

# Einsatz von Modellierung und Simulation bei der Planung, Analyse und Interpretation von Ultraschallprüfungen

Daniel ALGERNON<sup>1</sup>, Christian U. GROßE<sup>2</sup>

1 SVTI Schweizerischer Verein für technische Inspektionen, Wallisellen, Schweiz

2 Technische Universität München, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, München

**Kontakt:** Dr.-Ing. Daniel Algernon

SVTI Schweizerischer Verein für technische Inspektionen

Nuklearinspektorat, ZfP-Labor

Richtistrasse 15, 8304 Wallisellen, Schweiz

Tel.: +41-44-877-6259, E-Mail: daniel.algernon@svti.ch

**Kurzfassung.** Akustische Prüfverfahren wie Ultraschall und Impact-Echo sind ein wichtiges Werkzeug der Bauwerksdiagnose. Das Einsatzspektrum beinhaltet Dickenmessungen, die Darstellung der inneren Bauteilgeometrie ebenso wie die Ortung von Kiesnestern, Delaminationen oder u. U. die Ortung von Verpressfehlern im Innern metallischer Hüllrohre von Spannkanälen.

Grundsätzlich beruhen akustische Verfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) auf der Anregung elastischer Wellen, die mit dem Zielobjekt (z. B. zu detektierende Ungänge im Bauteil) an dessen akustischen Grenzfläche interagieren. Aus dem an der Bauteiloberfläche empfangenen Signal soll diese Interaktion erkannt und interpretiert werden, um Rückschlüsse auf das Vorhandensein des Zielobjektes zu ziehen sowie gegebenenfalls dessen Ausdehnung und Position (näherungsweise) zu bestimmen.

Obgleich die grundlegenden physikalischen Prinzipien der Anwendung elastischer Wellen in der ZfP bekannt sind, können komplexe Verhältnisse in Form von beschränkter Zugänglichkeit, Bauteilgeometrien oder Art und Form von Reflektoren die Durchführung und Auswertung kompliziert werden lassen. So ist bereits die Abschätzung der Erfolgsaussichten einer Prüfung oftmals nicht trivial.

Diese Umstände verdeutlichen die Bedeutung des Einsatzes von Simulationsrechnungen, die eine theoretisch fundierte Basis für die Prüfung ermöglichen und mit denen sich Prüfsysteme optimieren lassen.

Die dabei einsetzbaren Simulationsverfahren sind vielfältig. Gebräuchlich sind insbesondere die Finite-Elemente-Methode, die *Elasto Finite Integration Technique* sowie semi-analytische Berechnungsverfahren.

## 1. Motivation

Die Zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen mit akustischen Verfahren ist zu einem wichtigen Gebiet der Bauwerksdiagnostik geworden [1]. Vertreter dieser Verfahrensgruppe sind das Ultraschall-Puls-Echo- sowie das Impact-Echo-Verfahren. Ein gutes theoretisches Fundament ist erforderlich, um die Komplexität, die mit der Anwendung moderner akustischer Verfahren und insbesondere der Auswertung der Daten verbunden ist, zu



beherrschen. Ziel des Einsatzes von Modellierungs- und Simulationstechniken ist es, diese Komplexität zu beherrschen, beeinflussende Effekte zu identifizieren und zu verstehen sowie relevante Signalmuster zu erkennen.

Bei der Entwicklung von Messstrategien sollen Simulationsrechnungen vor allem in schwierigen Fällen, wie sie im Bauwesen aufgrund der Einzigartigkeit jedes einzelnen Bauwerks häufig vorkommen, Anhaltswerte für die beste Vorgehensweise, den notwendigen Aufwand und die zu erwartenden Erfolgsaussichten liefern. „Schwierig“ kann in diesem Fall bedeuten, dass eine eingeschränkte Zugänglichkeit zur Komponente besteht, ein unbekannter innerer Aufbau oder eine komplexe innere oder äußere Geometrie vorliegen.

Werden bei Messungen Vorort Daten angezeigt, ist deren Interpretation nicht immer einfach und eindeutig möglich. Durch Simulationsrechnungen kann hier unterstützend beigetragen werden, indem u. U. die simulierten Anzeigebilder unterschiedlicher Szenarien miteinander verglichen werden.

Allgemein ist die Auswahl des richtigen Prüfsystems eine wichtige Entscheidung in der Planung des Prüfprozesses. Simulationsrechnungen können auch hierbei helfen, das richtige Prüfsystem für den konkret vorliegenden Fall auszuwählen.

Bei der Entwicklung neuer Prüfsysteme oder Prüfköpfe unterstützen Simulationen die theoretisch fundierte Optimierung wesentlicher Parameter wie Frequenz, Prüfkopfdurchmesser, Bandbreite, Impulsform, sowie die Auswahl von Einzelschwinger-, Phased-Array- oder Sampling-Phased-Array, Wellenart, etc. Dadurch wird eine zielführende Vorgehensweise, Reduktion von Trial & Error-Versuchen und somit eine maßgebliche Zeit- und Kostenersparnis angestrebt.

Für die objektive Leistungsbeurteilung von Prüfsystemen hinsichtlich Messgenauigkeit, Fehlerauffindwahrscheinlichkeit und Falschalarmrate bezogen auf spezifische Fragestellungen bedarf es der systematischen Untersuchung an geeigneten Testkörpern und Testfehlern. Die Variation von Größe, Form, Lage und innerer Beschaffenheit der Testfehler lässt die notwendige Anzahl oft beträchtlich werden, insbesondere in Kombination mit den variierenden Parametern des umgebenden Testobjektes. Durch Simulationsrechnungen kann die Anzahl hingegen beträchtlich verringert werden, da die Variation hierin erfasst ist.

## **2. Physikalische Grundlagen akustischer ZfP-Verfahren**

### *Elastische Wellen in der ZfP*

Sowohl das Ultraschall- als auch das Impact-Echo-Verfahren beruhen auf der Erzeugung elastischer Wellen, welche das Bauteil durchlaufen und an akustischen Grenzflächen reflektiert bzw. gestreut werden. Derartige Grenzflächen können einerseits die Rückwand, Einschlüsse im Innern oder Inhomogenitäten sein.

Für die Interaktion einer elastischen Welle mit der Inhomogenität sind sowohl das Verhältnis der akustischen Impedanzen angrenzender Materialien als auch die Wellenlänge wichtige Größen.

Insbesondere Grenzschichten von Beton zu Luft erzeugen nahezu vollständige Reflexionen der einfallenden Wellen, da im Verhältnis zu Beton die akustische Impedanz von Luft nahezu Null ist. Dies betrifft insbesondere die Rückwand oder Delaminationen bzw. Hohlstellen im Bauteilinnern.

Vergleichsweise kleine Wellenlängen sind wesentlich empfindlicher hinsichtlich der Detektion kleiner Zielobjekte als große Wellenlängen [2] [3] [4]. Die minimale detektierbare Reflektorausdehnung beträgt etwa 50 % der Wellenlänge [5].

Dementsprechend durchdringen kleine Wellenlängen jedoch auch ein allgemein inhomogenes Materialgefüge schlechter als große Wellenlängen, da sie bereits an den werkstoffeigenen Inhomogenitäten gestreut werden, was einen höheren Störpegel (Gefügerauschen) und Energieverlust zur Folge hat. Aufgrund der damit verbundenen Beeinträchtigung bzw. Unterbindung der Prüfbarkeit ist die Wahl der Wellenlänge dementsprechend stets ein Kompromiss. Die Wellenlänge sollte somit so klein wie möglich, jedoch nur so klein wie es der Werkstoffzustand es zulässt, gewählt werden. Die Wellenlänge  $\lambda$  verhält sich inversproportional zur Schwingfrequenz  $f$ . Beide stehen über die materialabhängige Schallausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  in Zusammenhang:

$$c = \lambda * f \qquad \text{Gleichung 1}$$

Für den Einsatz an Beton werden vorwiegend Ultraschallprüfköpfe mit einer Mittenfrequenz in der Größenordnung von 50 kHz eingesetzt [5]. Bei einer Longitudinalwellengeschwindigkeit  $c_L$  von näherungsweise 4000 m/s in Beton ergibt sich somit eine Wellenlänge von  $\lambda = 8$  cm, bzw. bei einer Transversalwellengeschwindigkeit von etwa  $c_T = 2300$  m/s eine entsprechende Wellenlänge von etwa  $\lambda = 4.5$  cm.

### *Ultraschall-Puls-Echo*

Das Ultraschall-Puls-Echo-Verfahren [6] beruht auf einer Messung der Laufzeit einer ausgesendeten und empfangenen elastischen Impulsform. Dabei kommen sowohl Longitudinalwellen als auch Transversalwellen zum Einsatz. Neben der Anwendung konventioneller Prüfköpfe (Abbildung 1), die mit Gel an die Bauteiloberfläche angekoppelt werden, nutzen neuere Entwicklungen trocken angekoppelte Transversalwellenpunkt-kontaktprüfköpfe, die entweder zu einer einzigen Sender- bzw. Empfängergruppe quasi parallel geschaltet werden (Abbildung 2), oder aber in einer Sendesequenz im Sinne eines Sampling-Phased-Array [7] betrieben werden (Abbildung 3).



**Abbildung 1: Konventioneller Ultraschallprüfkopf zur Ankopplung mit Gel.**  
Bildquelle: Zimmermann [8].



**Abbildung 2: Ultraschallgerät basierend auf Transversalwellenanregung durch trocken angekoppelte Punktkontaktprüfköpfe, von denen je neun Stück als Sendergruppe und neun Stück als Empfängergruppe parallel geschaltet arbeiten, resultierend in einem S/E-Prüfkopf.  
Bildquelle: Zimmermann [8].**



**Abbildung 3: Ultraschallgerät basierend auf Transversalwellenanregung durch trocken angekoppelte Punktkontaktprüfköpfe und Auswertung auf Grundlage eines Sampling-Phased-Array-Algorithmus.  
Bildquelle: ACSYS.**

Zu beachten sind insbesondere die bei schrägem Einfall auf Grenzflächen auftretenden Modenumwandlungen zwischen den unterschiedlichen Wellenarten sowie Phasenverschiebungen und materialbedingte Frequenzfilterungen, welche zu scheinbaren Verformungen des Empfangssignals führen und die Auswertung somit erschweren können. Schnell kann es bei unkundiger Anwendung des Verfahrens aufgrund der vielfältigen Einflüsse und auftretenden Wellenanteile in den Empfangssignalen zu Fehldeutungen kommen. Die Aufnahme von Messspuren bestehend aus einer Vielzahl von Messpunkten und die anschließende bildgebende Darstellung erleichtern in vielen Fällen die Auswertung. In den erhaltenen Bildern können Muster erkannt und auf diese Weise leichter als Nutz- bzw. Störanteile identifiziert werden als es bei isolierten Einzelpunktmessungen (A-Bilder) der Fall wäre. Exemplarisch ist in Abbildung 4 der Aufbau eines entlang einer Messspur aufgenommenen Ultraschall-Echogramms (B-Bild) aus den einzelnen A-Bildern (Signal an einem Einzelmesspunkt) dargestellt.

