

Neue Ideen für die zerstörungsfreie Prüfung von Beton: Seismische Interferometrie und mehr

Ernst NIEDERLEITHINGER *

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12205 Berlin

Kurzfassung. Ultraschallverfahren haben sich im Bauwesen in den letzten Jahren immer mehr in der Praxis etabliert. Echomessungen zur Geometriebestimmung sind Stand der Technik. In der Wissenschaft gibt es zahlreiche Ideen, die Messmethodik und die Auswertung weiter zu verbessern sowie den Einsatzbereich zu erweitern. Erste eingebettete Ultraschallsysteme zum Langzeitmonitoring sind installiert, Mehrkanalgeräte ermöglichen immer größere Aperturen und Eindringtiefen, verbesserte Abbildungsverfahren zeigen immer mehr Details. Zusätzlich lassen sich Verfahren aus der Geophysik adaptieren, die weiteren Fortschritt versprechen. Die Seismische Interferometrie dient klassisch dazu, Materialeigenschaften des Erduntergrundes mittels seismischer Wellen zu bestimmen. Derzeitige Anwendungsbereiche sind die Verbesserung seismischer Abbildungsverfahren, Interpolation seismischer Spuren (A-Scans), Bestimmung von Quellparametern oder die Eliminierung unerwünschter Signale in passiven und aktiven Experimenten, hauptsächlich durch Kreuzkorrelation und Bestimmung Greenscher Funktionen. Diese Techniken können auch auf Ultraschalldaten, die an Betonkonstruktionen erfasst wurden, angewendet werden. Moderne Abbildungsverfahren benötigen eine möglichst hohe A-Scan-Dichte und eine genaue Kenntnis des Quellsignals. Beides ist nicht unbedingt gegeben, z. B. wegen der physischen Größe der Sensoren und wechselnder Ankopplungsbedingungen. In simulierten und realen Experimenten wurden interferometrische Methoden zur Lösung dieser Aufgabenstellungen evaluiert. Es zeigt sich, dass fehlende A-Scans kinematisch korrekt interpoliert werden können, wenn ausreichend viele Sender- und Empfängerpositionen genutzt wurden. Amplituden und Signalform sind verändert, können aber durch adaptive Filterung angepasst werden. Die Quellsignalform kann mit hoher Genauigkeit rekonstruiert werden. Die Ergebnisse können potentiell zu einer Verbesserung der Abbildung des Inneren der untersuchten Objekte genutzt werden.

1. Einführung

Ultraschallverfahren haben sich im Bauwesen in den letzten Jahren immer mehr in der Praxis etabliert. Echomessungen zur Geometriebestimmung sind Stand der Technik, bisher meist limitiert auf feste Sender-/Empfängerkonfigurationen mit kleiner Apertur. Aber auch hier lassen sich schon zahlreiche Prüfaufgaben lösen, wie die Dickenbestimmung von Betonbauteilen oder die Lokalisierung von Einbauteilen (z. B. tiefliegende Bewehrung, Spannkäme). Das erste kommerzielle Gerät mit Arraytechnik (variable Apertur,



automatische Durchschaltung von mehreren Sender-/Empfängerkombinationen, integrierte SAFT-Auswertung) ist bei mehreren Ingenieurbüros bereits im Einsatz. An der Grenze zur praktischen Anwendung stehen weitere Innovationen, wie die automatisierte Messung mit Scannern oder Robotern oder die Charakterisierung von Spannkäufen mittels SAFT-Phasenauswertung.

Die Adaption von Methoden aus der Geophysik, insbesondere der Seismik, ergibt weitere Möglichkeiten. Diese werden seit fast 100 Jahren vor allem zur Exploration von Lagerstätten genutzt. Inzwischen erkunden spezialisierte Schiffsflotten mit tausenden Sensoren Erdschichten in mehreren Kilometern Tiefe mit hoher Auflösung und Trefferquote. Hierfür werden in Wissenschaft und Technik hunderte Millionen Euro investiert. Von den entwickelten Methoden kann auch die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen profitieren. Im Folgenden werden einige Innovationen nicht nur, aber auch aus diesem Bereich vorgestellt, bevor auf eine davon, die seismische Interferometrie, näher eingegangen wird.

