

# Messtechnische Untersuchungen zur Charakterisierung der Ausbreitung von Ultraschall in Beton

Martin Schickert, Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA) Weimar

**Kurzfassung.** Elastische Ultraschallwellen werden bei ihrer Ausbreitung in Beton an dessen inhomogenem Gefüge stark gestreut. Ein eingeschallter Puls wird dadurch abhängig von den Betonparametern geschwächt, verformt und von einem Strukturrauschen überlagert.

Zur Charakterisierung dieser Veränderungen wurden Durchschallungsmessungen an sechs Betontestkörpern im Frequenzbereich von 50 bis 800 kHz durchgeführt. Dabei wurden die Parameter Schallweg sowie Beton-Größtkorn und -Porosität variiert. Es wurden drei Prüfkopfpaare für Longitudinal- und eins für Transversalwellen eingesetzt. Der Beitrag beschreibt Aufbau, Durchführung und Zwischenauswertung der Messungen. Auf das Messkonzept, das die Besonderheiten des Werkstoffs und seiner Verarbeitung berücksichtigt, wird ausführlich eingegangen.

Erste Ergebnisse zeigen die Verformung der Messsignale in Abhängigkeit vom Schallweg und den unterschiedlichen Einfluss von Größtkorn und Porosität. Die Darstellung der weiteren Auswertung, die die Berechnung der akustischen Übertragungsfunktionen und die quantitative Darstellung des Parametereinflusses in einem empirischen Modell beinhaltet, ist einer späteren Veröffentlichung vorbehalten.

## 1 Einführung

Die Zerstörungsfreie Prüfung von Beton mit Ultraschall-Abbildungsverfahren wird nach den deutlichen Fortschritten der letzten Jahre regelmäßig eingesetzt [1–3]. Für Aussagen zur betonabhängigen Abbildungsqualität und für eine abgesicherte Modellierung fehlen aber quantitative Kenntnisse über das Ausbreitungsverhalten elastischer Ultraschallwellen in Beton. Dessen mehrphasiges Gefüge aus Zementmatrix, Zuschlag und Poren führt zu Streuung, Modenkonversion und Absorption und in deren Folge zu frequenzabhängiger Schwächung und Dispersion der ursprünglichen Wellenform. Über Wirkungsweise und Beitrag der Einflussgrößen herrscht bisher Unklarheit.

Um diese Lücke zu füllen, wurden Durchschallungsexperimente an sechs Betonen in einem Frequenzbereich von 50 bis 800 kHz als Funktion des Schallwegs durchgeführt. Mit den Betonrezepturen wurden die Parameter Größtkorn und Porosität gezielt variiert. In dem Beitrag wird über die messtechnischen Herausforderungen, die der Werkstoff Beton, dessen Verarbeitung und eine dreieinhalb Jahre dauernde Untersuchung mit sich bringen, detailliert berichtet. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Signalverarbeitung bei der Zwischenauswertung der Messungen. Dazu gehören Kreuzkorrelationsuntersuchungen zum Entfernen von Laufzeitunterschieden und Signalmittelungen zur Verbesserung der Signalqualität. Es wird in jedem Fall nur der Signalanteil betrachtet, der sich kohärent mit dem eingeschallten Puls auf dem kürzesten Weg zum Empfänger ausbreitet. Als erste Ergebnisse der Untersu-

chung wird die Verformung der Ultraschallpulse vorgestellt, die sich auf Prüfverfahren anderer inhomogener Materialien übertragen lässt.

Diese Experimente erweitern früheren Untersuchungen [4, 5] auf eine größere und systematischere Auswahl der Betonrezepturen und ein wesentlich aufwendigeres Messkonzept mit vier Prüfkopfpaaaren für Druck- und Scherwellen, geregelter Andruck der Prüfköpfe und einem Schallwegbereich von fünf bis 100 Zentimetern. Ziel sind fundierte und systematische Kenntnisse über die Ultraschallausbreitung in Beton, die die Bestimmung praxisrelevanter Ausbreitungsparameter ermöglichen.

In einem Folgebeitrag sollen später weiter reichende Ergebnisse vorgestellt werden, insbesondere die Ermittlung der akustischen Übertragungsfunktionen und die Zusammenfassung der Resultate in einem empirischen Modell für die frequenz- und schallwegabhängige Schallschwächung und Dispersion.

## **2 Fragestellung und Methodik**

Den Hintergrund der Untersuchungen bildet die Frage, wie der Werkstoff Beton die Ausbreitung von Ultraschall beeinflusst. Dies wird hier spezialisiert auf die Untersuchung der Ausbreitung des kohärenten, also zum Sendesignal immer in einer definierten Zeit- wie Phasenbeziehung stehenden Signalanteils. Dabei wird ein lineares Übertragungsverhalten angenommen.