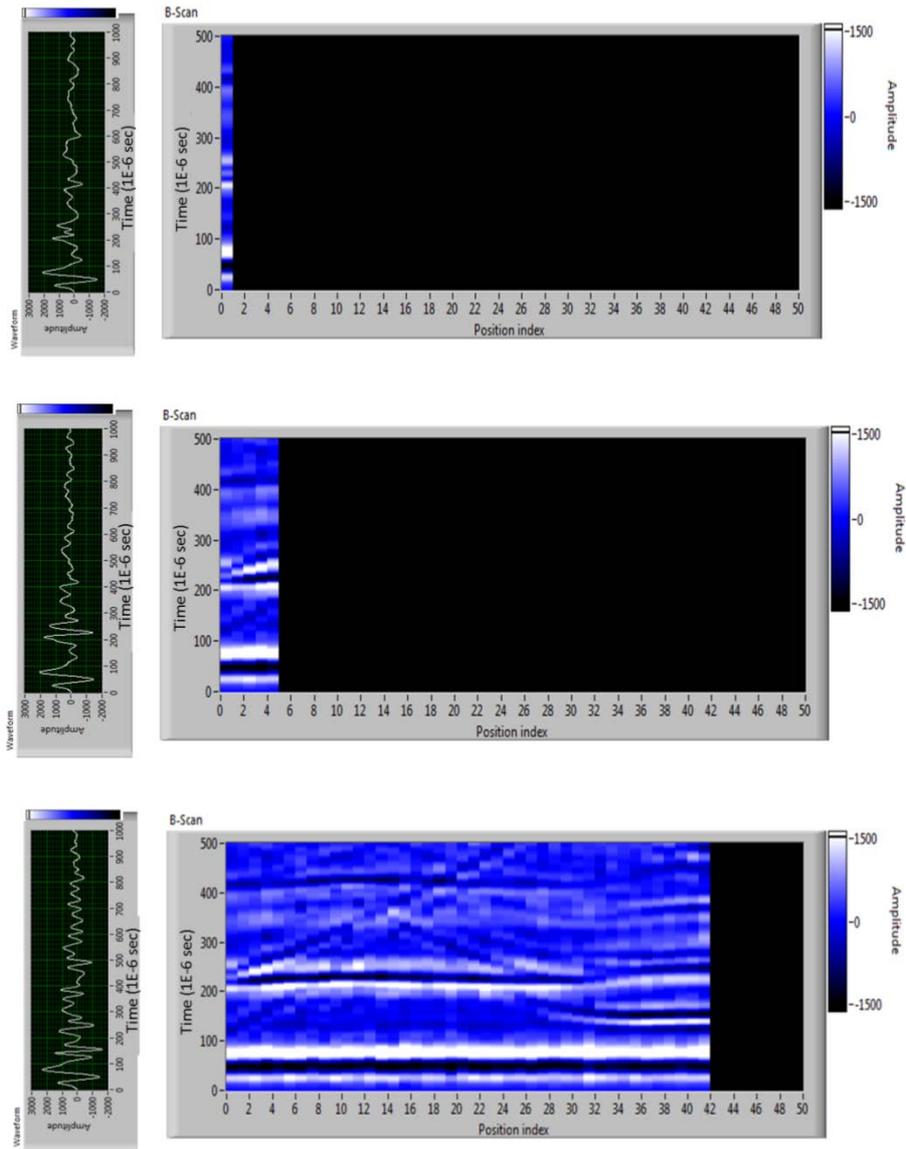


Abbildung 4: Illustration des Aufbaus eines Ultraschall-Puls-Echo B-Bildes entlang einer Messspur.

### *Impact-Echo*

Das Impact-Echo-Verfahren beruht auf der Nutzung multipler Reflexionen (Resonanzen) elastischer Wellen, welche durch den Aufprall einer kleinen Stahlkugel (mit einem Durchmesser von beispielsweise 10 mm) auf der Bauteiloberfläche erzeugt werden [9]. Die Auswertung erfolgt im Frequenzbereich, wodurch jene Resonanzen als signifikante Anzeigen hervorgehen (Abbildung 5). Unter Kenntnis der Schallausbreitungsgeschwindigkeit (Longitudinalwellengeschwindigkeit)  $c_L$  ergibt sich die Tiefe  $d$  der reflektierenden Schichtgrenze aus der entsprechenden Frequenzanzeige  $f$  gemäß Gleichung 2:

$$d = \frac{c_L}{2f} \quad \text{Gleichung 2}$$

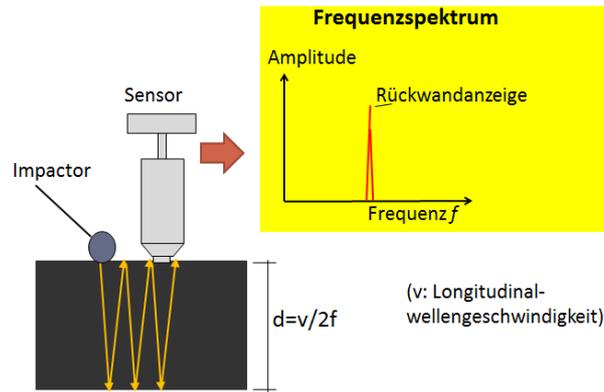


Abbildung 5: Messprinzip des Impact-Echo-Verfahrens.

Obwohl Gleichung 2 einen direkten Zusammenhang zwischen Frequenzanzeige  $f$  und Tiefe  $d$  suggeriert, ist die Auswertung in der Praxis oft sehr komplex. Die erwünschte Resonanz gemäß Gleichung 2 wird dann von anderen Effekten überlagert. Das können sehr ausgeprägte tiefe Frequenzen sein im Falle von oberflächennahen Ablösungen oder auch Geometrieeffekte, welche aus Reflexionen an den Seitenwänden kompakter Bauteile resultieren.

Die Interpretation des Impact-Echo-Verfahrens als Analyse multipler Longitudinalwellenreflexionen (Resonanzen) stellt eine Vereinfachung dar. Neuere Ansätze basieren auf der Annahme von Platteneigenschwingungen [10].

Auch beim Impact-Echo-Verfahren hat sich die Aufnahme entlang von Messspuren mit einer Vielzahl von Messpunkten als sehr hilfreich erwiesen um derartige Effekte zu identifizieren.

### 3. Simulationsmethoden

Im Folgenden soll ohne Anspruch auf Vollständigkeit ein kleiner Überblick über Berechnungsmethoden gegeben werden, welche für die Modellierung und Simulation elastischer Wellen in Frage kommen. Einige dieser Methoden sind bereits in kommerzieller Software implementiert.

Allgemein lassen sich Berechnungsmethoden vor allem in zwei Gruppe unterteilen, nämlich die analytischen Methoden einerseits und die numerischen Methoden andererseits. Analytische Methoden beruhen in erster Linie auf der Annahme von Schallstrahlen, entlang derer die entsprechenden Beziehungen in Form von Gleichungen angewendet werden. Numerische Methoden hingegen basieren auf der Diskretisierung des Volumens in Elemente. Vertreter dieser Gruppe sind die Finite-Elemente-Methode (FEM), die Finite-Differenzen-Methode (FDM) sowie die Elastodynamic Finite Integration Technique (EFIT). Allen numerischen Methoden gemeinsam ist die hohe Anzahl an notwendigen Diskretisierungspunkten im Volumen, an welchen die diskretisierten Gleichungen zu lösen sind. Dementsprechend länger dauern somit auch die Berechnungen im Vergleich zu den analytischen Methoden.

#### *Numerische Berechnungsmethoden*

Die Finite Elemente Methode (FEM) ist eine weit verbreitete Methode in vielen Bereichen des Ingenieurwesens sowie allgemein wissenschaftlich technischen Anwendungen [11]. Mit der FEM lassen sich physikalische Vorgänge, wie in diesem Fall die Ausbreitung einer elastischen Welle, in die Betrachtung einer Vielzahl von Elementen aufteilen. Deren

physikalisches Verhalten kann aufgrund ihrer einfachen Geometrie mit bekannten Ansatzfunktionen gut berechnet werden. Beim Übergang zwischen den Elementen müssen Stetigkeitsanforderungen erfüllt werden. So muss der Funktionsverlauf im Element durch Funktionswerte und Werte partieller Ableitungen in den Knotenpunkten ausgedrückt werden. Mit Hilfe der Knotenvariablen stellt sich die Ansatzfunktion als Linearkombination sogenannter Formfunktionen mit den Knotenvariablen als Koeffizienten dar. Die Lösung der entstehenden Gesamtmatrix ist je nach Anzahl der Elemente entsprechend rechenaufwendig.

FEM ist für die Simulation der Ausbreitung elastischer Wellen gut geeignet und kann in Form kommerzieller Software verwendet werden [12]. Für die ausreichend genaue Simulation der Ausbreitung elastischer Wellen muss die Diskretisierung ausreichend fein sein, um u. a. die verwendeten Wellenlängen erfassen zu können. Ebenso steht der Rechenaufwand in direktem Zusammenhang mit der Größe des zu betrachtenden Volumens. Insbesondere wenn Materialinhomogenitäten zu erfassen sind, wie Porosität und der heterogene Aufbau von Werkstoffen wie Beton, ist eine feine Diskretisierung notwendig. Der Rechenaufwand wächst dadurch beträchtlich und stellt eine Grenze in der Anwendbarkeit dieser ansonsten sehr leistungsfähigen Methode dar. Insbesondere übersteigen dreidimensionale Berechnungen in vielen Fällen den in der Praxis zur Verfügung stehenden Zeitrahmen sowie die Rechenkapazität.

