

# Möglichkeiten der Full Waveform Inversion zur Abbildung in heterogenen Festkörpern

Ina REICHERT<sup>1</sup>, Martin SCHICKERT<sup>1</sup>, Tom LAHMER<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA Weimar), Weimar

<sup>2</sup> Bauhaus-Universität Weimar, Weimar

Kontakt E-Mail: [ina.reichert@mfpa.de](mailto:ina.reichert@mfpa.de)

## Kurzfassung

Die Ultraschallabbildung von Einzelobjekten in heterogenen Festkörpern wie Beton wird vor allem mit linearisierten Methoden durchgeführt, die auf eine Wellenart beschränkt sind und geometrische Reflexionen und Modenkonzersionen vernachlässigen. Dadurch ist die Rekonstruktionsgenauigkeit limitiert, und es können Artefakte induziert werden.

Indem mehr Informationen des vollständigen Wellenfeldes berücksichtigt werden, verspricht die Full Waveform Inversion (FWI) eine genauere Abbildung. Das Verfahren vergleicht die gemessenen Signale mit dem Ergebnis der Vorwärtsrechnung des Streufeldes der Signalquelle. Die Verteilung der Materialkennwerte wird iterativ so angepasst, dass die Differenz der berechneten zu den gemessenen Signalen minimiert wird. Durch ein realitätsnahes Vorwärtsmodell sind keine einschränkenden Annahmen über die Wellenausbreitung notwendig. Da das Problem schlecht gestellt (ill posed) ist, werden Regularisierungstechniken zur Stabilisierung eingesetzt.

Im Beitrag werden Arbeitsweise und Möglichkeiten des modellbasierten Ansatzes erläutert. Erste Ergebnisse an idealisierten Streugeometrien in homogenen und heterogenen Festkörpern, die auf synthetischen und messtechnischen Signalen basieren, werden vorgestellt.

# Möglichkeiten der Full Waveform Inversion zur Abbildung in heterogenen Festkörpern

Ina REICHERT<sup>1</sup>, Martin SCHICKERT<sup>1</sup>, Tom LAHMER<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFA Weimar)

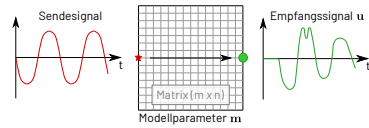
<sup>2</sup>Institut für Strukturmechanik, Bauhaus-Universität Weimar

## Motivation

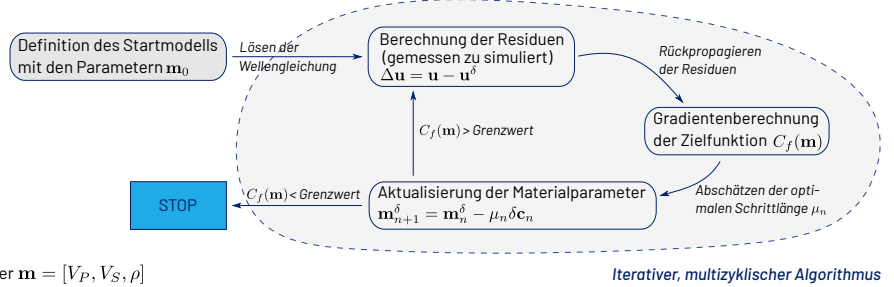
Im Bauwesen hat die Instandhaltung und Ertüchtigung bestehender Strukturen eine große Bedeutung. Besonders in Bezug auf die Infrastruktur wird die Wichtigkeit nochmals unterstrichen. Viele dieser Bauwerke wie Brücken und Stauwehren sind Masskonstruktionen, deren strukturelle Integrität grundlegend für die derzeitige und zukünftige Nutzung ist. Im Folgenden wird dargestellt, inwieweit die Full Waveform Inversion (FWI) die Schadensidentifikation am Beispiel von simulierten bzw. nachgebildeten Hohlstellen sowohl in der rein numerischen Betrachtung als auch mittels gemessener Ultraschallsignale unterstützen kann.