2. Neue Ideen für die Ultraschallprüfung von Beton

2.1. Lokalisierung von Bruchereignissen in Beton mittels Time Reversal

Der Einsatz von Methoden aus dem Bereich der Akustischen Emission (AE) zur Lokalisierung von Bruchereignissen in Beton war bisher im Wesentlichen auf Laborexperimente beschränkt. Streuung und Dämpfung verhinderten den Einsatz an realen Bauwerken. Time Reversal-Techniken, in der zerstörungsfreien Prüfung schon länger bekannt, zeigen in ersten Versuchen vielversprechende Ansätze auch für größere Bauteile. Dabei werden die empfangenen Signale zeitlich invertiert zurück ins Bauteil eingespeist (real oder in einer Simulation) und fokussieren am Ursprung. Streuung kann hier sogar hilfreich sein. Ein Experiment zur Evaluierung zeigt vielversprechende Ergebnisse [1].

2.2. Langzeitüberwachung mittels Coda Wave Interferometry

Ultraschall-Transmissionsmessungen werden an Beton schon lange für die Bestimmung von Materialparametern eingesetzt, beispielsweise an Laborproben für die Bestimmung des Einflusses von Frost-Tauwechseln. Die Auswertung beschränkt sich meist auf die Bestimmung von Wellengeschwindigkeiten aus den Einsätzen der direkten Wellen zwischen Sender und Empfänger. Das Verfahren ist etabliert, reagiert aber nur auf größere Materialschädigungen. Durch Auswertung später Signalanteile, der sogenannten Coda, lassen sich auch subtile Veränderungen detektieren. Ein Verfahren hierfür ist die Coda-Wave Interferometry, die Geschwindigkeitsänderungen im Material mittels Kreuzkorrelation von gedehnten bzw. gestauchten Signalen mit Referenzsignalen hochgenau bestimmt. Der Anwendungsbereich umfasst Veränderungen der Belastung bis hin zu Detektion von Schädigungen in der Frühphase. Die Implementation dieser Methodik erfolgt derzeit in Labor- [2] und Technikumsexperimenten [3] sowie ersten Monitoringsystemen.

2.3. Erweiterte Messtechnik

Der Einsatz von koppelmittelfreien Punktkontaktprüfköpfen für Longitudinal- und Transversalwellen hat die Prüftechnik für Ultraschallmessungen im Bauwesen revolutioniert. Inzwischen ist mehr als ein Anbieter am Markt. Konventionelle Technik arbeitet derzeit mit festem, relativ kleinem Sender-Empfänger-Abstand, was kompakte einfach zu bedienende Geräte ermöglicht. Für bestimmte Prüfaufgaben, z. B. an dicken

Fundamenten oder Sicherheitsbehältern von Nuklearanlagen, sind jedoch variable Abstände bis zu mehreren Metern notwendig. Hierzu ist ein modulares „Large Aperture Ultrasonics“ Array (LAUS) in Entwicklung. Andere Sensoren werden für Messungen in Bohrlöchern angepasst oder direkt beim Bau in den Beton eingebettet. Scannersysteme und Roboter zum automatisierten Einsatz werden für den kommerziellen Einsatz optimiert.

2.4. Verbesserte Abbildungsverfahren

Stand der Technik bei den Abbildungsverfahren sind 2D oder 3D-SAFT-Methoden (Synthetic Aperture Focusing Technique) im Zeit- und Frequenzbereich. Neue Varianten ermöglichen eine Phasenauswertung oder die Berücksichtigung von Anisotropie. Weitere Neuerungen (z. B. „one way wave equation“) sind in der Erprobung.

Die Abbildung bestimmter Prüfgeometrien, beispielsweise von steilen Grenzflächen oder der Rückseite von Einbauteilen, ist jedoch mit den klassischen Verfahren prinzipiell nicht zu lösen, da nur direkte Reflektionen korrekt berücksichtigt werden. Neue Verfahren aus der Geophysik wie die Reverse Time Migration (RTM) nutzen auch indirekte Reflektionen. Erste Labor- und Technikumsexperimente zeigen vielversprechende Ergebnisse [4][5].

