

# **Indirekte Beobachtung des Erstarrens und Erhärtens von Zementleim, Mörtel und Beton mittels Schallwellenausbreitung**

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs  
(Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Alexander T. Herb  
aus Tuttlingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Hans-Wolf Reinhardt  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Harald Schorn

Tag der mündlichen Prüfung: 13. August 2003

Institut für Werkstoffe im Bauwesen  
der Universität Stuttgart

2003

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffe im Bauwesen an der Universität Stuttgart. Ermöglicht hat sie Herr Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt, bei dem ich mit seinem fachlichen Rat, wertvollen Anregungen und motivierendem Ansporn stets Unterstützung fand. Mein besonderer Dank gilt deshalb an erster Stelle ihm.

Ebenso danke sagen möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Schorn für die engagierte Übernahme des Korreferats. Sein Interesse und die daraus erwachsenen Impulse trugen maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Die Untersuchungen mit dem ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope) ermöglichte er mir durch die überaus angenehme Zusammenarbeit mit seinem Mitarbeiter Herrn Dr. rer. nat. habil. M. Schiek, Gruppenleiter Gefügemorphologie am Lehrstuhl für Baustoffe der TU Dresden. Ihm und seinen Kollegen sei für ihre Geduld und Ausdauer, mit der sie meinen Forscherdrang unterstützten, aufs herzlichste gedankt.

Den vielen Mitarbeitern des Instituts, die mir mit geschätztem Rat und kollegialer Tat zur Seite standen, möchte ich ebenfalls Dank sagen. Einige möchte ich besonders erwähnen:

Dr. Joachim Schwarte für viele gute Anstöße; Dr. Bernd Weiler, Günther Schmidt und Hans-Jürgen Ruck für die unzähligen Fachdiskussionen und physikalische sowie technische Unterstützung; Frau Hella Schmidt (die Seele des Instituts), Frau Simone Stumpp sowie Timo Wüstholtz.

Meine beiden wissenschaftlichen Hilfskräfte Jürgen Schmid und Kerstin Brüninghaus waren eine bemerkenswerte und unverzichtbare Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung des umfangreichen Versuchsprogramms sowie der Erledigung unzähliger sonstiger Aufgaben. Meine damaligen Diplomanden und heutigen Diplomingenieure Ralf Beutel, Stefanie Köble und Michael Stegmaier waren durch Ihren Fleiß und Engagement eine Bereicherung für meine Arbeit.

Von der Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen (FMPA) – Otto-Graf-Institut – danke ich Herrn Elsäßer, der auf seine angenehme Art die Nutzung der Betonabteilung koordinierte sowie Herrn Wolfgang Steiner, den Herren Jörg Hoffmann und Markus Kohn, die mich bereitwillig im Bindemittellabor herumdoktern ließen; Frau Schneider und Herr Raitzig für die Arbeit am Rasterelektronenmikroskop (REM); Herrn Dr. Krause und Frau Sanderbrand für ihren Beitrag zur Kernresonanzspektroskopie (NMR).

Zuletzt möchte ich noch meinen Eltern und meiner Frau danken. Ersteren generell für die Ermöglichung meines Studiums und der geduldigen Korrekturdurchsicht der Arbeit; meiner Frau für ihr Verständnis, ohne welches die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

