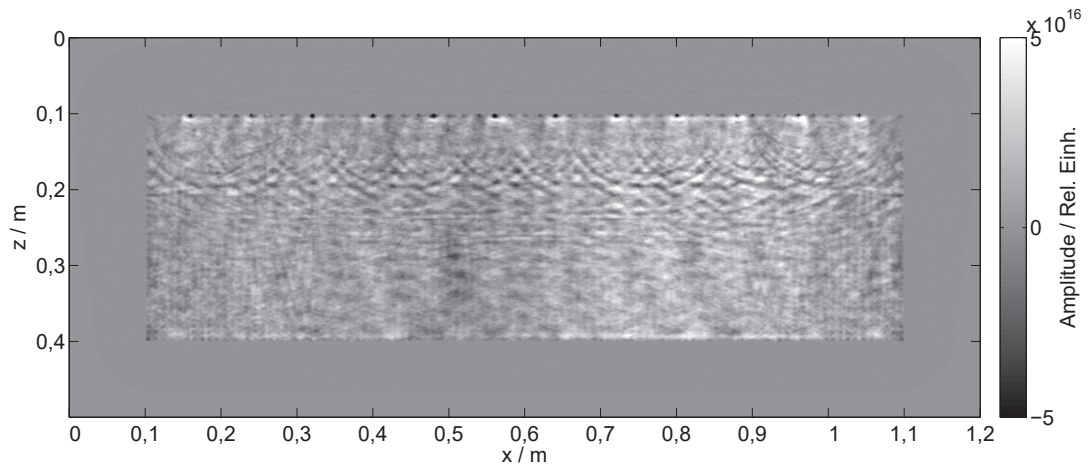


Abbildung A.5: Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 3 cm-Bohrung unten

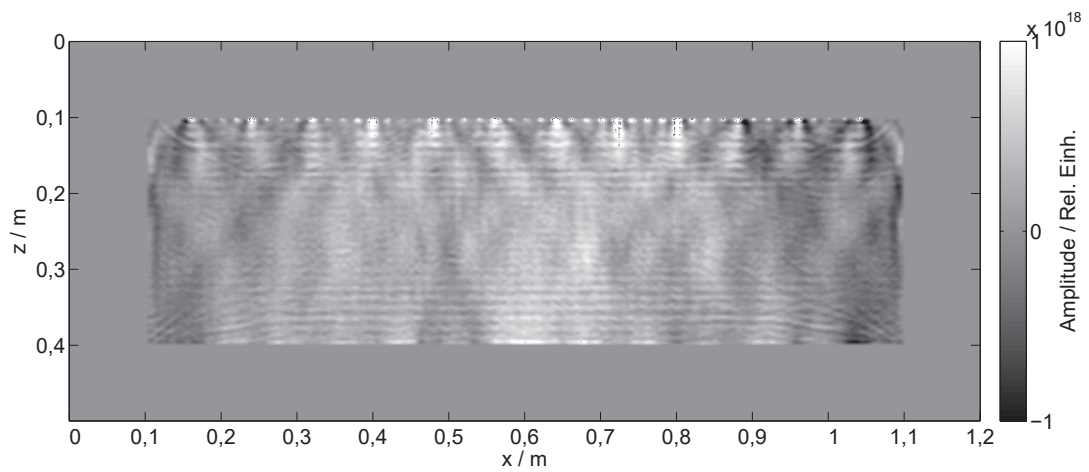


Abbildung A.6: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 3 cm-Bohrung unten