Die *Elastodynamic Finite Integration Technique* (EFIT) [13] [14] stellt eine robuste und sehr effiziente numerische Berechnungsmethode zur Modellierung der Ultraschallwellenausbreitung in Festkörpern dar [15]. Bei EFIT werden die elastodynamischen Differentialgleichungen mittels der Finiten-Differenzen-Methode auf einem verschobenen Gitter (*staggered grid*) diskretisiert [16]. Der Algorithmus leitet sich aus der Integration und Diskretisierung der elastodynamischen Gleichungen her. EFIT eignet sich zur Modellierung und Simulation von ZfP-Anwendungen im Zeitbereich sowohl mit Ultraschall als auch Impact-Echo [17].

### *Analytische Berechnungsmethoden*

Bei Ray-Tracing-Algorithmen wird eine Wellenfront näherungsweise durch viele Strahlen dargestellt, wobei die Gesetzmäßigkeiten zur Ausbreitung, Brechung und Reflexion getrennt implementiert werden [18]. Eine effizientere Möglichkeit der Modellierung des Ultraschallwellenfeldes und dessen Interaktion mit Grenzflächen liefert die Gauß-Strahlen-Methode. Ein Gauß-Strahl ist eine paraxiale Näherungslösung der Wellengleichung [19], wobei der Strahl im Querschnitt die Form einer Gauß-Kurve mit einer längs der Ausbreitungsachse variierenden Breite besitzt. Die Transformation der Strahlen durch Brechung und Reflexion muss weiterhin an jeder Grenzfläche berechnet werden.

Der Vorteil dieser Methode ist allerdings, dass für die Simulation der meisten Prüfsituationen nur wenige Gauß-Strahlen notwendig sind.

Ebenfalls auf der Summation von Strahlen beruht die Pencil-Methode. Die Amplitude jedes Strahlenbündels, des sogenannten Pencils, wird in Abhängigkeit von der Strahllänge mit Hilfe eines paraxialen Strahls berechnet. Dieser beschreibt die Einhüllende um den axialen Strahl [20] [21] [19]. Diese Methode kommt in der kommerziellen Software CIVA [18] zur Simulation von Ultraschallinspektionen zum Einsatz. Die Generalisierte Punktquellensynthese (GPSS) [22] beruht auf der numerischen Integration über eine Oberfläche. Jeder Punkt auf dieser Fläche wird dabei selbst zur Quelle [23]. Die Ultraschallausbreitung und Interaktion mit den Defekten wird durch numerische Integration der Greenschen Funktionen [24] (d. h. der Materialparameter) zur zugrundeliegenden elastodynamischen Bewegungsgleichung berechnet. Diese Methode wird somit als

halbanalytisch eingeordnet. Die Simulation der Ausbreitung von Ultraschallwellen ist auch in komplexen Geometrien möglich [25].

Das Kirchhoff-Prinzip [26], das insbesondere zur Modellierung der Interaktion mit Fehlstellen oder Streuern im *UT-Modul* der am CEA (*Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives*) entwickelten Simulationsplattform CIVA [27] zum Einsatz. Es ist in Abbildung 6 illustriert.



Abbildung 6: Prinzip zur Erfassung der Interaktion eines einfallenden Wellenstrahls mit Grenzflächen in CIVA [28] nach Kirchhoff.

Bei Anwendung der Methode nach Kirchhoff zur Berechnung der Interaktion mit Streuern ist zu berücksichtigen, dass realistische Amplitudenwerte erhalten werden, solange die Größe (Radius)  $R$  des Streuers deutlich größer als die Wellenlänge  $\lambda$  ist und dementsprechend für das Produkt aus Wellenzahl  $k$  und Größe  $R$  gilt:

$$kR \gg 1 \quad \text{Gleichung 3}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{Gleichung 4}$$

Bei den analytischen Methoden hängt die Rechenzeit entscheidend von der Größe und Anzahl der zu berücksichtigenden Oberflächen ab. Dies können beispielsweise die Grenzflächen zwischen zwei Medien oder die Defektoberflächen sein. Der Rechenaufwand ist jedoch unabhängig vom Volumen des betrachteten Bauteils.

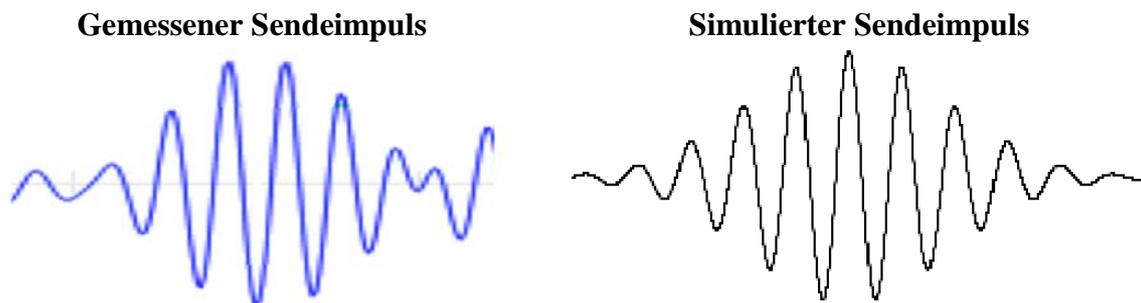
Sofern die vereinfachenden Annahmen semi-analytischer Ansätze insbesondere betreffend der Homogenisierung des Werkstoffs für den jeweiligen Anwendungsfall vertretbar erscheinen, stellt das CIVA\_Programmpaket eine mögliche Anwendungsalternative dar. Dieses erlaubt in zielgerichteter Weise die Modellierung von Prüfkopf, Prüfobjekt und darin enthaltenen Einschlüssen, Defekten und Strukturen. Die Berechnungsparameter lassen sich über eine ingenieurorientierte Benutzeroberfläche steuern. Zu beachten ist allerdings, dass CIVA primär für die klassischen Anwendungsbereiche der ZfP in der Kerntechnik ausgelegt ist und die im Bauwesen derzeit üblichen Transversalwellenpunktprüfungsköpfe sich nur über Vereinfachungen oder aufwendige Umwege realisieren lassen [8].

#### 4. Schallfeldberechnungen

Basis für die Prüfkopf- und Prüftechnikentwicklungen, Messstrategien sowie die Einschätzung der Leistungsfähigkeit von Prüfsystemen (wie sie in den nachfolgenden Abschnitten behandelt werden) ist die Kenntnis des Schallfeldes. Darunter wird die räumliche Verteilung des von einer Anregungsquelle ausgehenden und gegebenenfalls von

einem Empfänger aufgenommenen Schalldrucks verstanden. Eine Schallquelle strahlt Schall nicht nur in eine Richtung sondern in einem gewissen Winkelbereich ab. Der Querschnitt des Schallbündels wird mit zunehmender Entfernung grösser, so dass sich die Energie auf eine größere Fläche verteilt [5].

Um aussagekräftige Simulationsergebnisse zu erhalten, ist die möglichst realitätsnahe Berücksichtigung, d.h. Modellierung, des entsprechenden Prüfkopfes bzw. Anregungsimpulses von Wichtigkeit. Am Beispiel der CIVA-Berechnungssoftware sei hier die Vorgehensweise für einen konventionellen Longitudinalwellenprüfkopf (Abbildung 1) mit einer Mittenfrequenz von 54 kHz illustriert. Abbildung 7 zeigt auf der linken Seite die experimentell ermittelte Sendepulsform des Prüfkopfes. Auf der rechten Seite ist die in CIVA nachgebildete, d. h. modellierte, Impulsform abgebildet, auf deren Grundlage die Berechnungen erfolgen [8].



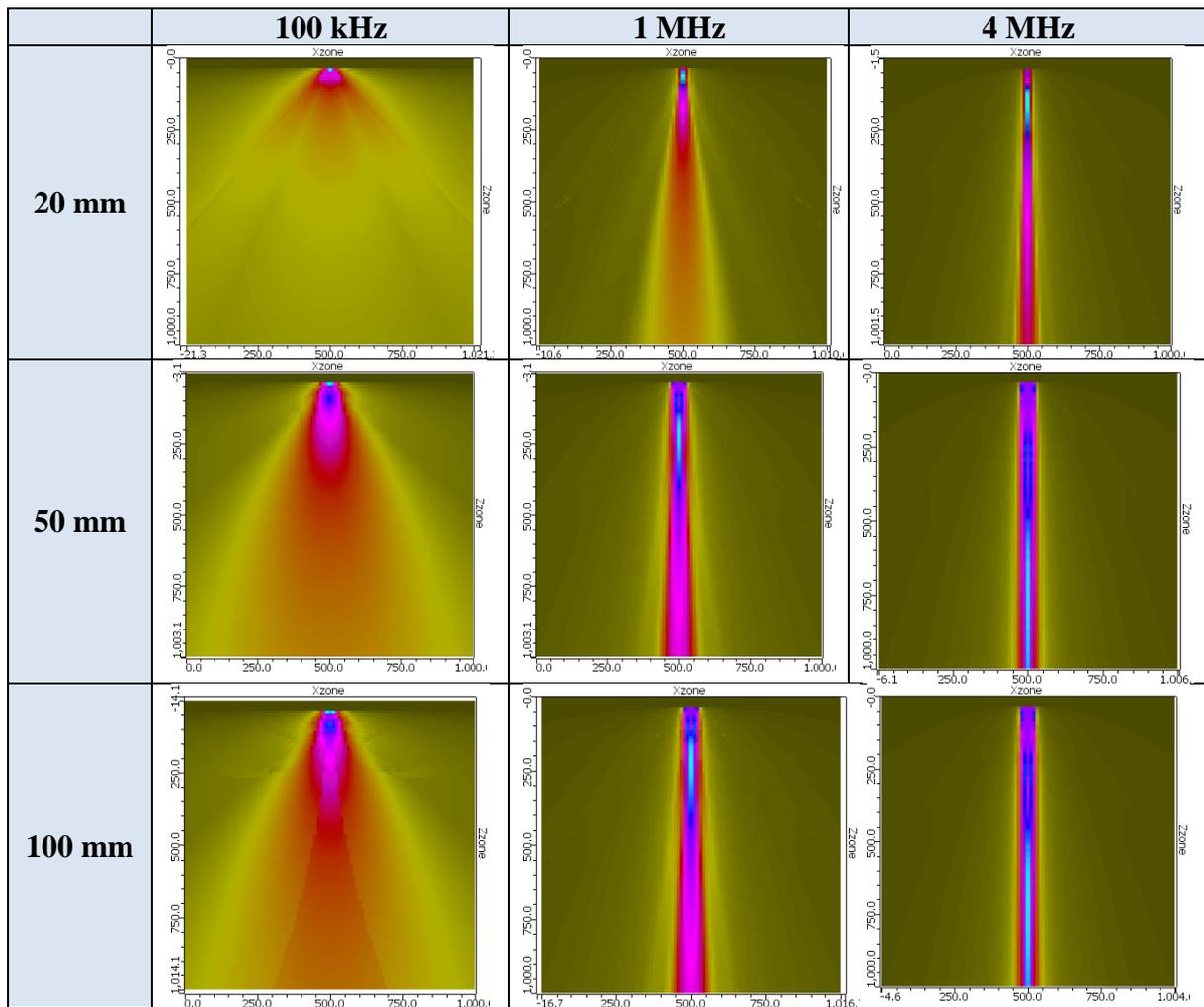
**Abbildung 7: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Sendepulsform eines schmalbandigen 54 kHz Longitudinalwellenprüfkopfes (links) sowie der in CIVA entsprechend modellierten Sendepulsform (rechts). Die Zeitachsen sind bei beiden Abbildungen gleich.  
Bildquelle: Zimmermann [8].**