## Inhalt

<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>7</b>
<b>1 Ziel der Arbeit .....</b>	<b>9</b>
<b>2 Ultraschallmessungen an Frischbeton.....</b>	<b>10</b>
2.1 Physikalische Grundlagen der Ultraschallwellen.....	10
2.2 Wellenausbreitung in hydratisierenden Materialien .....	13
2.3 Kenntnisstand .....	15
2.3.1 Durchschallungsverfahren.....	15
2.3.2 Andere Ultraschallverfahren .....	19
2.3.3 Zusammenfassende Beurteilung der bisherigen Arbeiten.....	19
2.3.4 Festlegungen im Hinblick auf die verwendeten Begriffe .....	20
2.4 Das Messverfahren.....	22
2.4.1 Prinzip .....	22
2.4.2 Geräteentwicklung .....	23
2.4.3 Auswertung nach Messparametern .....	24
2.4.4 Ergebnisse, Möglichkeiten, Grenzen .....	29
<b>3 Weiterentwicklung des Prüfverfahrens .....</b>	<b>36</b>
3.1 Praktische Anwendbarkeit – Verbesserungen in der Handhabbarkeit.....	36
3.1.1 Prüfeinrichtung für Zementleim und Mörtel.....	36
3.1.2 Prüfeinrichtung für Beton .....	38
3.2 Mess- und Analysesoftware .....	39
3.3 Signalauswertung - Impedanz .....	41
<b>4 Erstarrungs- und Erhärtungsmechanismus.....</b>	<b>45</b>
4.1 Hydratationsverlauf und Makrostruktur.....	45
4.2 Hydratation der einzelnen Klinkerphasen zu Hydratphasen.....	48
4.2.1 Calciumsilicate.....	49
4.2.2 Tricalciumaluminat .....	50
4.2.3 Calciumaluminatferrit .....	52
4.3 Hydratationsgrad .....	52
4.4 Gefügemorphologie der Hydratationsprodukte.....	55
4.4.1 Elektronenmikroskopie .....	55
4.4.2 ESEM-Aufnahmen der Hydratphasen.....	57
4.4.3 Kontinuierliche Mikroskopierung des Hydratationsprozesses.....	60
<b>5 Gegenüberstellung der US-Methode zu genormten Prüfverfahren .....</b>	<b>71</b>
5.1 Hydratationswärmemessung .....	71
5.1.1 Indirekte Hydratationswärmemessung.....	71
5.1.2 Direkte Hydratationswärmemessung .....	73
5.1.3 Messung des Temperaturverlaufs .....	75

---

5.1.4	Ermittlung des Wärmeverlaufs .....	77
5.1.5	Gegenüberstellung des Verlaufs des Hydratationsgrads und der US-Messungen ...	84
5.1.6	Korrelation zwischen US-Messungen und Reaktionsgrad.....	104
5.1.7	Berechnung des Reaktionsgrads mittels US-Parametern.....	105
5.2	Messung der Erstarrungszeiten über den Eindringwiderstand.....	108
5.2.1	Vicat'sches Nadelgerät [DIN EN 196 TEIL 3] .....	108
5.2.2	Penetrometer-Test [ASTM C 403 – 90].....	115
5.3	Vergleich ESEM - Ultraschall .....	123
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>124</b>
<b>7</b>	<b>Abstract.....</b>	<b>127</b>
<b>8</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>130</b>
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>137</b>

## Formelzeichen und Abkürzungen

Zeichen	Dimension	Bedeutung
$w/z$	-	Wasserzementwert
$h$	-	Hydratationsgrad
$r$	-	Reaktionsgrad
$A$	-	Tonerde ( $Al_2O_3$ )
$C$	-	Calciumoxid ( $CaO$ )
$F$	-	Ferrit ( $FeO$ , $Fe_2O_3$ )
$S$	-	Silikat ( $SiO_2$ )
$\lambda$	m	Wellenlänge
$f$	1/s (Hz)	Frequenz
$\kappa$	-	Adiabatkonstante
$c$	m/s	Wellengeschwindigkeit
$\mu$	-	Querkontraktionszahl
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Rohdichte
$E$	N/m <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul
$k$	m <sup>2</sup> /N	Kompressibilität
$R$	J/(kg · K)	allgemeine Gaskonstante
$T$	K	Absoluttemperatur
$f_{cm}$	N/mm <sup>2</sup>	Mittlere Würfeldruckfestigkeit
$US$	-	Ultraschall
$NMR$	-	Kernresonanzspektroskopie
$ESEM$	-	Environmental Scanning Electron Microscope
$REM$	-	Rasterelektronenmikroskop
$PMMA$	-	Plexiglas bzw. Polymethylmetacrylat
$PUR$	-	Polyurethan

---

Zeichen	Dimension	Bedeutung
$v$	m/s	Schallausbreitungsgeschwindigkeit
$W$	-	Wellenenergie (rel.)
$\sigma$	W/m <sup>2</sup>	Wellenintensität