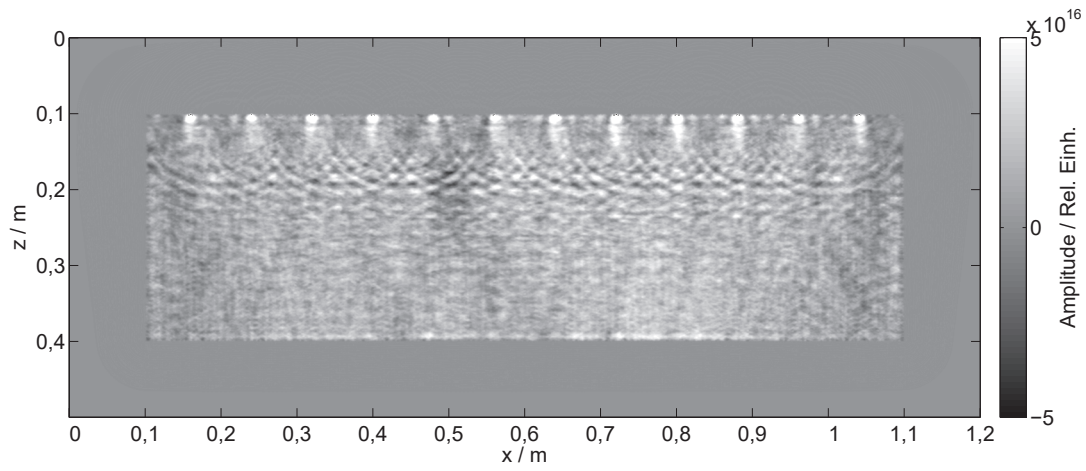


Abbildung A.7: Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 4 cm-Bohrung oben

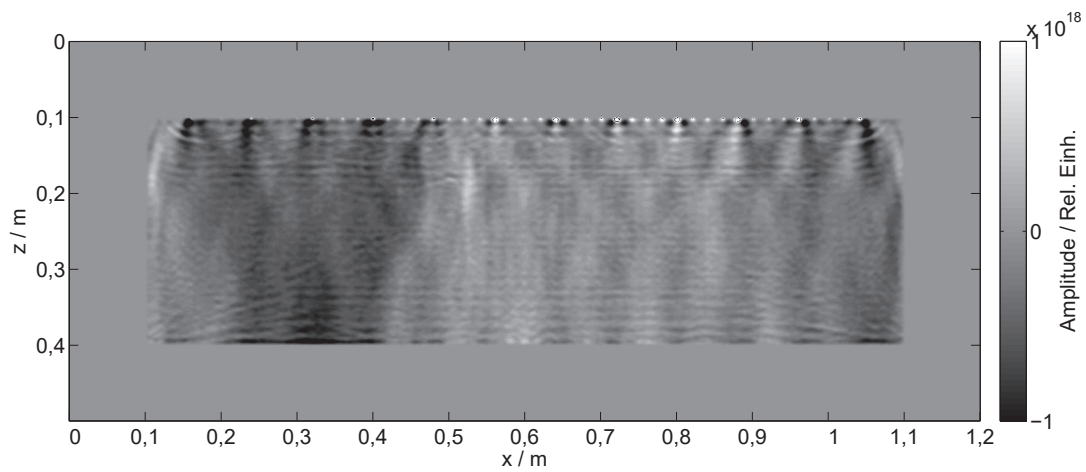


Abbildung A.8: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 4 cm-Bohrung oben

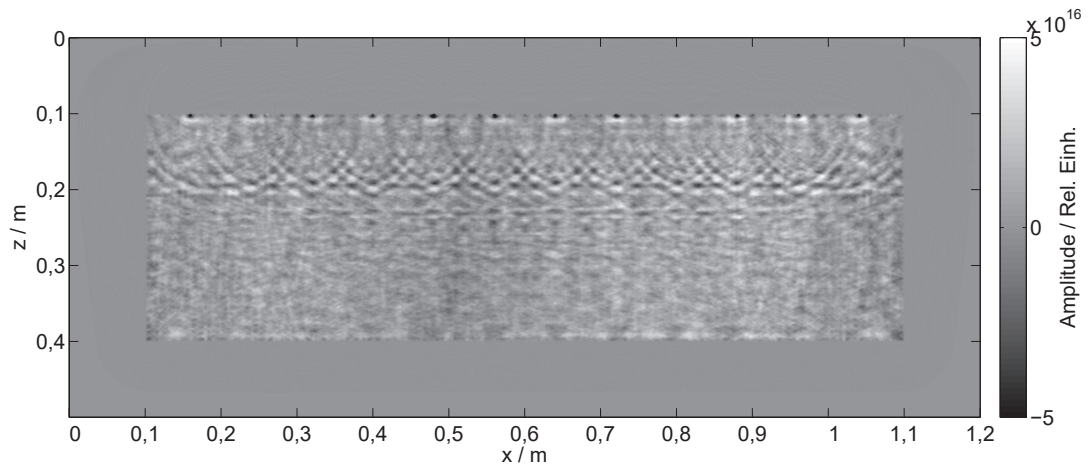


Abbildung A.9: Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 4 cm-Bohrung unten