2.5. Datenfusion

Oft ist eine einzelne Messmethode nicht ausreichend, um eine Prüfaufgabe zu bearbeiten. Die Kombination von Messmethoden, beispielsweise des Radarverfahrens, Impakt-Echo und/oder Thermographie zusätzlich zum Ultraschall, bewährt sich auch schon in der Praxis. Eine teil- oder vollautomatisch ablaufende Kombination der Messdaten zu einem einzigen Bild bzw. Prüfergebnis ist das Arbeitsfeld der Datenfusion. Experimente an größeren Laborbauteilen zeigen hierzu [6] und [7].

3. Seismische Interferometrie

3.1. Motivation

Zur Evaluierung und Weiterentwicklung des in Abschnitt 2.4 erwähnten Abbildungsverfahrens RTM werden derzeit Experimente an einem Polyamid-Probekörper mit Bohrung durchgeführt. Dafür werden als Sender und Empfänger Arrays aus vier Scherwellenprüfköpfen verwendet, die entlang eines Profils mit variablem Abstand teilautomatisiert verschoben werden (Abb. 1). Insgesamt werden 12 Sender- und 45 Empfängerpositionen angefahren (Abb. 2). Details zum Aufbau finden sich in [4]. Kleine Abstände (unter 6 cm) können aufgrund der Dimension der Köpfe nicht realisiert werden. Daher weisen die mit festem Senderstandpunkt aufgenommenen B-Bilder (Seismogramme) eine Lücke auf. Wie in [4] gezeigt wird, lassen sich auch so gute Abbildungsergebnisse erzeugen. Das Experiment eignet sich aber ideal, um den Einsatz der seismischen Interferometrie zur Interpolation von Messspuren zu demonstrieren.

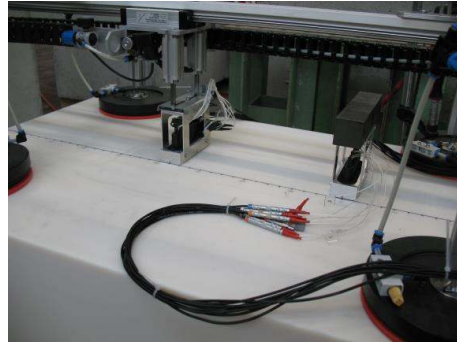
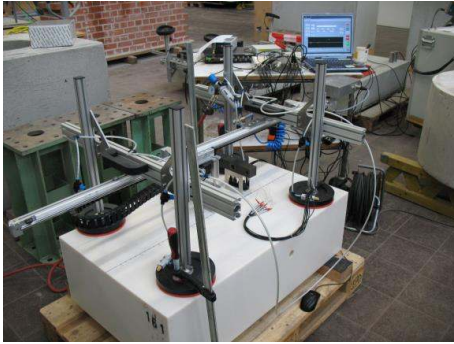


Abb. 1. Probekörper und Prüfköpfe für Ultraschall-Echoexperimente

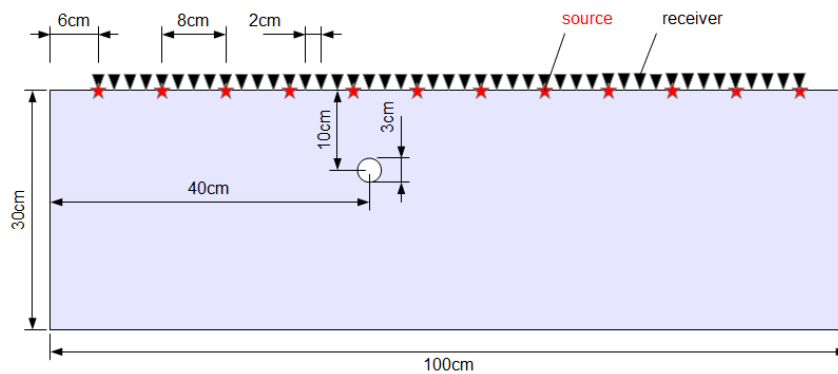


Abb. 2. Skizze der Messkonfiguration

3.2. Theorie

Die Grundlagen der seismischen Interferometrie sind z. B. in [8] und [9] dargestellt. Grundsätzlich versucht man das Signal, das man bei Messung zwischen zwei Punkten A und B erhalten würde, aus zahlreichen anderen Messungen, bei denen sowohl bei A als auch bei B Empfänger positioniert sind, zu rekonstruieren. Abb. 3 zeigt schematisch, dass die notwendigen Informationen zu Wellenwegen zwischen A und B auch in anderen Signalen enthalten sein können. Mathematisch wie auch praktisch muss man mit (theoretisch unendlich) vielen Quellen um A und B herum arbeiten (Abb. 4). Da sich dies mathematisch am einfachsten für Impulsantworten G (Messung mit infinitesimal kurzem Impuls) zeigen lässt, spricht man auch von „Greens function retrieval“.