Unter dieser Voraussetzung kann die Fragestellung durch die Ermittlung der akustischen Übertragungsfunktion des Betons beantwortet werden. Diese lässt sich als Antwort auf eine räumlich und zeitlich begrenzte elastische Anregung messen. Als akustische Übertragungsfunktion wird hier die Übertragungsfunktion von elastischen Druck- und Scherwellen verstanden, die sich im Beton als Longitudinal- und Transversalwellen ausbreiten. Zu ihrer Bestimmung werden die Impulsantworten zum einen von Beton und Messsystem gemeinsam und zum anderen des Messsystems allein gemessen. Die gesuchte akustische Übertragungsfunktion des Betons erhält man durch Entfaltung der beiden Messsignale, wodurch die Einflüsse des Messsystems eliminiert werden.

Die akustische Übertragungsfunktion des Betons besitzt ein bestimmtes Betrags- und Phasenspektrum und kann als Filter aufgefasst werden, durch das ein Ultraschall-Sendesignal im Verlauf seiner Ausbreitung verändert wird. Eine Variation der zu untersuchenden Parameter Schallweg, Größtkorn und Porosität äußert sich in unterschiedlichen Spektralverläufen. Aus Kurvenanpassungen kann der Einfluss dieser Parameter quantitativ ermittelt und in einem empirischen Modell der untersuchten Betone zusammengefasst werden.

## **3 Messaufbau**

Die Messung der Ultraschall-Übertragungsfunktionen wird in Durchschallung durchgeführt. Dazu werden Sende- und Empfangsprüfköpfe an gegenüber liegenden Seiten eines Betontestkörpers angebracht, und es wird das Empfangssignal nach Anregung mit einem kurzen Puls gemessen. In verschiedenen Testkörpern werden die gewünschten Parameter für die Betonrezepturen variiert. Unterschiedliche Schallwege werden realisiert, indem die Testkörper, ausgehend von ihrer maximalen Länge, schrittweise gekürzt werden. Messkonzept, Ausführung der Testkörper sowie elektrischer und mechanischer Messaufbau müssen auf die Besonderheiten der Ultraschallmessung an Beton abgestimmt werden.

### 3.1 Messkonzept

Die exakte Messung der Übertragungsfunktionen elastischer Wellen stellt bereits bei homogenen Werkstoffen hohe Anforderungen an den Messaufbau. Erforderlich sind planparallele Oberflächen der Testkörper, eine genaue Justierung der gegenüber liegenden Wandler und eine verlustarme und gleichbleibende Ankopplung.

Bei der Messung an Beton müssen zusätzliche Besonderheiten des Werkstoffs und seiner Verarbeitung berücksichtigt werden. Identifikation und Lösung der auftretenden Probleme gehören zum Kernbereich der hier vorgestellten Arbeiten. Die folgende Aufzählung führt die wichtigsten Besonderheiten, ihre Auswirkungen und die verwendeten Lösungsansätze auf:

#### *Inhomogenität*

- Zuschlag und Poren sind im Beton unregelmäßig verteilt, so dass die Impulsantwort positionsabhängig wird.  
Lösungsansatz: Die Impulsantwort wird an mehreren gegenüber liegenden Positionen gemessen, die Ergebnisse werden positionsgemittelt.
- Die unregelmäßige Verteilung von Zuschlag und Poren bewirkt auch, dass die Schallgeschwindigkeit sich von Messposition zu Messposition ändert.  
Lösungsansatz: Die Empfangssignale werden auf ihren gemeinsamen Mittelwert verschoben.
- Durch die starke Streuung an Zuschlag und Poren werden die Sendesignale stark geschwächt. Bei großen Messlängen sind deshalb kleine Empfangssignale zu messen.  
Lösungsansatz: Es werden hochwertige Empfangsverstärker mit geringem Eigenrauschen verwendet. Um das Rauschen weiter zu verringern, werden die Empfangssignale zeitlich gemittelt.
- Die starke Streuung an Zuschlag und Poren führt zu unkorrelierten Streusignalen nach dem Nutzsignal (Strukturrauschen, Coda).  
Lösungsansatz: Da das Strukturrauschen abhängig vom Weg des Schalls durch den Beton ist, kann es durch Positionsmittlung verringert werden. Das verbleibende Restsignal kann durch Zeitfenster im Wesentlichen beseitigt werden.

#### *Abweichende Geometrie*

- Beim Schnitt der Testkörper kann nicht garantiert werden, dass die Schnittflächen genau parallel zueinander liegen.  
Lösungsansatz: Ein variierender Schallweg bewirkt unterschiedliche Schalllaufzeiten. Diese können ausgeglichen werden, indem die Empfangssignale auf ihren gemeinsamen Mittelwert verschoben werden.
- Die Schnittfläche kann wellig sein und dadurch zu einer ungleichmäßigen Ankopplung führen.  
Lösungsansatz: Die Schnittflächen werden geschliffen. Ihre Oberflächen werden im Messbereich auf Ebenheit kontrolliert.