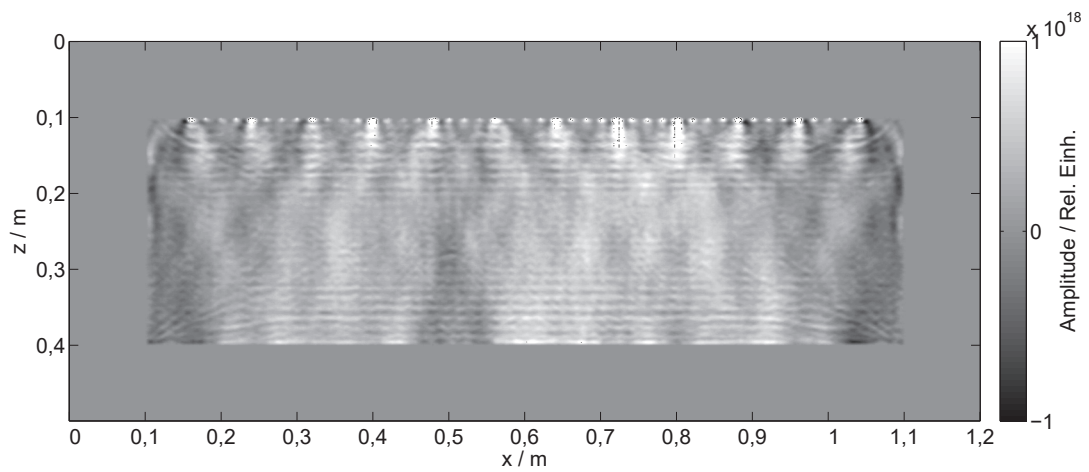


Abbildung A.10: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 4 cm-Bohrung unten

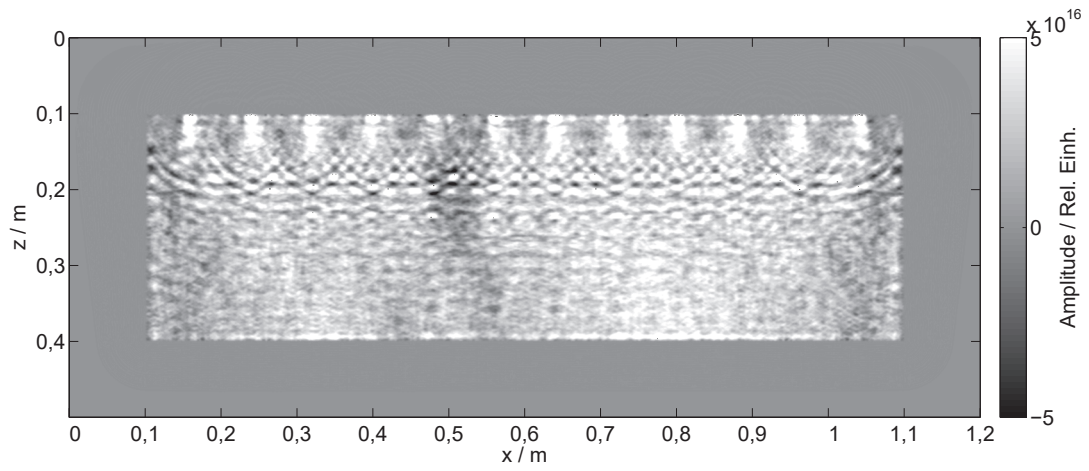


Abbildung A.11: Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 5 cm-Bohrung oben