Anhand der geometrischen Abmessungen des Schwingers sowie der Mittenfrequenz lässt sich das Schallfeld des Prüfkopfes in CIVA berechnen.

Tabelle 1 zeigt exemplarisch Schallfelder von Einzelschwingern als Funktion von Prüfkopfdurchmesser und Frequenz.

Ebenfalls lassen sich die ausbreitenden Wellenfronten sowie deren Interaktion mit den Grenzflächen des Testobjektes in Abhängigkeit der Zeit darstellen (Abbildung 8).

**Tabelle 1: Abhängigkeit des Schallfeldes von Prüfkopfdurchmesser (Zeile) und Frequenz (Spalte).**



**Abbildung 8: Simulation der Schalldrücke als Zeitschnitte unter Berücksichtigung der Interaktion mit den Bauteilgrenzflächen in der semi-analytischen Simulationsplattform CIVA.**

## 5. Berücksichtigung des inhomogenen Werkstoffs Beton

Seine relativ inhomogene Beschaffenheit macht den Werkstoff Beton im Vergleich zu beispielsweise ferritischem Stahl zu einem eher schwer prüfbar Werkstoff in Bezug auf akustische ZfP-Verfahren. Die Vielzahl der akustischen Grenzflächen zwischen Zuschlagkörnern, Zementmatrix und Luftporen führen je nach Wellenlänge zu Streu- und Beugungseffekten. Aus diesem Grunde wird die Wellenlänge angewandeter Prüfverfahren meist relativ groß gewählt, was zu Lasten des Auflösungsvermögens der Verfahren geht.

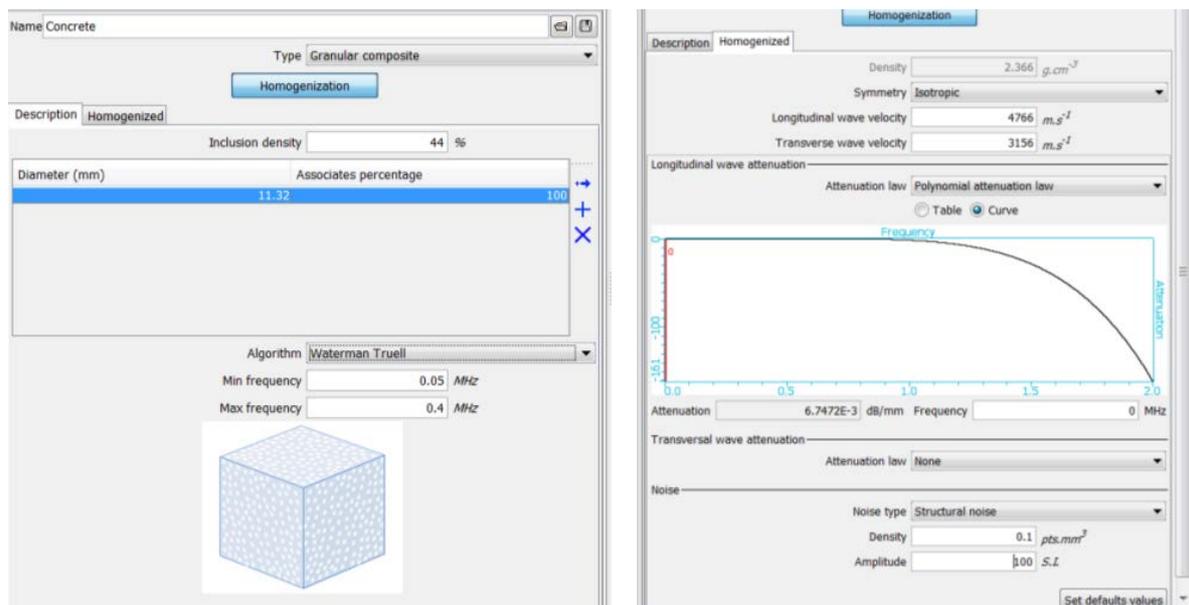
Durch eine Modellierung und Simulation kann die optimale Wellenlänge bestimmt und damit das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert werden.

Ist die Prüffrequenz (beispielsweise durch gerätetechnische Randbedingungen) festgelegt und zielt die Simulation vielmehr auf die Veranschaulichung der bei einer

Bauwerksprüfung zu erwartenden Anzeigemuster, so kann u. U. die vereinfachende Annahme eines homogenen Gefüges zunächst ihre Berechtigung haben. So lässt sich durch diese Vereinfachung i. d. R. Rechenzeit sparen. Wichtig ist allerdings, diese Vereinfachungen bei der Interpretation zu beachten, damit keine fehlerhaften Schlüsse gezogen werden.

Bei numerischen Verfahren lässt sich das inhomogene Gefüge durch Zuweisung entsprechend variabler elastischer Parameter zu den einzelnen Elementen modellieren. Um das wahre Gefüge erfassen zu können, ist allerdings meist eine feine Elementierung notwendig, wodurch sich die Rechenzeit beträchtlich erhöhen kann.

Bei analytischen und semi-analytischen Methoden kommt u. a. eine Homogenisierung des Werkstoffs mit ggf. anschließender Beaufschlagung mit einem Rauschanteil zum Einsatz (Abbildung 9).



**Abbildung 9:** Eingabemaske zur Berücksichtigung der inhomogenen Beschaffenheit des Werkstoffs Beton, der damit frequenzabhängigen Dämpfung sowie des Gefügerauschens bei semi-analytischer Berechnung und entsprechender Homogenisierung.

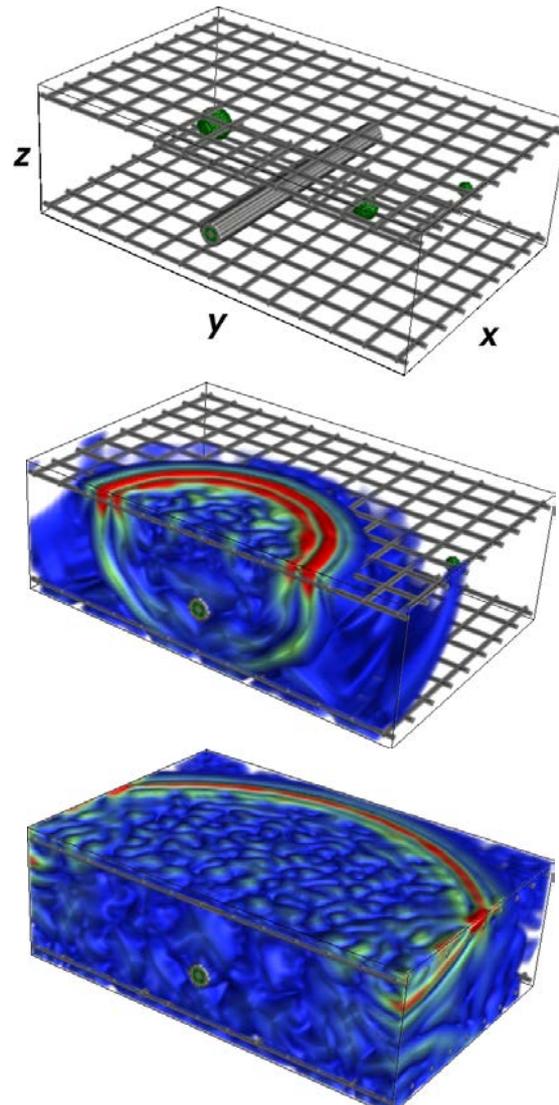
## 6. Modellierung und Simulation im Zusammenhang mit der Untersuchung der elastischen Wellenausbreitung bei akustischen ZfP-Verfahren

Für die effiziente Anwendung akustischer ZfP-Verfahren ist die Kenntnis des Wellenausbreitungsverhaltens der angeregten Wellen von elementarer Bedeutung. Während die grundsätzlichen Prinzipien der Ultraschallwellenausbreitung bei relativ homogenen Materialien (Metall) und im hohen Frequenzbereich (> 1 MHz) seit langem bekannt sind, besteht bei tieffrequenten Ultraschallanwendungen sowie dem Impact-Echo-Verfahren durchaus Forschungsbedarf. Für das Verständnis auftretender Phänomene oder die Verwendung neuartiger Prüfkopftypen ist eine vertiefte Kenntnis hinsichtlich der Wellenausbreitung notwendig. Die Durchführung experimenteller Untersuchungen ist wertvoll, aber mitunter aufwendig [29]. Simulationsrechnungen können hierbei hilfreich sein und einen Teil der experimentellen Kosten einsparen helfen.