#### *Störende Reflexionen*

- Ausgesandte Wellen werden an den Seitenflächen der Testkörper reflektiert und überlagern das Messsignal.  
Lösungsansatz: Störende Reflexionen von Longitudinalwellen können durch ein Zeitfenster beseitigt werden. Die Querabmessungen der Testkörper müssen so groß sein, dass störende Reflexionen erst nach einer Wellenlänge der tiefsten Messfrequenz im Empfangssignal eintreffen.
- Bei der Messung von Transversalwellen stören zusätzlich Longitudinalwellen, die

durch Modenkonzersion im oder am Sendewandler, an Zuschlag und Poren sowie an den Seitenflächen der Testkörper entstehen. Da Longitudinalwellen schneller als Transversalwellen sind, überlagern sie sich mit dem transversalen Nutzsignal.

Lösungsansatz: Die Überlagerung mit modenkonzertierten Longitudinalwellen lässt sich generell nicht verhindern. Bei größeren Messlängen sind parasitäre Wellen des Sendewandlers im Allgemeinen abgeklungen, bevor die Transversalwellen eintreffen. Ansonsten verschlechtern modenkonzertierte Longitudinalwellen das Signal/Rauschverhältnis und führen zu Welligkeiten im Frequenzgang.

#### *Ankopplung*

- Die Wirkung der Ankopplung ist druckabhängig.  
Lösungsansatz: Der Ankopplungsdruck wird pneumatisch erzeugt und geregelt. Der jeweilige Druck wird in Vorversuchen prüfkopfabhängig optimiert. Die Halterung der Prüfköpfe erlaubt ihre Ausrichtung auf die Oberfläche.
- Beton ist ein poröses Material. Koppelmittel dringen deshalb in die Oberfläche ein und verändern ihre Wirkung zeitabhängig. Zudem enthält das verwendete Koppelmittel Vaseline Luft, wodurch die Ankoppelverluste mit zunehmender Kopplungszeit geringer werden.  
Lösungsansatz: Die Messungen werden erst nach einer festgelegten Ankoppelzeit durchgeführt. Während dieser Zeit werden die Prüfköpfe periodisch bewegt. Ankoppelzeit und Bewegungsrhythmus werden in Vorversuchen optimiert.

#### *Langer Messzeitraum*

- Beton härtet noch nach Monaten und Jahren weiter aus. Dabei verändern sich auch seine akustischen Eigenschaften.  
Lösungsansatz: Vor Messbeginn wird der größte Teil der Änderung der akustischen Eigenschaften abgewartet. Dazu wird der zeitliche Verlauf von Schalllaufzeit und Schallschwächung aus Durchschallungsmessungen ausgewertet. Kriterium für einen genügend stationären Zustand ist eine Änderung der Schallgeschwindigkeit von weniger als 0,2 % in drei Monaten.

#### *Klimaabhängigkeit*

- Die akustischen Eigenschaften von Beton sind in einem gewissen Maße abhängig von seiner Temperatur und Materialfeuchte.  
Lösungsansatz: Nach dem Schneiden und Schleifen wurden die Testkörper mindestens zwei Wochen lang im Raumklima getrocknet, um die Verdunstung des Hilfswassers abzuwarten. Die Feuchte im Betoninneren verändert sich nur sehr langsam und lässt sich dadurch nur schwer einstellen. Im Rahmen dieser Versuche wurde deshalb darauf verzichtet. Die Messungen werden bei einer konstanten Temperatur von  $23^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ K}$  durchgeführt, auf die die Testkörper zuvor temperiert werden.

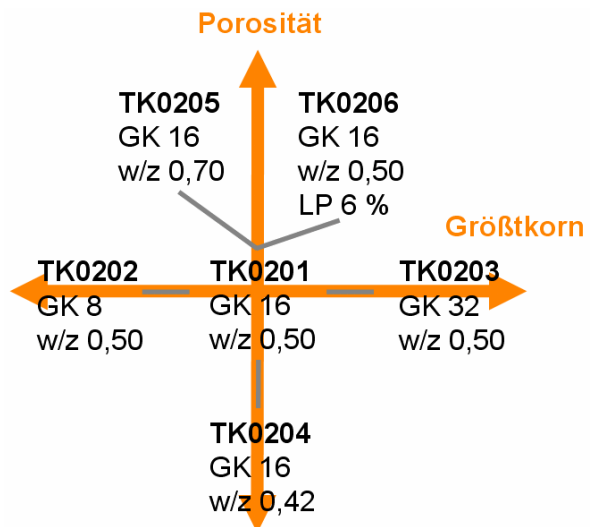
Einige der Maßnahmen wie die Positionsmittelung wirken sich positiv auf mehrere Probleme aus. Trotzdem ist nicht zu erwarten, dass Übertragungsfunktionen an Beton mit derselben Qualität messbar sind wie an homogeneren, leichter bearbeitbaren und zeitlich stabileren Materialien.