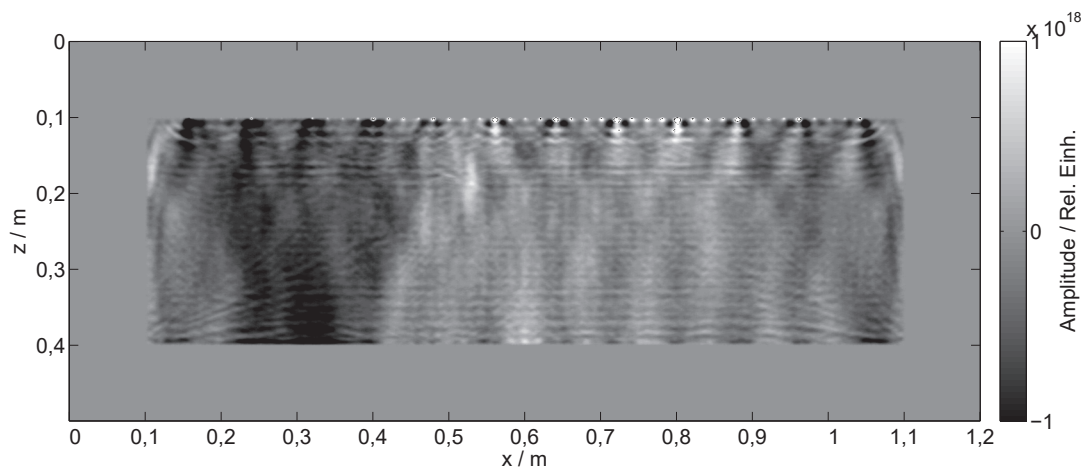


Abbildung A.12: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung oben

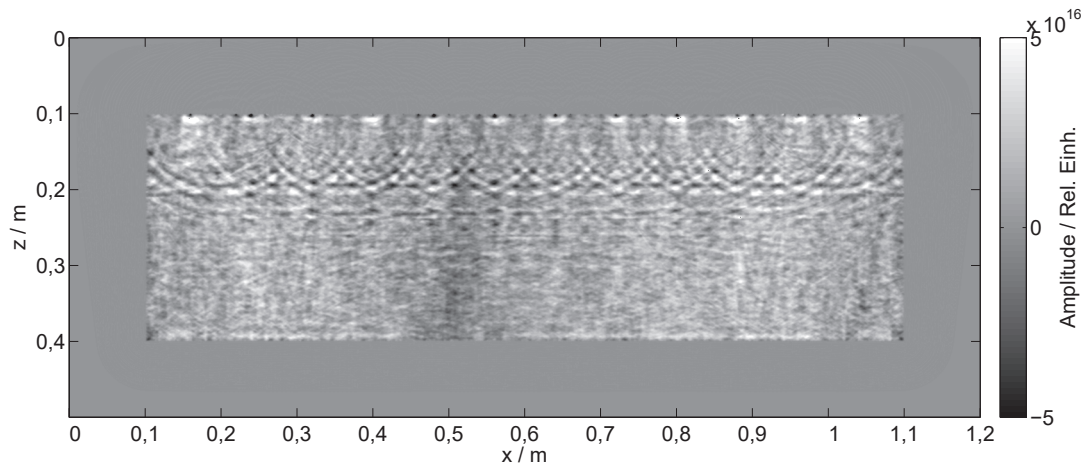


Abbildung A.13: Migrationsergebnis der Longitudinalwellenmessung mit 5 cm-Bohrung unten