Abbildung 10 zeigt exemplarisch Simulationsergebnisse der Ausbreitung elastischer Wellen in einem Stahlbetonkörper nach Impact-Anregung, die mit EFIT in Bezug auf das Impact-Echo-Verfahren generiert wurden. Der EFIT-Algorithmus ermöglicht dabei eine dreidimensionale Berechnung bei gleichzeitig sehr feiner Elementierung, die eine genaue

Einbeziehung des heterogenen Werkstoffs Betons (Zementmatrix, Zuschlag und Luftporen) erlaubt. Darüber hinaus sind im Modell die Gegebenheiten und Einbauten des Prüfobjektes einbezogen. In diesem Fall handelt es sich um einen Testkörper zur experimentellen Untersuchung. Darin eingebaut sind kugelförmige Hohlstellen in unterschiedlichen Tiefen sowie ein nur teilweise verpresstes metallisches Hüllrohr.

Durch einen experimentellen Aufbau konnten die Simulationsergebnisse validiert werden [30] [29]. Die Vorteile, die Simulationen hierbei bieten, sind sehr vielfältig. Die unterschiedlichen Wellenmoden können anders als im Experiment isoliert betrachtet werden, was eine klare Zuordnung der auftretenden Effekte erlaubt.



**Abbildung 10: 3D-EFIT-Simulation der Wellenausbreitung in einem Stahlbetonkörper nach mechanischer Impact-Anregung.**

Bildquelle: Schubert, Fraunhofer IKTS [31] [32].

## **7. Anwendung von Modellierung und Simulation zur Entwicklung und Optimierung von Prüfsystemen**

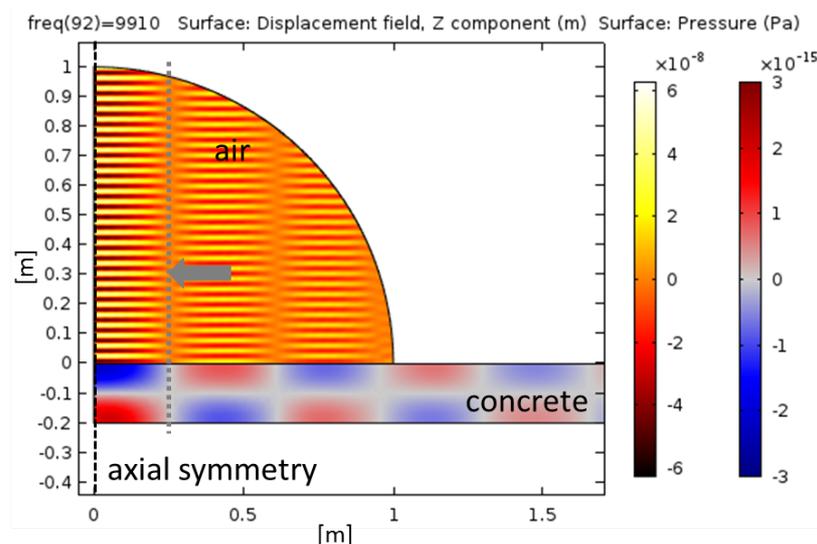
Eine wichtige Rolle spielen Modellierungs- und Simulationsmethoden insbesondere bei der Entwicklung und Optimierung von Prüfsystemen. Das soll im Folgenden an unterschiedlichen Beispielen illustriert werden.

### Beispiel: Impact-Echo in Luftankopplung

Beim Einsatz akustischer ZfP-Verfahren am inhomogenen und porösen Werkstoff Beton kommt der Optimierung des Signal-Rausch-Verhältnisses große Bedeutung zu. Die oft ausgedehnten Messflächen im Bauwesen erfordern zudem möglichst schnelle Verfahren. Die Bauteiloberflächen sind zudem meist rau und unregelmäßig. Diese Umstände machen den Einsatz luftgekoppelter Verfahren sehr attraktiv. Hierfür eignet sich grundsätzlich das Impact-Echo-Verfahren. Dabei erfolgt die Impact-Anregung weiterhin über Kontakt, d.h. Aufprall des kugelförmigen Impactors, der Sensor kann jedoch komplett berührungslos entlang der Bauteiloberfläche geführt werden [33]. Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses kann insbesondere die Kombination mehrerer Sensoren in Arrayform gegebenenfalls in Verbindung mit entsprechender Signalverarbeitung deutliche Vorteile bringen [34] [35].

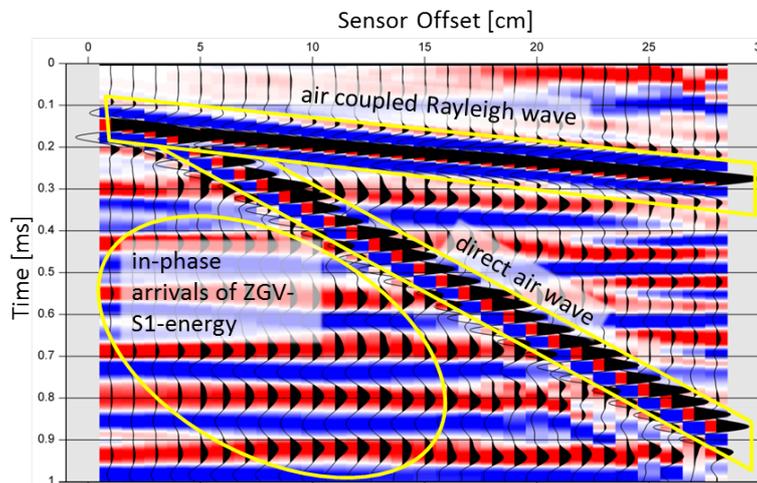
Durch Mittelung der Signale mehrerer Sensoren, die an verschiedenen Punkten um den Ort der Anregung herum angeordnet sind, kann das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert werden. Kohärente Anteile des eigentlichen Impact-Echo-Signals, d. h. jener Resonanzfrequenz, welche der Bauteildicke bzw. dem Teil oberhalb einer planaren akustischen Trennschicht (Delamination) zuzuordnen ist, überlagern sich positiv. Störanteile, wie elektrisches Rauschen, akustische Störungen und Seitenwandreflexionen der Rayleigh-Welle vermindern sich durch inkohärente Überlagerung. Eine Simulation zeigt, dass diese Form der Signalverbesserung umso ausgeprägter wird, je höher die Anzahl der Sensoren ist und je weiter diese verteilt sind. Dem entgegen wirkt jedoch, dass die Sensoren nur soweit verteilt sein dürfen, wie sichergestellt ist, dass die Nutzanteile an allen Sensoren noch kohärent sind [36].

Um die maximale Ausdehnung dieser örtlichen Verteilung bzw. die maximale Breite des Arrays zu bestimmen, wurden FEM-Simulationsrechnungen durchgeführt. Im Modell wird die Platte mittig mit der Frequenz angeregt, welche der Dickenresonanz entspricht (ZGV-S1 Mode). Die Abbildung 11 fasst die erhaltenen Ergebnisse zusammen. Ebene Wellenfronten werden innerhalb eines Bereiches abgestrahlt, der vom Anregungspunkt bis hin zum ersten Knotenpunkt des ZGV-S1 Modes reicht und in der Abbildung mit einem grauen Pfeil markiert ist. In diesem Bereich positionierte Sensoren würden kohärente Signale empfangen.



**Abbildung 11: FEM-Simulation des vertikalen Verschiebungsfeldes im Innern einer 20 cm dicken Betonplatte und des abgestrahlten Druckfeldes. Ein Bereich lässt sich deutlich identifizieren, innerhalb dessen die platzierten Sensoren kohärente Signale empfangen würden. Das ist der Bereich, der folglich für die Verwendung eines Mikrofon-Arrays geeignet wäre.**

Darüber hinaus zeigt Abbildung 12 die berechneten Amplituden-Zeitsignale in Abhängigkeit der Entfernung zur Anregungsquelle. Erkennbar sind hier die kohärenten Energieanteile aus dem ZGV-S1 Mode. Ebenfalls klar sichtbar sind die stark ausgeprägten Einsätze der direkten Luftwelle, die das Bauteil nicht durchläuft sondern auf direktem Wege von der Anregungsquelle zum Sensor wandert, sowie die Einsätze der Rayleigh-Welle am Ort des Empfängers.



**Abbildung 12: Ergebnis einer FEM-Simulation als Amplituden-Zeit-Darstellung in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Sensor und Anregungsquelle entlang der Messoberfläche beim Impact-Echo-Verfahren mit Luftankopplung**

Durch die Simulation wurde eine theoretisch fundierte Grundlage geschaffen, welche eine zielgerichtete Auslegung der Messvorrichtung erlaubt und die erzielbaren Ergebnisse optimiert [35]. Die Alternative einer alleinigen experimentellen Ermittlung wird als deutlich aufwendiger, fehleranfälliger und weniger flexibel eingeschätzt. Idealerweise ergänzen sich Simulation und Experiment im Rahmen einer effizienten Messentwicklung.

## 8. Simulationsgestützte Erarbeitung von Messstrategien

*Beispiel: Planung und Visualisierung von Schlüsselfaktoren und Herausforderungen bei der Bauwerksprüfung*

Bei der Planung und Durchführung zerstörungsfreier Prüfungen insbesondere an Betonbauteilen ist eine systematische Vorgehensweise notwendig. Wichtig ist hierbei, das Ziel der Prüfung klar definiert zu haben, d. h. die Frage, was gefunden oder bestimmt werden soll, muss klar definiert werden. Welche Schädigung ist relevant im Hinblick auf die Bauwerkeigenschaften? Diese Frage ist dann sukzessive weiter zu konkretisieren, z. B. auf die Größe, Gestalt, Oberflächenbeschaffenheit, Material des Reflektors. Ebenso wichtig ist die Konkretisierung der Randbedingungen für die Prüfung. Wie ist die Zugänglichkeit des Prüfobjektes, dessen Material, Oberfläche, Größe, Geometrie, innerer Aufbau, welche Einbauten befinden sich neben dem eigentlich zu ortenden Zielobjekt noch im Bauteil? Die entsprechende Planung ist nicht immer trivial und der Erfolg der Prüfung somit nicht immer von vornherein absehbar.