### *3.2 Testkörper*

Für die Messungen wurden sechs Betontestkörper mit den Maßen  $35 \times 35 \times 120\text{ cm}^3$  und einer Masse von je ca. 300 kg hergestellt (Bild 1, links). Mit den Rezepturen wurden die Größe des Zuschlags und die Porosität variiert (Bild 1, rechts). Zur Variation der Zuschlaggröße wurden drei Testkörper mit einem Größtkorn von 8, 16 und 32 mm, einer Sieblinie

zwischen A und B und einem Wasser/Zement-Wert von 0,5 angefertigt. Änderungen der Porengröße und deren Größenverteilung wurden in drei Rezepturen realisiert, indem Wasser/Zement-Werte von 0,42, 0,5 und 0,7 eingestellt wurden. Dabei betrug das Größtkorn wieder 16 mm, und die Sieblinie lag ebenfalls zwischen A und B. Der Testkörper mit Größtkorn 16 mm und einem Wasser/Zement-Wert von 0,5 wurde für beide Reihen verwendet. In einem sechsten Testkörper wurde eine erhöhte Porosität vor allem im größeren Porenbereich durch Zugabe eines Porenbildners erreicht.

Aus einem Bereich der Testkörper wurden Probekörper zur Bestimmung der Druckfestigkeit entnommen. Für die Messungen stand dann noch eine Länge von 1 m zur Verfügung. Die Oberseite der Testkörper wurde geschliffen, um eine definierte Auflagefläche für die Messmechanik zu erhalten.



**Bild 1.** Testkörper vor Beginn der Messungen (links) und Übersicht über deren Rezepturen (rechts)

### 3.3 Elektrische Geräte

Der elektrische Messaufbau bestand aus einem Ultraschallgerät für den Sende- und Empfangszweig und je einem Ultraschall-Sende- und -Empfangs-Prüfkopf. Als Sendepuls wurde ein 100 ns breiter Rechteckpuls verwendet. Die Empfangssignale wurden breitbandig verstärkt und im Gerät mit 8 Bit bei 10 MHz digitalisiert.

Als Prüfköpfe wurden vier Wandlerpaare verwendet (Bild 2, Tabelle 1). Drei Paare Longitudinalwellenprüfköpfe decken einen weiten Frequenzbereich von 50 bis 800 kHz ab. Sie wurden mit Vaseline angekoppelt. Ein Prüfkopfpaar für Transversalwellen ist für Trockenanpassung ausgelegt. Aufgrund der oben beschriebenen Störreflexionen, seiner geringen Empfindlichkeit und dem daraus folgendem begrenzten Signal/Rausch-Verhältnis wurde es nicht für eine Auswertung durch Entfaltung verwendet, wie sie für die Modellbildung erforderlich ist.



**Bild 2.** Verwendete Prüfköpfe (von links nach rechts): T 1802 (Transversalwellen), S 40 HB 0,2–0,6, G 0,2 R4, G 0,2 RC 75B (alle Longitudinalwellen)

Für jedes Prüfkopfpaar wurde die Impulsantwort des Messsystems als Referenzsignal aufgenommen. Für die Longitudinalwellenprüfköpfe wurde die Messung an einem Glas-Kalibrierblock mit einer Schallgeschwindigkeit von  $c_L = 4030$  m/s und einer Weglänge von 152,85 mm durchgeführt. Die Transversalwellenprüfköpfe sind für Trockenankopplung vorgesehen und wurden deshalb im Direktkontakt gemessen.

**Tabelle 1.** Verwendete Prüfkopfpaare

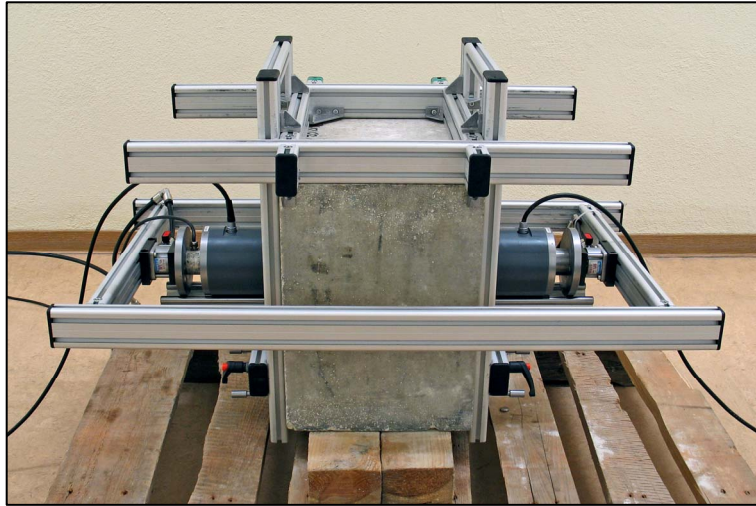
Bezeichnung	T 1802	G 0,2 RC 75B	G 0,2 R4	S 40 HB 0,2–0,6
Hersteller	ACSYS	Krautkrämer	Krautkrämer	Karl Deutsch
Wellenart	Transversal	Longitudinal	Longitudinal	Longitudinal
Frequenzbereich	37 – 85 kHz	30 – 570 kHz	180 – 570 kHz	350 – 770 kHz
Bandbreite	85 %	400 %	120 %	88 %

### 3.4 Messmechanik

Zur Halterung und Positionierung der Ultraschallprüfköpfe wurde eine Messmechanik aufgebaut. Sie besteht aus drei Funktionseinheiten: einem festen Haltegestell, einem beweglichen Druckrahmen und Aufnahmen für die Prüfköpfe (Bild 3).