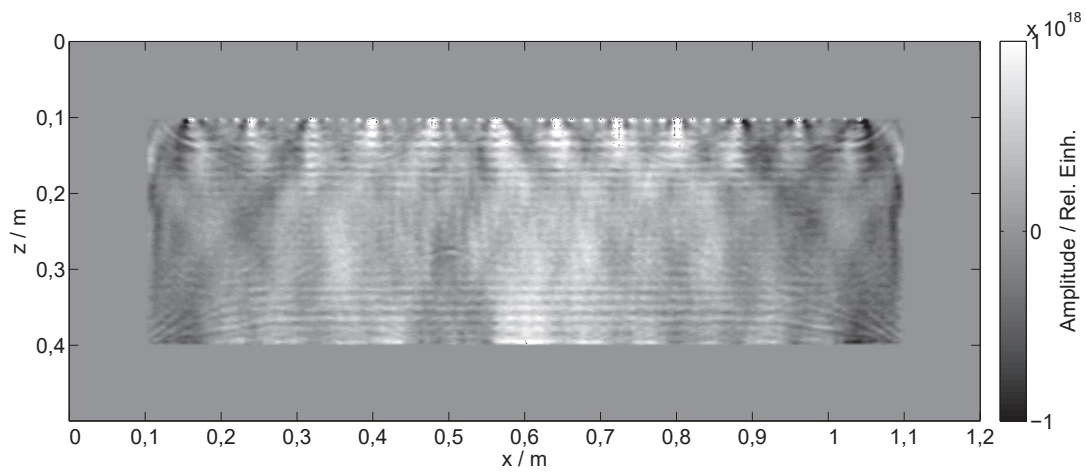


Abbildung A.14: Migrationsergebnis der Scherwellenmessung parallel zum Profil polarisiert mit 5 cm-Bohrung unten

Kurzfassung

Ultraschall-Echo-Messungen dienen in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen der Dickenbestimmung von Bauteilen sowie der Lokalisierung und Charakterisierung von Einbauteilen, Einlagerungen und anderen Inhomogenitäten. Zur Rekonstruktion werden bisher Abbildungsverfahren wie z.B. 3D-SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) genutzt. Diese setzen aber voraus, dass nur direkte Reflexionen am Abbildungsobjekt erfolgen. Deshalb können keine zuverlässigen Aussagen über den Durchmesser von eingebauten Spannkänen oder z.B. Seitenkanten von Objekten getroffen werden, da diese nur von mehrfach reflektierten Wellen erfasst werden.

Mit der aus der Geophysik stammenden Reverse Time Migration, die bereits häufig in der Erdölexploration genutzt wird, lassen sich auch steilere Strukturen mit über 70° Einfallswinkel abbilden und somit auch die Unterseite von Einbauten oder Stufen in Bauteilen darstellen.

Die vorliegende Arbeit untersucht mit Simulationsrechnungen die Leistungsfähigkeit des Algorithmus für die zerstörungsfreie Prüfung. Mittels Parameterstudien konnte die Darstellbarkeit einer Bohrung in einem simulierten Probekörper nachgewiesen werden.

Ultraschall-Echo-Messungen an einem Polyamidprobekörper dienten der Überprüfung der Erkenntnisse aus den Simulationen. In den Probekörper wurde eine Bohrung eingebracht und schrittweise vergrößert. Für jeden Schritt wurden mit einem Scanner halbautomatisch rauscharme Ultraschalldaten erfasst. Die Bohrung ließ sich in Lage, Form und Durchmesser in jedem Schritt korrekt abbilden. Damit ist die Funktionalität der Reverse Time Migration auch an realen Ultraschall-Messdaten nachgewiesen. Mit Hilfe von Messungen an einem Betonprobekörper im Labor wurde die prinzipielle Anwendbarkeit an einem inhomogenen Material gezeigt. Hierbei konnte ein Spannkänel korrekt in Lage, Form und Größe abgebildet werden. Auch eine praxisnahe Messung an einer Brücke lieferte erste vielversprechende Ergebnisse zur Lokalisation und Bestimmung der Form eines Spannkänel.

Die Ergebnisse der Simulationen und Messungen zeigen eine klare Verbesserung gegenüber den konventionell genutzten SAFT-Verfahren. Es müssen sich jedoch noch weitere Arbeiten anschließen, in denen die Qualität der Messungen und Abbildungsergebnisse weiter verbessert werden können. Insbesondere an Beton ist der Einfluss des Kornrauschens und der Dämpfung groß. Für die Messung und Auswertung der Messdaten von der Brücke waren diese Faktoren die größten Störeinflüsse.

Abstract

Ultrasonic measurements in non-destructive testing are used to determine the size of structural elements and to locate and characterise components and inhomogeneities. State of the art for reconstruction are methods like 3D-SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique). These algorithms require only direct reflections from objects. It is impossible to get reliable information on the diameter of tendon ducts or vertical boundaries of objects because these can only be imaged using multiple reflections.

Reverse Time Migration is a commonly used imaging method in exploration geophysics. With this method, it is possible to image steep structures with an incidence angle larger than 70° like steps or the bottom of components.