Die grundlegende Gleichung lautet im Frequenzbereich nach [9], reduziert auf Quellen an der Oberfläche:

$$\text{Im}[G(\vec{x}_B, \vec{x}_A, \omega)] \approx k \int_{S_0} G^*(\vec{x}_B, \vec{x}, \omega) G(\vec{x}_A, \vec{x}, \omega) d^2x \quad (1)$$

Auf der rechten Seite steht dabei das Integral (bei in der Realität nur endlich vielen Quellen eine Summe) über die Kreuzkorrelationen der an A und B gemessenen Signale, auf der linken Seite das gesuchte Signal von A nach B. Dies funktioniert auch mit realen Signalen D , die mit einem bandbreitenbegrenztem Impuls W gemessen wurden. Es erfolgt lediglich eine zusätzliche Konvolution (Multiplikation im Frequenzbereich):

$$D(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \omega) = W(\omega) G(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \omega) \quad (2)$$

Dieses Verfahren lässt sich recht universell einsetzen und ist auch nicht sonderlich rechenaufwändig.

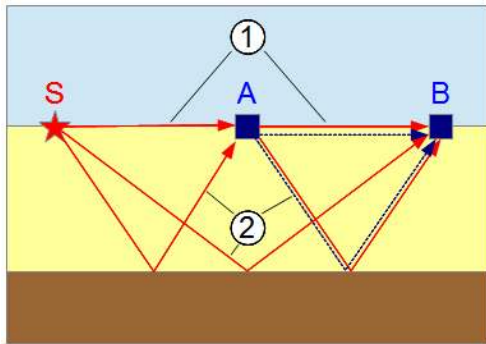


Abb. 3. Skizze ausgewählter Wellenwege (1: direkt, 2: reflektiert) im geschichteten Medium von einer Quelle S zu den Empfängern A und B, sowie von A nach B. Viele Wege sind koinzident.

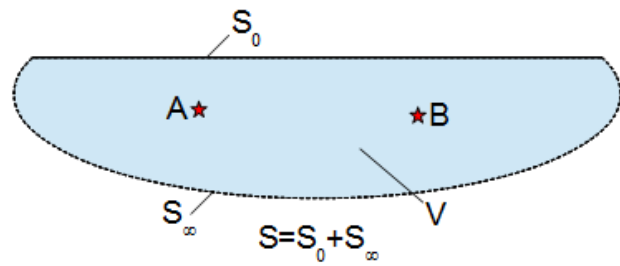


Abb. 4. Skizze zur Rekonstruktion einer virtuellen Messung von A nach B im Volumen V mithilfe zahlreicher Messungen diverser Quellen entlang von S.

3.3. Interpolation von Messdaten

Nicht nur bei dem oben geschilderten ZfP-Experiment, sondern auch bei der seismischen Erdölexploration können nicht immer alle gewünschten Signale aufgezeichnet werden. Zwischen Quelle und Empfängern bleibt ein Mindestabstand. Die Interferometrie lässt sich dazu einsetzen, um die fehlenden Spuren (A-Scans) zu ersetzen [10].

Zur Demonstration wurden angelehnt an die in 3.1 gezeigte Geometrie (Abb. 2) Simulationen (2D Finite Differenzen, akustischer Code) durchgeführt. Dabei wurden aber nicht nur 12 Quellpunkte angesetzt, sondern 45. Jeder Empfängerpunkt dient also auch als Quellposition. Das Simulationsergebnis ist in Abb. 5 dargestellt. Neben den direkten Reflektionen von Bohrung und Rückwand zeigen sich die direkte Welle, Mehrfachreflektionen und Diffraktionen aus den Ecken des Objekts.