Das Haltegestell liegt auf der geschliffenen Oberseite der Testkörper auf. Es kann an jede Länge der Testkörper angepasst werden und bietet eine starre Halterung relativ zu den definierten Bezugskanten der Testkörper. Teile der Halterung sind beweglich und können an mechanisch vorgegebenen Stellen befestigt werden, so dass die Prüfköpfe reproduzierbar auf ihren 16 jeweils gegenüber liegenden Messpositionen fixiert werden können. Zur Aufnahme der Longitudinalwellenprüfköpfe wurden Adapter mit einem Außendurchmesser von 100 mm angefertigt, die eine konstante relative Lage der Prüfköpfe sicherstellen. Die Adapter liegen frei beweglich auf Schienen auf. Auf den Schienen liegt ebenfalls beweglich ein Druckrahmen, der die Prüfköpfe durch zwei pneumatische Druckzylinder zentrisch an die Testkörperoberfläche anpresst. Eine Druckmessdose dient zur manuellen Druckregelung.

Die Transversalwellenprüfköpfe werden durch ein Lochbrett am Haltegestell positioniert und manuell durch eine Federmechanik angepresst, die auf den gewünschten Anpressdruck eingestellt ist.



**Bild 3.** Messmechanik mit Haltegestell, Druckrahmen und Aufnahmen für die Prüfköpfe

## 4 Messungen

### 4.1 Voruntersuchungen

Vor Beginn der Messungen wurden Vorversuche zum Einfluss des Anpressdrucks auf Amplitude und Laufzeit der Empfangssignale durchgeführt. Als Ergebnis wurde für jeden Prüfkopftyp ein optimaler Anpressdruck ermittelt. Um eine gute und reproduzierbare Ankopplung zu erreichen, wurde in weiteren Vorversuchen ein Schema für Dauer und Bewegungsintervall der Prüfkopfankopplung erarbeitet.

Die Messungen wurden erst begonnen, nachdem die Testkörper genügend ausgehärtet waren. Dies wurde in zusätzlichen Durchschallungsmessungen anhand der Amplituden- und Laufzeitänderungen der Empfangssignale überprüft. Zu Beginn der eigentlichen Messungen waren die Testkörper etwa 2 Jahre alt.

### 4.2 Ultraschallmessungen

Die Testkörper wurden einem umfangreichen Messprogramm unterzogen, in dem die Zielgrößen variiert wurden und durch Mittelungen eine hohe Signalqualität sichergestellt wurde. Die Messungen an den sechs Testkörpern umfassten im Einzelnen:

Variation von Größtkorn und Porosität:

Herstellung von sechs Testkörpern mit unterschiedlichen Betonrezepturen

Variation des Schallwegs:

Je Testkörper Untersuchungen an den 13 Nennlängen 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 und 100 cm, die durch sukzessive Kürzung der Testkörper eingestellt wurden.

Variation von Wellenart und Frequenzbereich:

Je Nennlänge Einsatz von vier Prüfkopfpaaaren, und zwar drei Prüfkopfpaaaren mit sich überlappenden Frequenzbereichen für Longitudinalwellen und einem Prüfkopfpaar für Transversalwellen.

Reduktion des Strukturrauschens:

Je Prüfkopfpaar Messungen an 16 Messpositionen in einem 4 x 4-Raster mit einem Rasterabstand von 2 cm; Positionsmittelung in der Zwischenauswertung

Reduktion des elektrischen Rauschens:

Je Messposition Durchführung von 128 Zeitmittelungen (512 Zeitmittelungen bei Transversalwellen)

Im Allgemeinen wurde an einem Messtag ein Testkörper einer bestimmten Messlänge mit allen vier Prüfkopfpaaren an den 16 Messpositionen und mit den Zeitmittelungen vermessen. Für jede Einzelmessung wurde der Prüfkopf 4 min angepresst und dabei alle 30 s geringfügig verdreht.

#### 4.3 Begleitende Messungen und Dokumentation

Neben den Ultraschallmessungen wurden weitere Messungen zur Qualitätskontrolle der Testkörper und Signalübertragungskette durchgeführt. An den vier Eckpunkten des Messrasters wurde die Länge der Testkörper gemessen. Aus den Messungen wurde durch Interpolation der Schallweg berechnet und außerdem die Parallelität der Messflächen kontrolliert. Jede Messfläche wurde mit einem Haarlineal an vier Linien auf Ebenheit überprüft. Bei einer Messlänge von 100 mm wurden Einbuchtungen  $> 30$ ,  $> 50$  und  $> 100 \mu\text{m}$  protokolliert. Nach Abschluss der Messungen an einer Messlänge wurden Kontrollmessungen durchgeführt, um die Funktion der Prüfköpfe und des elektrischen Systems zu überprüfen. Die Longitudinalwellenprüfköpfe wurden am Glas-Kalibrierkörper in Impuls/Echo-Messungen gemessen, die Transversalwellenprüfköpfe in Durchschallungsmessungen im Direktkontakt.