## Methode

- Überprüfung der Anwendbarkeit der FWI auf Betonstrukturen mittels skaliertem Modell im zweidimensionalen Raum
- Iteratives Lösen der elastischen Wellengleichung in 2D mit entsprechenden Anfangs- und Randbedingungen
- Vollständige Wellenausbreitung ohne Näherungen



- Berechnung des Minimums der Zielfunktion in Abhängigkeit der Materialparameter  $\mathbf{m} = [V_p, V_s, \rho]$
- Inverses, schlecht gestelltes Problem  $\rightarrow$  Numerisch schwierig zu lösen



Iterativer, multizyklischer Algorithmus

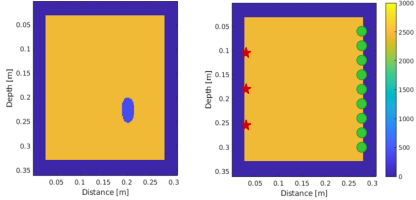
## Synthetische Messdaten

- Vollständiges Materialmodell mit Druckwellen  $V_p$ , Scherwellen  $V_s$  und Dichte  $\rho$
- Erzeugung künstlicher Messsignale am geschädigten Modell
- Durchführung der Full Waveform Inversion (FWI) am Startmodell (ungeschädigt) zur Detektion des künstlich eingebrachten Schadens



Video

### Geschädigtes Modell

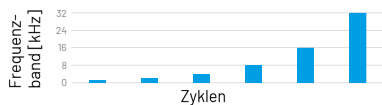


Materialparameter:  $V_s$  [m/s]  
Diskretisierungseinheit: 2 mm

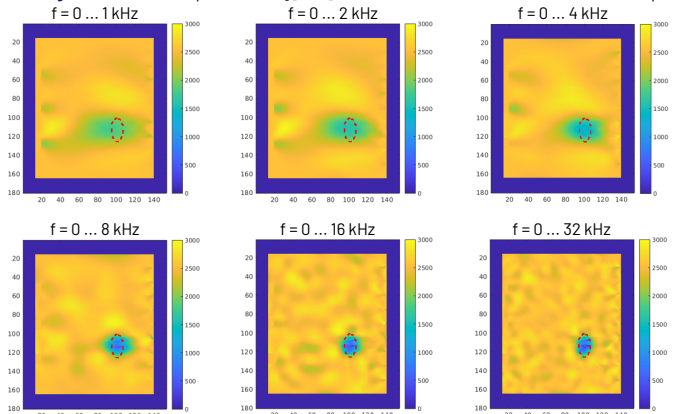
- ★ Sender (Anregung)
- Empfänger (Messaufnahme)

Material	$V_p$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Beton (gelb)	4124	2550	2289
Ellipse	103	64	57
Luft (blau)	332	0	1,25

- Multizyklische Analyse mit Verbreiterung des Frequenzbandes mit jedem Zyklus



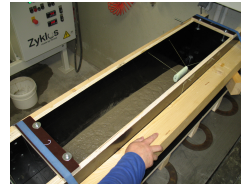
- FWI Ergebnisse für Modellparameter  $V_s$  [m/s]



- Hohe Frequenzen führen zum Auftreten unerwünschter Artefakte

## FWI mit realen Ultraschallmessdaten

- Herstellung eines Testkörpers aus Beton mit elliptischer Inklusion aus Styrodur  
Maße Testkörper: 120 x 25 x 30 cm<sup>3</sup>, Maße Ellipse: 10 x 2,5 x 5 cm<sup>3</sup> (TBH)

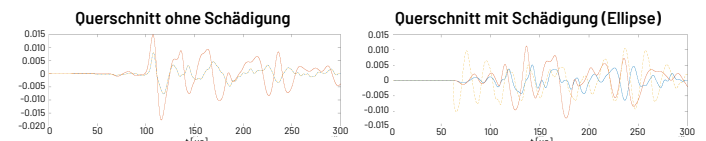


- Ultraschallmessungen in Transmission mit einem Sender und einem Empfänger
- Anregung und Messung der Transversalwelle

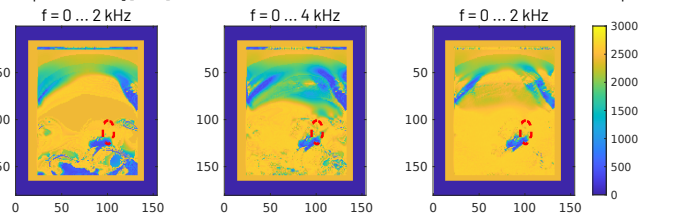
- ★ Sender (Anregung)
- Empfänger (Messaufnahme)

- Ermittlung der Transferfunktion an Messposition ohne Ellipse als Schaden (reiner Betonquerschnitt)

- Vergleich der gemessenen (—), der simulierten Empfangssignale (—) und der mittels Transferfunktion veränderten Messsignale (---)



- FWI Ergebnisse (Auszug) der multizyklischen Analyse unter Nutzung der Transferfunktion für Modellparameter  $V_s$  [m/s]



## Fazit

- Anwendbarkeit der FWI auf Betonstrukturen in Simulationen gezeigt
- Verbesserungspotential durch Verwendung mehrerer Sensoren und bessere numerische Beschreibung der Messsignale (Ankopplung, 2D/3D-Effekt, ...)