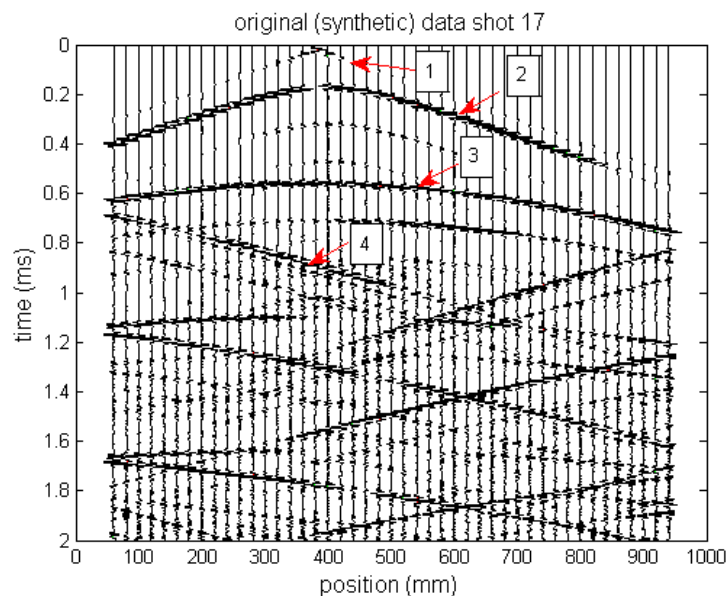


Abb. 5. Simuliertes Seismogramm (B-Bild) für festen Quellpunkt (380 mm) und verschobene Empfängerposition. 1: direkte Welle, 2: Reflektion Bohrung, 3: Reflektion Rückwand, 4: Diffraktion untere linke Ecke.

Für den gleichen Quellpunkt wurde nun eine interferometrische Rekonstruktion nach der in 3.2 skizzierten Methodik durchgeführt. Dabei wurden zunächst nur die Informationen der

auch im eigentlichen Experiment genutzten übrigen 11 Quellpunkte eingesetzt. Das Ergebnis ist in Abb. 6 gezeigt. Es ist nicht wirklich befriedigend. Die direkten Reflektionen sind zwar zu erkennen, alle anderen Einsätze jedoch nicht. Starkes Rauschen und Artefakte stören das Bild.

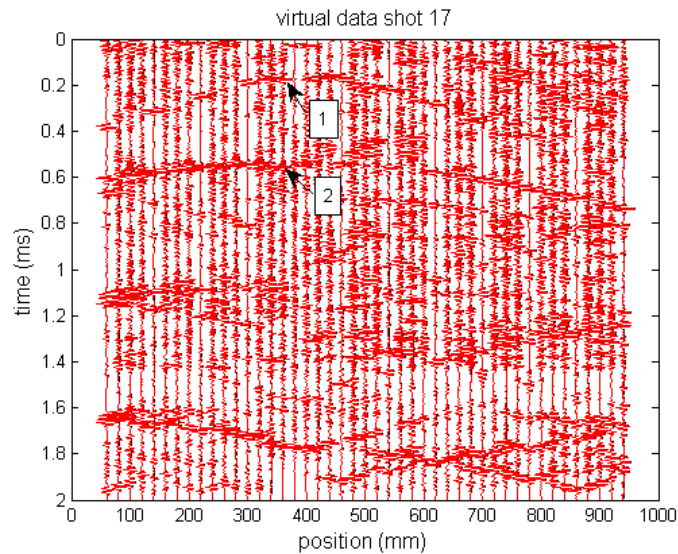


Abb. 6. Interferometrisches Rekonstruktionsergebnis aus 11 anderen Quellpunkten.

Anders stellt sich das Ergebnis dar, wenn man deutlich mehr Information zur Rekonstruktion einsetzt. Abb. 7 zeigt das Ergebnis bei der Verwendung der Signale aller 44 simulierten Quellpunkte. Auch hier zeigt sich noch Rauschen und die Spur direkt am Quellpunkt ist stark gestört, aber alle wesentlichen Einsätze sind klar zu erkennen und entsprechen kinematisch dem Original in Abb. 5. Die Qualität ist hinreichend, um die entsprechenden A-Scans zu einer Interpolation einsetzen zu können (Abb. 8).