Die Ausführung eines Messprogramms über einen längeren Zeitraum bedingt die Notwendigkeit sicherzustellen, dass alle Messungen in gleicher Weise durchgeführt werden. Für die Vorbereitung und Durchführung aller Messungen wurde deshalb eine detaillierte Messvorschrift ausgearbeitet. Jede Ultraschall-, Längen-, Ebenheits- und Kontrollmessung wurde protokolliert.

#### 4.4 Zeitaufwand

Eine Messlänge eines Testkörpers wurde in der Regel an einem Arbeitstag vermessen. Zusammen mit den Nebenarbeiten betrug der Zeitaufwand für alle Testkörper einer Messlänge:

Auf Länge schneiden:	3 Wochen
Oberflächen schleifen:	3 Wochen
Trocknen:	2 Wochen
Temperieren auf 23°C:	1 Tag
Ultraschallmessungen:	6 Tage
Zwischenauswertung, Kontrollmessungen:	1 Tag

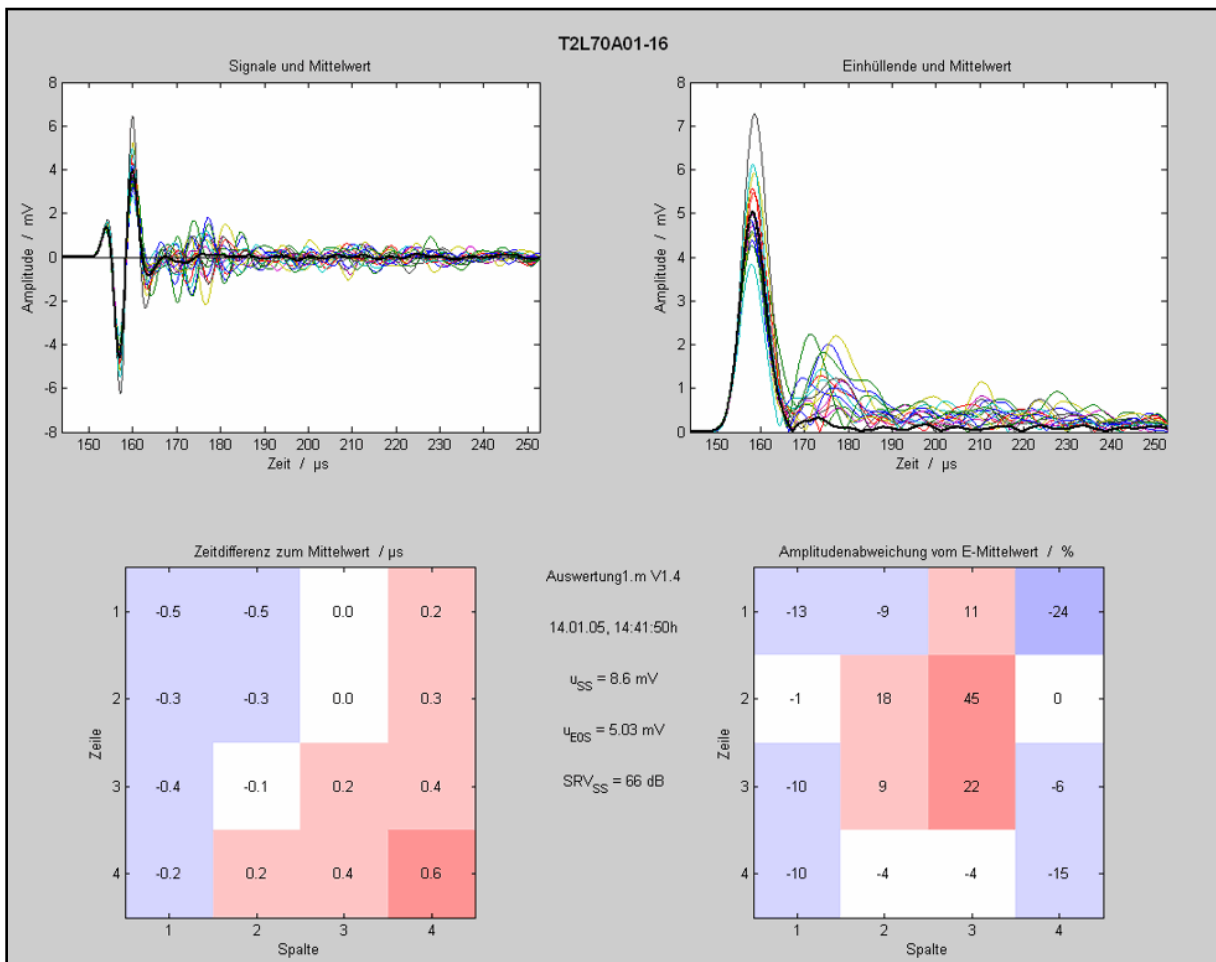
Zusammen mit ungeplanten Wartezeiten summierte sich der Zeitaufwand für eine Messlänge auf 13 Wochen. Das Messprogramm für alle 13 Messlängen wurde in dreieinhalb Jahren absolviert.