Eine mehrstufige Vorgehensweise in Form einer Vorstudie am Bauwerk, in der die generelle Machbarkeit unter den gegebenen Umständen untersucht wird hat sich in der Praxis bewährt. Diese kann im Vorfeld durch Modellierung und Simulation unterstützt werden und somit noch zielführender umgesetzt werden. So kann u. a. konkretisiert werden, welche Informationen und Parameter in der Vorstudie zu beschaffen sind. Die

anschließende Durchführung der Prüfung kann je nach Modellierungs- und Rechenaufwand näherungsweise simuliert werden. Ferner lässt sich abschätzen, welche Erwartungen an die Aussagekraft der Prüfung realistisch sind. Das theoretische Fundament für die Beantwortung von Fragen beispielsweise nach der notwendigen Messpunktdichte oder Wahl der Frequenz kann auf diese Weise geliefert werden.

Hierfür ist ein schnelles und effizientes Simulationsverfahren von Vorteil, ebenso wie eine Benutzeroberfläche, welche die Umsetzung der praktischen Gegebenheiten im Modell möglichst gut steuerbar macht.

Als Beispiel wird im Folgenden der Einsatz der CIVA-Plattform zu diesem Zweck demonstriert. Wie bereits erwähnt, ist hierbei zu beachten, dass CIVA per se nicht den derzeit im Bauwesen weit verbreiteten Prüfkopftyp zur Verfügung stellt, welcher trocken an das Bauteil angekoppelt wird und aus einem Array von Transversalwellenpunkt-kontaktprüfköpfen besteht. Um dennoch aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wären entweder Vereinfachungen oder eine spezielle Vorgehensweise notwendig, wie es von Zimmermann [8] angesprochen wurde.

Exemplarisch zeigt Abbildung 13 das Ergebnis einer Simulation an einem Testkörper zur Verdeutlichung von Anzeigemustern im Vorfeld von Bauwerksuntersuchungen. Darin enthalten sind Geometrieänderungen verschiedener Größe, senkrechte Oberflächentrennungen an der Bauteilinnenseite sowie zylinderförmige Einschlüsse. Letztere können beispielsweise repräsentativ für Hüllrohre angesehen werden. Sie haben einen Durchmesser von 80 mm bzw. 40 mm und sind in unterschiedlichen Tiefen und unterschiedlichen Abständen zueinander angeordnet. In den Simulationsergebnissen sind u. a. die Reflexionshyperbeln gut erkennbar, ebenso der Einfluss von Longitudinal- und Transversalwellen bzw. Modenumwandlungen, welche das Anzeigebild komplex werden lassen. Klar wird hierbei auch, dass ohne weitergehende Signalverarbeitung die Auflösung der dicht neben- und untereinander angeordneten Zylinder kaum möglich ist.

Das Anzeigebild von Abbildung 13 ist komplex und ohne ausreichende Erfahrung unter realen Messbedingungen wahrscheinlich schwierig zu interpretieren, obgleich der Messpunkt- abstand mit 10 mm sehr eng gewählt wurde. In der Praxis wird zur Reduktion der Messzeit angestrebt werden, den Messpunkt- abstand nur so eng wie notwendig zu wählen. Simulationsrechnungen helfen diesen bereits im Vorfeld näherungsweise zu bestimmen. Exemplarisch zeigt Abbildung 14 das Pendant zu Abbildung 13 mit weiterem Messpunkt- abstand von neu 100 mm. Während in Abbildung 13 die auftretenden Effekte aufgrund der zusammenhängenden Muster trotz aller Komplexität noch gut identifizierbar sind, ist die Identifikation in Abbildung 14 erschwert.

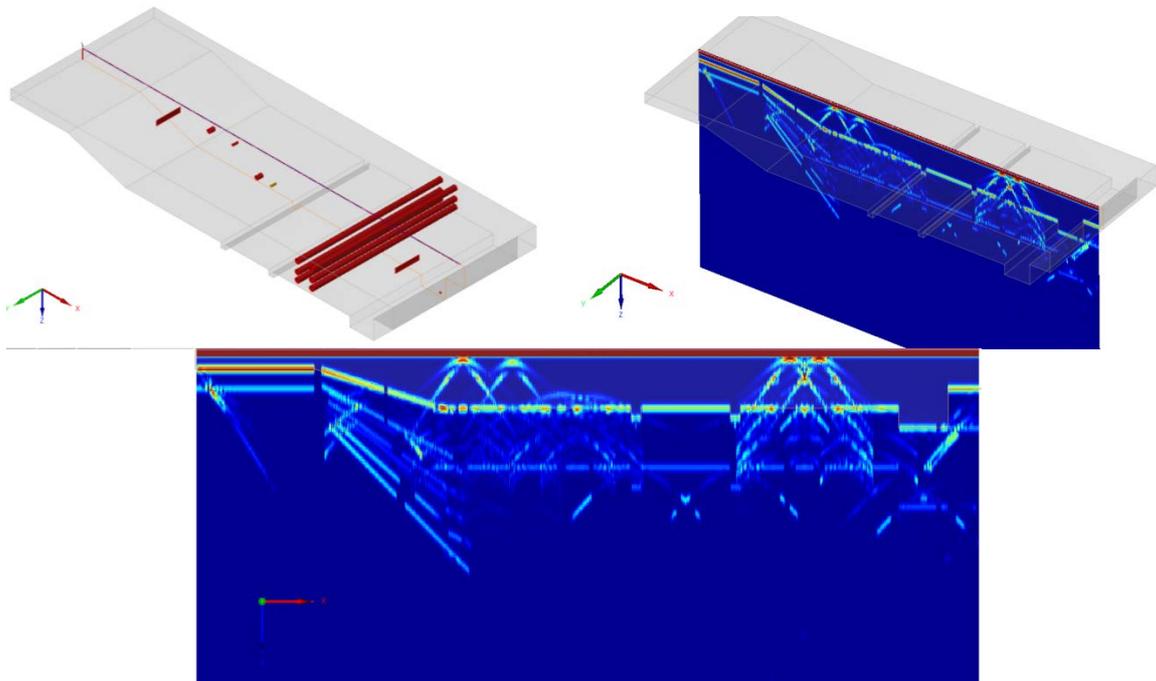


Abbildung 13: Exemplarische CIVA-Simulation an einem virtuellen Testkörper, um relevante Anzeigemuster im Vorfeld einer Bauwerksuntersuchung zu verdeutlichen.

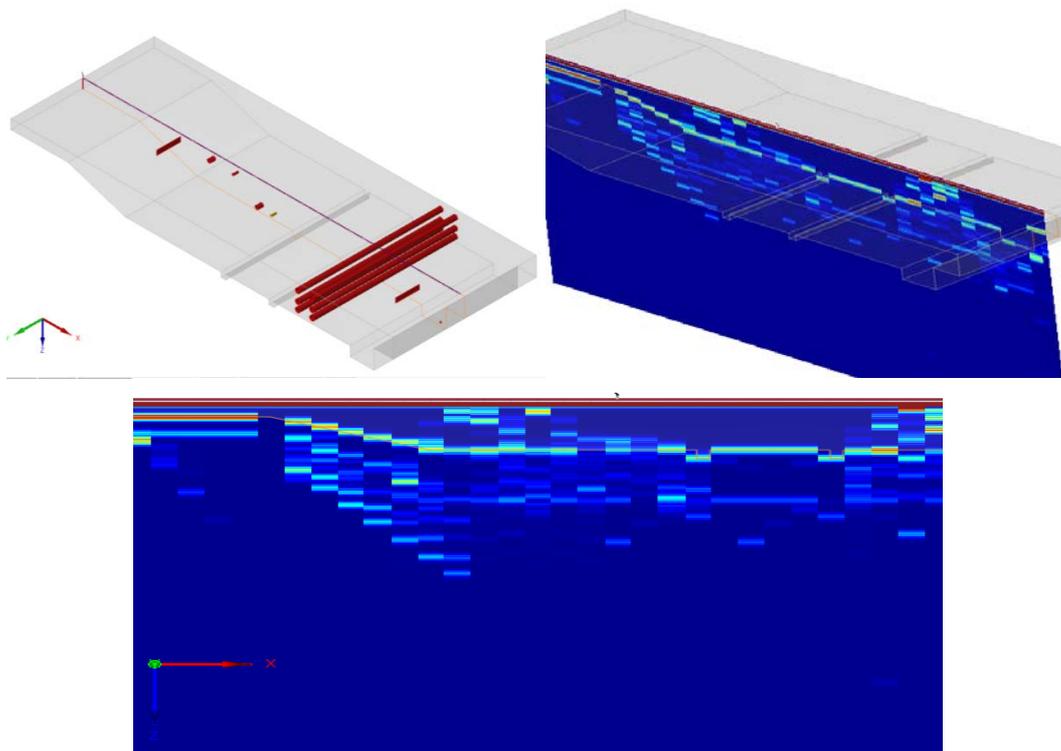
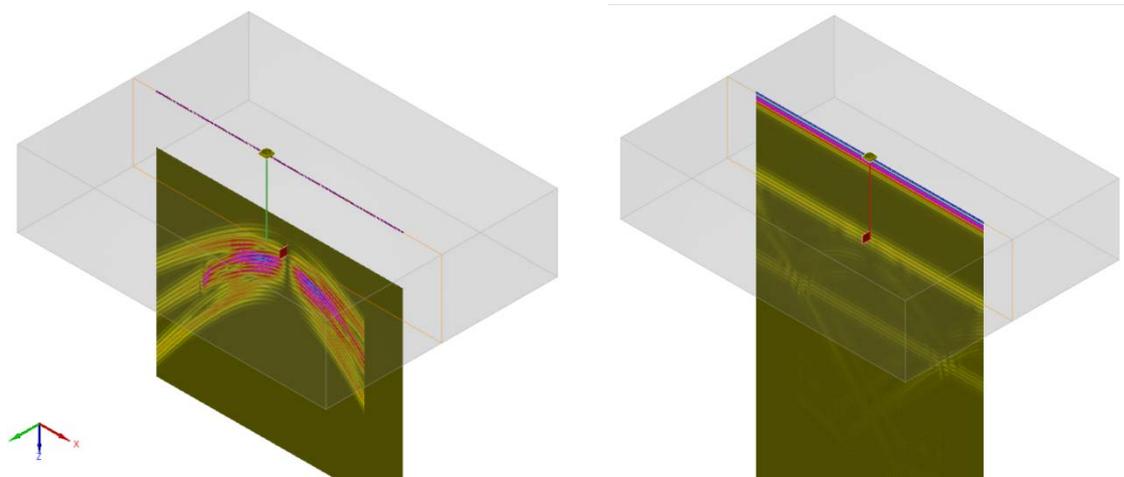


Abbildung 14: Exemplarische CIVA-Simulation an einem virtuellen Testkörper, analog zu Abbildung 13, jedoch mit erhöhtem Messpunktabstand von 100 mm.