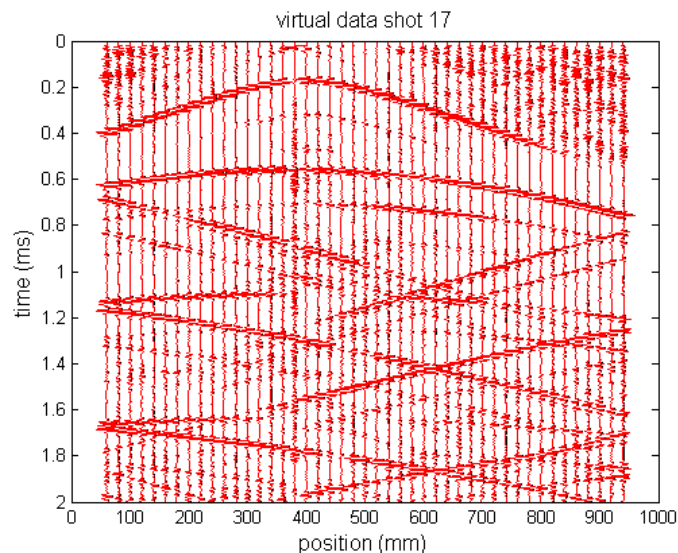


Abb. 7. Wie Abb. 6, aber Rekonstruktion aus 44 anderen Quellpunkten.

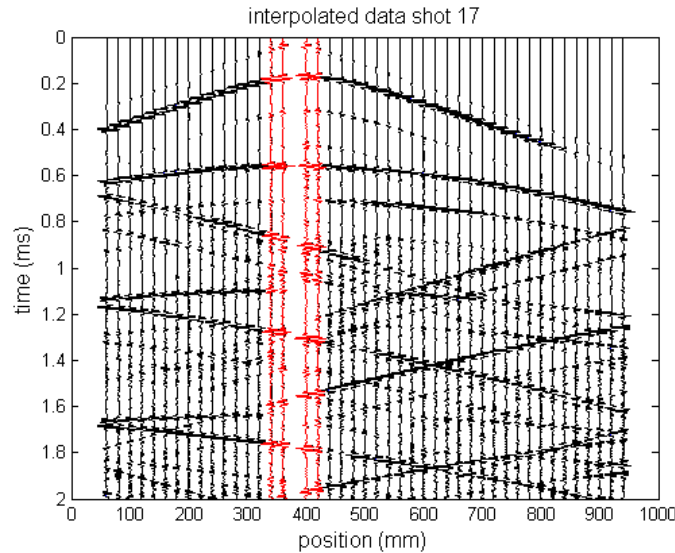


Abb. 8. Spuren (A-Scans) des Rekonstruktionsergebnisses aus Abb. 7 (rot) genutzt zur Interpolation ggf. fehlender Spuren im Original (Abb. 5, schwarz).

3.4. Extraktion des Quellsignals

Eine weitere Möglichkeit des Einsatzes der Interferometrie ist die Rekonstruktion des Quellsignals aus Messdaten. Das Quellsignal ist insbesondere bei Anwendungen im Bauwesen nicht immer bekannt, da die Oberflächenqualität und Ankopplung variieren. Kenntnis des Quellsignals ist jedoch für eine Reihe von Auswertemethoden (z. B. für die RTM) unerlässlich. In [11] wird eine Methode zur Rekonstruktion eines „gemittelten“ Quellsignals W aus den gemessenen Daten D und den rekonstruierten Daten D' vorgeschlagen:

$$\left[\frac{D'(\vec{x}_B, \vec{x}_A, \omega) D^*(\vec{x}_B, \vec{x}_A, \omega)}{|D(\vec{x}_B, \vec{x}_A, \omega)|^2 - \gamma} \right]^* \approx W(\omega) \quad (3)$$

Der Parameter γ dient dabei der Stabilisierung. Die Anmerkung „gemittelt“ bezieht sich darauf, dass zur Rekonstruktion ja andere Quellpunkte mit womöglich anderen Ankopplungsbedingungen herangezogen werden. Die Methodik wird an den gleichen simulierten Daten, die in Abschnitt 3.3 herangezogen wurden, demonstriert. Hier wurde als Quellfunktion ein Ricker-Wavelet eingesetzt. Abb. 9 zeigt das Ergebnis. Es wurden wiederum 44 andere Quellpunkte zur Rekonstruktion eingesetzt und das Ergebnis anschliessend durch eine Fensterfunktion zeitlich begrenzt.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklung von Ultraschalltechniken für das Bauwesen macht weiter große Fortschritte. Die Anwendungen gehen inzwischen weit über simple Laufzeitmessungen und Erkundung einfacher Strukturen hinaus. Die Abbildungsqualität bei Echomessungen ermöglicht inzwischen auch die Untersuchung komplexer Geometrien und wird durch den Einsatz neuer Mess- und Imagingtechniken weiter gesteigert. Gleichzeitig ermöglichen eingebettete Sensoren und Methoden wie Coda Wave Interferometry die verbesserte Dauerüberwachung von Bauwerken.