## 5 Zwischenauswertung

Nach Abschluss der Messungen an einer Messlänge wurde jeweils eine Zwischenauswertung durchgeführt. Dabei wurde die Qualität der Ergebnisse kontrolliert, und es wurde der Mittelwert der 16 Einzelmessungen einer Messlänge berechnet. Die Zwischenauswertung erfolgte halbautomatisch mit einem dafür speziell entwickelten Programm.

Die Kontrolle der Signalqualität war deshalb besonders wichtig, weil die Messungen nach dem Kürzen auf die nächste Nennlänge nicht mehr wiederholt werden konnten. Die Ergebnisse wurden deshalb im Sinne einer Plausibilitätskontrolle mit den Auswertungen früherer Messlängen verglichen. Außerdem wurden der Zeitversatz und die Amplitudendifferenz jeder der 16 Einzelmessungen zu dem gemeinsamen Mittelwert grafisch dargestellt. Kriterien der Überprüfung waren unter anderem, dass die Absolutwerte des Zeitversatzes nicht zu groß sollten (nur in Einzelfällen größer  $0,5 \mu\text{s}$ ) und ihre flächige Verteilung nicht zu sehr von der der vorherigen Messlänge abweichen sollte.



**Bild 4.** Beispiel für das Ergebnis einer Zwischenauswertung

Die Mittelwerte aus den 16 Empfangssignalen einer Messlänge wurden entsprechend dem Messkonzept erst gebildet, nachdem die Einzelmessungen zeitlich auf den gemeinsamen Mittelwert verschoben worden waren. Dazu wurden die zeitlich gefensterter und grob bandbegrenzten Empfangssignale mit dem gemeinsamen Mittelwert gekorreliert. Das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion zeigte den Zeitversatz an, um den die Einzelmessung anschließend verschoben wurde. Die so ermittelten Zeitversätze wurden anschließend, wie im vorigen Absatz beschrieben, zur Qualitätskontrolle herangezogen. Aus den Mittel-

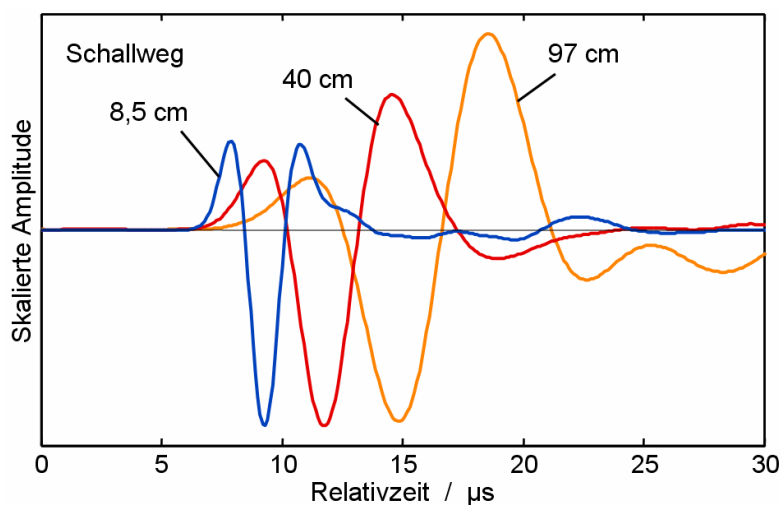
werten und ihren Einhüllenden wurden Amplitudenkennwerte und das Signal/Rauschverhältnis berechnet.

Im Bildschirmausdruck der Zwischenauswertung für Testkörper TK0202, Nennlänge 70 cm, in Bild 4 sind die beschriebenen Ergebnisse abgebildet. Außerdem ist sowohl zu erkennen, welche hohe relative Amplituden das unkorrelierte Strukturrauschen der Einzelmessungen aufweist, als auch, wie wirksam es durch die Positions-Mittelwertbildung nach Ausgleich der Zeitversätze unterdrückt werden kann. Der endgültige Mittelwert ist als dicke schwarze Linie dargestellt.