*Beispiel: Prüftechnik zur Charakterisierung vertikaler Materialtrennungen an der Bauteilinnenseite*

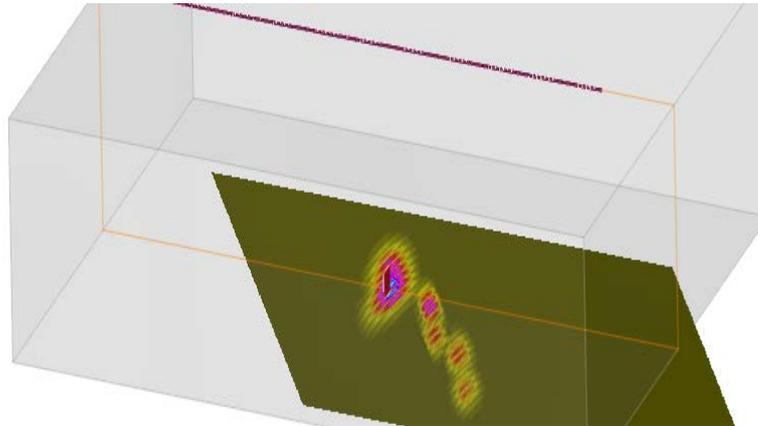
Zur Identifikation senkrechter planarer Trennungen, wie z. B. Rissen, welche bei einseitig zugänglichen Bauteilen von der Bauteilinnenoberfläche ausgehen, ist auf die starke Überlagerung des Fehlerechos durch das Rückwandsignal zu achten. In Abbildung 15 ist das simulierte Messergebnis für einen senkrecht in das Bauteil einschallenden schmalbandigen Prüfkopf dargestellt. Ziel der Untersuchung wäre es, eine klare Anzeige des Defektes in Form eines Musters zu erhalten, wie es links im Bild ersichtlich ist. In der Berechnung, die diesem Bild zugrunde liegt, wurde lediglich die Interaktion der elastischen Wellen mit dem Defekt berücksichtigt, um das Defektmuster, d. h. den bei der Prüfung zu identifizierenden Effekt, möglichst klar erkennbar zu machen. Um die Frage zu beantworten, ob ein derartiger Defekt tatsächlich detektiert und gegebenenfalls sogar dessen Tiefenausdehnung bestimmt werden kann, ist insbesondere noch die Anzeige zu berücksichtigen, die sich aus der Reflexion an der Bauteilrückwand ergibt. Diese ist in der Berechnung einbezogen, welche die rechte Grafik in Abbildung 15 zeigt. Man erkennt, dass die Detektion allenfalls durch die hyperbelförmige Anzeige unterhalb der Rückwand möglich ist, das eigentliche Fehlermuster jedoch von der starken Rückwandanzeige überdeckt wird. Hingegen sind sowohl die Mehrfachreflexionen an der Rückwand als auch die Seitenwandeffekte klar erkennbar. Um den Fokus auf die Problematik des Fehlers nahe der Rückwand zu legen, wurden Rauscheinflüsse aus der inhomogenen Gefügestruktur des Werkstoffs Beton zunächst nicht berücksichtigt.



**Abbildung 15: Simulationsergebnisse zur Einschätzung der Detektierbarkeit einer senkrechten planaren Trennung nahe der inneren Bauteiloberfläche mit einem Senkrechtprüfkopf.**  
Links im Bild ist das Ergebnis unter alleiniger Berücksichtigung der Interaktion der elastischen Welle mit dem Defekt, d.h. das Prüfziel dargestellt.  
Rechts im Bild ist das Ergebnis unter Einbeziehung der Rückwandreflexion dargestellt. Das starke Rückwandecho überlagert das Messergebnis, so dass die Detektion des Defektes in dieser Prüfanordnung wohl praktisch unmöglich wäre.

Durch die Simulation wird deutlich, dass ein derartiger Defekt tatsächlich ein prägnantes Muster erzeugt. Dieses lässt sich jedoch nur nutzen, wenn es gelingt, das Rückwandecho zu eliminieren. Generell wären hierfür entsprechende Signalverarbeitungsansätze denkbar. Für eine Anhebung des Defektechos gegenüber der Rückwandanzeige käme beispielsweise eine Schrägeinschallung in Frage, wie sie entweder über einen Phased-Array-Aufbau oder durch einen auf elektronische Weise fokussierenden Prüfkopf möglich wäre. Dem letzterer Ansatz liegt der Simulation zugrunde, deren Ergebnisse in Abbildung 16 dargestellt sind. Das prägnante Anzeigemuster enthält dabei Anteile aus dem Rissspitzenecho, der

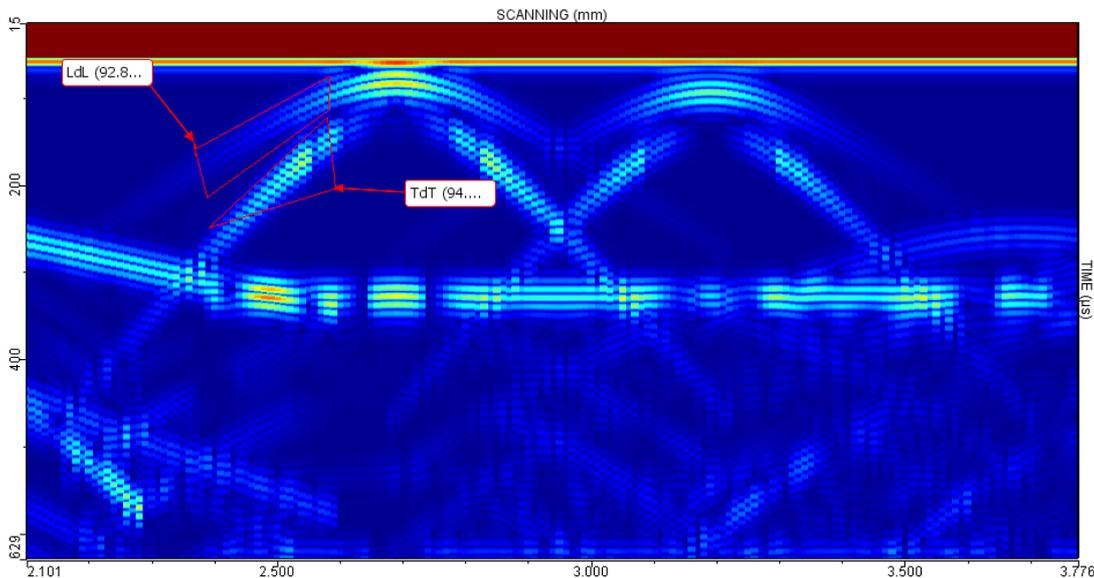
Fußpunktanzeige sowie Modenumwandlungen von Transversalwelle zu Longitudinalwelle und umgekehrt.



**Abbildung 16: Simulationsergebnisse für Longitudinalwellenschrägeinschallung. Durch die Schrägeinschallung gelingt es die Rückwandreflexion zu eliminieren, bzw. gelangt diese nicht mehr an die Prüfkopfposition zurück.**

*Beispiel: Entschlüsselung von Anzeigenmustern durch Modenidentifikation*

Die Zuordnung der erhaltenen Anzeigen im Feld ist oftmals schwierig. Simulationen können hier einen entscheidenden Beitrag leisten, da sich die synthetisch erzeugten Anzeigen klar den entsprechenden Wellenmoden zuordnen lassen, wie in Abbildung 17 am Beispiel einer CIVA-Simulation gezeigt ist.



**Abbildung 17: Modenidentifikationswerkzeug in CIVA, hier demonstriert an der Zuordnung der Hyperbeln zu Longitudinalwellen- und Transversalwellenanteilen.**

Die Codierung als LdL bezeichnet die ausgesendete Longitudinalwelle (L), welche auf den Defekt (d) trifft und als Longitudinalwelle (L), d.h. ohne Modenumwandlung am Messort wieder empfangen wird. Analoges gilt für die Transversalwelle (T).

*Beispiel: Parameterstudien für die Beurteilung des Leistungsvermögens von ZfP-Systemen*

Um belastbare Informationen aus ZfP-Untersuchungen zu gewinnen, ist die Kenntnis des Leistungsvermögens, d.h. insbesondere der Messgenauigkeit, Fehlerauffindwahrscheinlich-

keit sowie Falschalarmrate von Wichtigkeit [37] [38] [39]. Diese Informationen können durch eine systematische Untersuchung insbesondere an Testkörpern unter kontrollierten Bedingungen, an denen die Größen bekannt sind, gewonnen werden. Dies kann jedoch eine hohe Anzahl notwendiger Testfehler und Testfehlervariationen bedeuten. Die Unterstützung derartiger Studien durch Simulationsrechnungen verbessert die Effizienz solcher Untersuchungen, da nach erfolgter Validierung des Modells an einer vertretbaren Anzahl repräsentativer Testfehler die Variation im Modell vorgenommen werden kann. Ebenfalls lassen sich hierdurch deutlich mehr unterschiedliche Rahmenbedingungen simulieren als es bei Testkörperversuchen aufgrund praktischer Gesichtspunkte der Fall wäre.

Dabei darf die notwendige Kalibrierung und Validierung des Modells anhand tatsächlicher Messergebnisse nicht vergessen werden.

## **9. Schlussfolgerung**

Simulationsrechnungen mit leistungsfähigen Berechnungsmethoden können einen wertvollen Beitrag auch für die ZfP im Bauwesen liefern. Anwendungen im Zusammenhang mit sowohl dem Ultraschall- als auch dem Impact-Echo-Verfahren wurden demonstriert. Prüfsystementwicklungen und -optimierungen können durch Simulationen zielführend unterstützt werden. Allgemein liefern Simulationsergebnisse ein solides theoretisches Fundament für die Durchführung der Prüfung und letztlich für Entscheidungen hinsichtlich der Interpretation von Befunden.