In this thesis, the capability of the Reverse Time Migration for non-destructive testing is shown using simulated data. It was possible to image the full perimeter of a hole in a simulated object.

Ultrasonic measurements were performed on a polyamide specimen to verify the results of the simulations with low noise data. A hole was drilled into the specimen and the size of the hole was increased stepwise. Measurements were made for each step. Position, size and diameter were imaged accurately and the applicability of the Reverse Time Migration in non-destructive testing was proven. In the next step, laboratory measurements on a concrete model were performed. A tendon duct was imaged in position, size and diameter. First results of a measurement on a bridge show that it is possible to locate a rectangular tendon duct. Unfortunately it was impossible to image the bottom of it due to missing multiple reflections and attenuation.

The results of the simulations and the measurements show a clear advantage over the SAFT algorithms used so far. Further work must be done to improve the quality of the measurements and the images. Especially on concrete the influences of noise because of the aggregates and the attenuation are high. This can be seen in the results of the measurements of the bridge.

Danksagung

Diese Arbeit wäre ohne die Unterstützung vieler Beteiligter nicht möglich gewesen.

Zuerst danke ich Herrn PD Dr. Ernst Niederleithinger, der es mir nach einigen Umwegen ermöglichte diese Arbeit an der RWTH Aachen einzureichen und meine fachliche Betreuung übernahm. Unzählige Diskussionen mit ihm brachten immer wieder neue Anregungen für weitere Untersuchungen. Während meiner gesamten Promotionsphase wurde er nicht müde mich immer weiter zu motivieren. Herrn Prof. Dr. Klaus Reicherter danke ich für die Übernahme des zweiten Gutachtens und Herrn Prof Dr. Florian Wagner für den Vorsitz der Prüfungskommission. Prof. Dr. Thomas Bohlen vom Karlsruher Institut für Technologie lieferte zu Beginn meiner Diplomarbeitszeit die Idee das Potential der Reverse Time Migration für die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen zu untersuchen. Für die Bereitstellung und Pflege des genutzten Programmcodes für die Reverse Time Migration danke ich Dr. André Kurzmann.

Meine Arbeiten konnte ich an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung im Fachbereich für zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen durchführen. Viele Forschungsprojekte, an denen ich mitarbeitete, bereicherten mein Wissen über die zerstörungsfreie Prüfung enorm. Ich danke der Arbeitsgruppe Ultraschall des Fachbereichs, insbesondere dem damaligen Arbeitsgruppenleiter Dr. Martin Krause, für die Unterstützung bei theoretischen und praktischen Fragen rund um Ultraschallmessungen im Bauwesen und deren Auswertung. Auch Dr. Stefan Maack widmete sich jederzeit meinen Fragen bezüglich des Bauingenieurwesens und Ultraschall. Für die Unterstützung bei den Messungen danke ich Dr. Markus Stoppel und Rüdiger Feldmann. Sie halfen mir beim Umbau der vorhandenen Scannersysteme zu „meinem“ halbautomatischen Scanner und ersparten mir damit viele Stunden in der Laborhalle, die ich mit händischen Messungen benötigt hätte. Ich freue mich, dass Maria Grohmann die Arbeit mit der Reverse Time Migration in der zerstörungsfreien Prüfung an der BAM fortsetzt. Des Weiteren danke ich Julia, Magdalena, Carolin, Sebastian, Norman, Andreas, Martin, Marco und Sean für viele Gespräche, Motivation und Unterstützung.

Ich danke meinen zwischenzeitlichen Arbeitgebern, der SENSYS GmbH und der Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, die es mir mit flexibler Arbeitszeitgestaltung ermöglichten diese Arbeit fortzuführen. Dort wurde ich außerdem von meinen Kollegen stetig motiviert mein Ziel nicht aus den Augen zu verlieren.

Ganz besonders danke ich meiner Familie, die mich jederzeit unterstützte und immer an mich geglaubt hat.

Eidesstattliche Versicherung

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die Dissertation selbstständig verfasst, alle in Anspruch genommenen Hilfen in der Dissertation angegeben habe und die schriftliche und elektronische Fassung übereinstimmen.

Die Grundsätze zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis der RWTH Aachen habe ich eingehalten.

Aachen, 17. August 2023

Sabine Müller