## 6 Erste Ergebnisse

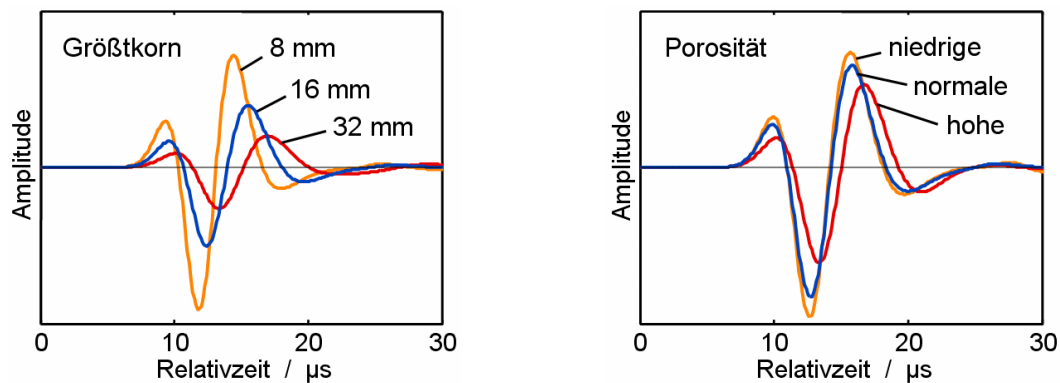
Die Darstellung der weitergehenden Auswertung der Messungen, insbesondere der Entfaltung und Modellbildung, ist einer späteren Veröffentlichung vorbehalten. An dieser Stelle sollen anhand der berechneten Mittelwerte einige grundlegenden Effekte der untersuchten Parameter gezeigt werden.

Ein Beispiel für den Einfluss des Schallwegs ist in Bild 5 dargestellt. Die Mittelwerte je Messlänge werden hier für drei Messlängen am Testkörper TK0201 (16 mm Größtkorn, normale Porosität) verglichen. Dabei sind die Signale jeweils zeitlich auf ihrem Beginn verschoben und auf ihre maximale absolute Amplitude skaliert worden. Es wird deutlich, dass sich die Empfangssignale mit längerem Schallweg stark verbreitern. Dies geht mit einer Verschiebung des Betragsspektrums zu niedrigeren Frequenzen einher.



**Bild 5.** Einfluss des Schallwegs bei einem Beton mit 16 mm Größtkorn und mittlerer Porosität

Bild 6 zeigt den Einfluss von Größtkorn und Porosität der Betone auf die Empfangssignale. Die Amplituden sind nicht skaliert, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Die Signale sind wieder auf einen gemeinsamen Beginn verschoben. Es ist erkennbar, dass das Größtkorn einen starken Einfluss auf Amplitude und auch Form der Empfangssignale hat. Die Wirkung der Porosität ist bei den untersuchten Betonen immer noch deutlich, aber geringer als die des Größtkorns. Nach Abschluss der Auswertungen und der Modellbildung wird der Beitrag der verschiedenen Einflussgrößen auch quantitativ aus den Modellparametern ersichtlich sein.



**Bild 6.** Einfluss der Betoneigenschaften Größtkorn (links) und Porosität (rechts) bei einem Schallweg von 50 cm

## Danksagung

Der Autor dankt Herrn U. Tümmeler für die Durchführung des überwiegenden Teils der Messungen. Die Herren W. Trützschler und G. Koch haben bei der Herstellung und Bearbeitung der Testkörper mitgewirkt. Die Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Forschergruppe FOR384 gefördert, in der sieben Institute und Forschungseinrichtungen in den Jahren 2001 bis 2007 gemeinsam am Thema „Zerstörungsfreie Strukturbestimmung von Betonbauteilen mit akustischen und elektromagnetischen Echo-Verfahren“ forschten.

## Referenzen

- [1] O. Kroggel, T. Wilhelm, A. Glaubitt, B. Middendorf, J. Neisecke, R. Jansohn, R. Pierson: *Ultraschallverfahren*. In: H.-W. Reinhardt *et al.*: Echo-Verfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen; in: K. Bergmeister, J.-D. Wörner (Hrsg.): *Betonkalender 2007*. Berlin: Ernst & Sohn, 2007, Bd. 1, 483–496.
- [2] M. Schickert: *Grundlagen der Ultraschall-SAFT-Rekonstruktion*. In: H.-W. Reinhardt *et al.*: Echo-Verfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen; in: K. Bergmeister, J.-D. Wörner (Hrsg.): *Betonkalender 2007*. Berlin: Ernst & Sohn, 2007, Bd. 1, 536–543.
- [3] M. Krause, F. Mielentz, B. Milmann, K. Mayer: *Objektabbildung mit scannenden Ultraschallecho-Verfahren*. In: H.-W. Reinhardt *et al.*: Echo-Verfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen; in: K. Bergmeister, J.-D. Wörner (Hrsg.): *Betonkalender 2007*. Berlin: Ernst & Sohn, 2007, Bd. 1, 543–555.
- [4] M. Schickert: „Ein empirisches Modell der frequenzabhängigen Schallschwächung von Beton“; DGZfP-Jahrestagung 1998, Bamberg, 7.–9.9.1998. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 1999, 233–240.
- [5] M. Schickert: „Ein empirisches Modell der Dispersion von Ultraschall in Beton“; DGZfP-Jahrestagung 1999, Celle, 10.–12.5.1999. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 1999, 559–566.