Hinsichtlich der unterschiedlichen Berechnungsmethoden, welche zur Modellierung und Simulation elastischer Wellen im Zusammenhang mit ZfP-Untersuchungen wie Ultraschall oder Impact-Echo geeignet sind, ist grundsätzlich zwischen der Gruppe der numerischen Verfahren einerseits und der Gruppe der analytischen bzw. semi-analytischen Verfahren andererseits zu unterscheiden.

Numerische Verfahren verursachen in der Regel einen deutlich höheren Rechenaufwand als analytische Verfahren. Numerische Verfahren eignen sich vor allem zur detaillierten Untersuchung komplexer Zusammenhänge und Interaktionen. Eine ausreichend feine und sinnvolle Elementierung vorausgesetzt, lassen sich hierdurch aussagekräftige und detaillierte Ergebnisse erzielen.

Analytische Berechnungsmethoden sind neben dem geringeren Rechenaufwand weitgehend unabhängig von der Größe des zu untersuchenden Volumens. Dieser Gruppe von Berechnungsmethoden kann in den Fällen zum Einsatz kommen, in denen zunächst die Annahme eines homogenen Materials und gegebenenfalls nachträgliche pauschale Beaufschlagung mit einem Gefügerauschanteil für die jeweilige Betrachtung ausreichend ist.

Anhand des Softwarepaketes CIVA wurden die Vorteile im Hinblick auf Handhabung und Visualisierung demonstriert. Es ist jedoch zu beachten, dass CIVA Lösungen für die klassische ZfP z. B. in der Kerntechnik bietet, jedoch derzeit nicht alle Randbedingungen des Bauwesens (z. B. Prüfkopftypen) abdeckt.

Bei der Planung von ZfP-Untersuchungen Vorort können Simulationsrechnungen prinzipiell den Anwender dabei unterstützen, das Prüfproblem und die entsprechenden Herausforderungen zu erfassen und zu veranschaulichen, um basierend darauf eine effiziente Messstrategie zu entwickeln. Hier gibt es allerdings noch Forschungsbedarf.

## 10. Danksagung

Die Autoren danken Herrn Dr.-Ing. Frank Schubert vom Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS für die Bereitstellung von Abbildungen zur Anwendung der EFIT-Methode sowie Herrn Dipl.-Geophys. Robin Groschup vom Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung der Technischen Universität München für Abbildungen zur Simulation luftgekoppelter Impact-Echo-Array-Anwendungen. Ebenfalls gedankt sei Herrn Martin Zimmermann, M.Sc., der Beispiele zur Anwendung von CIVA im Rahmen seiner Masterarbeit am SVTI erarbeitete und Abbildungen für diesen Beitrag zur Verfügung stellte.

## 11. Referenzen

- [1] H. Wiggenhauser und E. Niederleithinger, „Editorial: Bautechnik 10/2015,“ *Bautechnik*, Bd. 92, Nr. 10, pp. 675-676, 2015.
- [2] J. Krautkrämer und H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer, 1990.
- [3] K.-J. Langenberg, *Vorlesungen über theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Gesamthochschule Kassel, 1988.
- [4] H. F. Pollard, *Sound waves in solids*, London: Pion Ltd., 1977.
- [5] V. Deutsch, M. Platte, W. A. K. Deutsch, V. Schuster und M. Vogt, *Die Ultraschallprüfung (UT)*, 2 Hrsg., Wuppertal: Castell-Verlag, 2010.
- [6] M. Krause, „Ultraschallechoverfahren an Betonbauteilen,“ in *Bauphysik-Kalender*, E. Cziesielski, Hrsg., Berlin, Ernst & Sohn, 2004, pp. 341-352.
- [7] L. von Bernus, A. Bulavinov, D. Joneit und M. Kröning, „Sampling Phased Array A New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging,“ in *ECNDT*, Berlin, 2006.
- [8] M. Zimmermann, *Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Simulationssoftware CIVA für niederfrequenten Ultraschall an Beton*, Berlin: Masterarbeit an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 2015.
- [9] M. J. Sansalone und W. B. Streett, *Impact-Echo. Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry.*, Jersey Shore, PA (USA): Bullbrier Press, 1997.
- [10] A. Gibson und J. Popovics, „Lamb Wave Basis for Impact-Echo Method Analysis,“ *Journal of Engineering Mechanics*, Bd. 131, Nr. 4, pp. 438-443, 2005.
- [11] G. Dhatt, G. Touzot und E. Lefrancois, *Finite Element Method*, London (UK) & Hoboken, NJ (USA): Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [12] „COMSOL-Multiphysics,“ Comsol, [Online]. Available: <http://www.comsol.com>.
- [13] P. Fellingner, *Ein Verfahren zur numerischen Lösung elastischer Wellenausbreitungsprobleme im Zeitbereich durch direkte Diskretisierung der elastodynamischen Grundgleichungen*, Kassel: Dissertation, Gesamthochschule Kassel, 1991.
- [14] P. Fellingner, R. Marklein und K. J. Langenberg, „Numerical Modeling of Elastic Wave Propagation and Scattering with EFIT - Elastodynamic Finite Integration TEchnique,“ *Wave Motion*, Bd. 21, pp. 47-66, 1995.
- [15] R. Marklein, K. J. Langenberg und K. Mayer, „EFIT Simulations for Ultrasonic NDE,“ *Journal of Nondestructive Testing*, Bd. 8, Nr. 3, p. 1–6, 2003.

- [16] T. Bohlen und E. H. Saenger, „Accuracy of Heterogeneous Staggered-Grid Finite-Difference Modeling of Rayleigh Waves,“ *Geophysics*, Bd. 71, Nr. 4, pp. 109-115, 2006.
- [17] F. Schubert, „Numerical time-domain modeling of linear and nonlinear ultrasonic wave propagation using finite integration techniques – Theory and applications,“ *Ultrasonics*, Bd. 42, pp. 221-229, 2004.
- [18] R. J. Lytle und K. A. Dines, „Iterative Ray Tracing between Boreholes for Underground,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Bd. 18, Nr. 3, p. 234–240, 1980.
- [19] R. Scheben, Algorithmen zur 3D-Ultraschall Simulation, Stuttgart: Dissertation an der Universität des Saarlandes, 2012.
- [20] N. Gengembre und A. Lhemery, „Pencil Method in Elastodynamics: Application to Ultrasonic Field Computation,“ *Ultrasonics*, Bd. 38, Nr. 1-8, pp. 495-499, 2000.
- [21] N. Gengembre, „Pencil Method for Ultrasonic Beam Computation,“ *Proceedings of the 5th World Congress on Ultrasonics*, p. 1533–1536, 2003.
- [22] M. Spies, „Semi-Analytical Elastic Wave-Field Modeling Applied to Arbitrarily Oriented Orthotropic Media,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 110, Nr. 1, pp. 68-79, 2001.
- [23] M. Spies, „Simulation of Ultrasonic Testing of Complex-Structured Materials and Components,“ *Proceedings of the 1999 IEEE Ultrasonics Symposium*, Bd. 1, pp. 791-800, 1999.
- [24] H. M. Fried, *Freen's Functions and Ordered Exponentials*, Cambridge (UK): Cambridge University Press, 2004.
- [25] L. W. Schmerr und S. J. Song, *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems: Models and Measurements*, Springer, 2007.
- [26] Y. Pao und V. Varatharaju, „Huygens' principle, radiation conditions and integral formulas for the scattering of elastic waves,“ *Journal of the acoustical Society of America*, Bd. 59, Nr. 6, pp. 1361-1371, 1976.
- [27] S. Mahaut, S. Lonne und L. de Roumilly, „Validation of CIVA Simulation Tools for Ultrasonic Inspection in Realistic Configuration,“ in *Proceedings of the ECNDT 2006*, Berlin, 2006.
- [28] General Introduction to CIVA, Massy: EXTENDE S.A..
- [29] D. Algernon, *Impact-Echo: Analyse akustischer Wellen in Beton*, Berlin: Dissertation an der Technischen Universität Berlin (<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-1380>), 2006.
- [30] B. Köhler, F. Schubert, D. Algernon, A. Gardei, F. Mielentz und M. Krause, „Experimental Study of Elastic Waves in Concrete for NDE in Civil,“ in *Proceedings of the 31st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Iowa State University, 2004.
- [31] F. Schubert und R. Marklein, „Numerical Computation of Ultrasonic Wave Propagation in Concrete using the Elastodynamic Finite Integration Technique (EFIT),“ *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, München*, pp. 778-783, 2002.
- [32] C. Große, H. Wiggemhauser, D. Algernon, R. Beutel und F. Schubert, „Impact-Echo,“ in *Betonkalender*, Ernst & Sohn, 2007, pp. 496-505.
- [33] J. Zhu und J. S. Popovics, „Imaging Concrete Structures Using Air-Coupled Impact-Echo,“ *Journal of Engineering Mechanics*, Bd. 133, Nr. 6, pp. 628-640, 2007.

- [34] D. Algernon, H. Ernst und K. Dressler, „Signalverarbeitungsmethoden zur Anwendung des Impact-Echo-Verfahrens mit Luftankopplung in Array-Anordnung,“ in *Proceedings of DGZfP-Jahrestagung 2011*, Bremen, 2011.
- [35] D. Algernon, H. Ernst und K. Dressler, „Signal Processing for Air-Coupled Impact-Echo Using Microphone Arrays,“ in *Proceedings of the 18th World Conference on Nondestructive Testing*, Durban (South Africa), 2012.
- [36] R. Groschup und C. U. Große, „MEMS Microphone Array Sensor for Air-Coupled Impact-Echo,“ *Sensors*, Bd. 15, Nr. 7, pp. 14932-14945, 2015.
- [37] A. Taffe, Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung (Heft 574), Bd. 574, Berlin: Beuth Verlag (Dissertation an der RWTH Aachen), 2008.
- [38] S. Feistkorn, Gütebewertung qualitativer Prüfaufgaben der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen am Beispiel des Impulsradarverfahrens (Heft 603), Berlin: Beuth Verlag (Dissertation an der Technischen Universität Berlin), 2012.
- [39] S. Feistkorn und A. Taffe, „Die Anwendung der POD zum Nachweis der Güte zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen,“ in *Proceedings of the DGZfP-Jahrestagung 2010*, Erfurt, 2010.