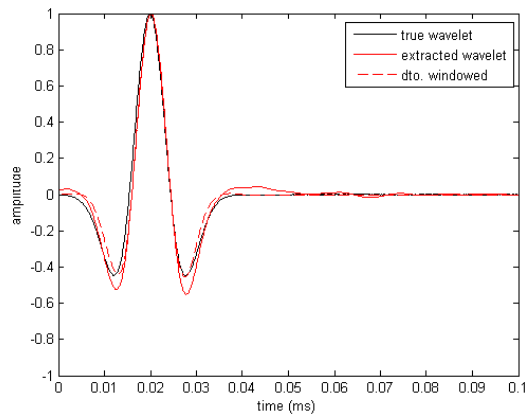


Abb. 9. „Echtes“ Quellsignal aus der Simulation (schwarz) und Rekonstruktionsergebnis (rot).

Die seismische Interferometrie ermöglicht die Rekonstruktion von Informationen von Signalen und Informationen, die sich direkt auf Grund apparativer oder anderer Beschränkungen nicht direkt messen lassen. Dies lässt sich beispielsweise zur Interpolation fehlender A-Scans oder der Bestimmung des Quellsignals einsetzen. Diese Technik kann so zur Verbesserung der Abbildungsqualität beitragen.

Referenzen

- [1] Douma, J., Niederleithinger, E., Snieder, R., 2014, Improved Focusing Using Deconvolution Within A Concrete Block. DGZfP-Jahrestagung 2014, Potsdam.
- [2] Schöllig, C., Shokouhi, P., 2014: Untersuchung der Mikrostruktur von Beton mit zerstörungsfreien Prüfverfahren. DGZfP-Jahrestagung 2014, Potsdam.
- [3] Niederleithinger, E., Sens-Schönfelder, C., Grothe, S., Wiggerhauser, H., 2014, Coda Wave Interferometry used to localize compressional load effects in a concrete specimen. Accepted for EWSHM, Nantes.
- [4] Müller, S., 2014, Anwendung der Reverse Time Migration auf Ultraschall-Echo-Messungen in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen. DGZfP-Jahrestagung 2014, Potsdam.
- [5] Grohmann, M., Niederleithinger, E., 2014, Bestimmung der Geometrie einer Fundamentplatte mit dem Ultraschall-Echo-Verfahren unter Anwendung geophysikalischer Migrationsmethoden. DGZfP-Jahrestagung 2014, Potsdam.
- [6] Völker, C., Shokouhi, P., 2014, Multisensor-Datenfusion zur Ortung von Fehlstellen in Beton. DGZfP-Jahrestagung 2014, Potsdam.
- [7] Cotic, P., Niederleithinger, E., Stoppel, M., 2014, Unsupervised Fusion of Scattered Data Collected by a Multi-Sensor Robot on Concrete. DGZfP-Jahrestagung 2014, Potsdam.
- [8] Schuster, G., 2009, Seismic Interferometry. Cambridge: Cambridge University Press.
- [9] Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X., Verdel, A., 2010, Tutorial on Seismic Interferometry: Part 1 — Basic Principles and Applications. *Geophysics* 75 (5): 75A195. doi:10.1190/1.3457445.
- [10] Wang, Y., Luo, Y., Schuster, G., 2009: Interferometric Interpolation of Missing Seismic Data. *GEOPHYSICS* 74 (3) (May): SI37–SI45. doi:10.1190/1.3110072.
- [11] Behura, J., Snieder, R., 2013, Virtual Real Source: Source Signature Estimation Using Seismic Interferometry. *GEOPHYSICS* 78 (5): Q57–Q68. doi:10.1190/geo2013-0069.1.