---

## 1 Ziel der Arbeit

Um die herausragenden Materialeigenschaften moderner Betone zu erzielen, ist der Einsatz von Betonzusatzmitteln und –stoffen unerlässlich. Oftmals sind es sogar Kombinationen mehrerer dieser Substanzen. Über die Wechselwirkungen zwischen den verwendeten Mitteln können die Hersteller - wenn überhaupt - nur für ihre eigenen Produkte Auskunft geben. Die Auswirkungen auf das Erstarren und Erhärten können mitunter überraschend sein. Insbesondere die richtige Dosierung zu finden, ist ein aufwendiger Prozess.

Die in der Norm festgelegten wenigen Prüfmethode, um den Hydratationsprozess zementgebundener Baustoffe zu kontrollieren, basieren auf dem Widerstand, den das erhärtende Material einem eindringenden Stahlstift bietet (Vicat'sches Nadelgerät bzw. Penetrometerverfahren). So einfach sich diese Prüfverfahren auf den ersten Blick in der Anwendung darstellen, so unerlässlich ist hingegen die exakte Einhaltung zahlreicher Randbedingungen. Als Prüfergebnisse resultieren dann außerdem nur der Erstarrungsbeginn und das Erstarrungsende.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode weiterentwickelt, die mittels Ultraschallwellentransmission zu jedem beliebigen Zeitpunkt Aussagen über den Hydratationszustand zulassen soll. Sowohl die oben erwähnten normierten Prüfmethode als auch das Ultraschallprüfverfahren schließen indirekt über die jeweiligen Messparameter auf den Erstarrungs- und Erhärungsgrad.

Um den chemischen Hintergrund des Hydratationsprozesses näher zu beleuchten, wurde ebenfalls als indirekte Methode der Reifezustand über die Hydratationswärmeentwicklung kalorimetrisch bestimmt. Zur direkten visuellen Inspektion wurden hydratisierende Mörtelproben mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Es wurde versucht, ein und die selbe Probenstelle kontinuierlich über mehrere Stunden zu beobachten, um die tatsächliche Entwicklung der Gefügemorphologie wahrzunehmen. Technisch ist dies erst seit gut einem Jahrzehnt möglich. Das konventionelle REM erfordert trockene sowie präparierte (gold- oder kohlenstoffbedampfte) Proben. Deshalb musste bislang der Hydratationsprozess infolge Trocknung gestoppt werden. Es konnten nur unterschiedlich hydratisierte einzelne Proben mikroskopiert werden.

Die neue Technologie des ESEM (Environmental Scanning Electron Microscopy) erlaubt es, auch feuchte Proben zu untersuchen. Damit sind die Möglichkeiten geschaffen, dem Kristallwachstum bei der Hydratation in Echtzeit beizuwohnen.

Parallel zu all diesen Analyse- und Prüfverfahren wurden Messungen mit dem Ultraschallverfahren durchgeführt und miteinander korreliert.

## 2 Ultraschallmessungen an Frischbeton

### 2.1 Physikalische Grundlagen der Ultraschallwellen

Die Möglichkeiten, den Erstarrungs- und Erhärtungsprozess mit Hilfe mechanischer Wellen zu untersuchen, sind vielfältig. Der Bereich der akustischen Wellen (16 - 20.000 Hz) bzw. der Ultraschallbereich ( $> 20.000$  Hz) erweisen sich dabei als die brauchbarsten. Grund hierfür ist das stark inhomogene Gefüge des Betons, das eine hohe Schallschwächung bedingt, die mit zunehmender Frequenz ansteigt.

Generell sind die beiden Arten *Übertragung* (Durchschallung) und *Reflexion* bei Ultraschalluntersuchungen im Hinblick auf den Hydratationsfortschritt zu unterscheiden. Bei der Durchschallung wird eine Welle in einen Probekörper eingeleitet, um den übertragenen Anteil auf der gegenüberliegenden Seite zu empfangen. Hingegen wird bei der Reflexion eine Welle untersucht, die an einer Grenzfläche reflektiert wird und an der Welleneinleitungsseite wieder austritt. In der vorliegenden Arbeit kommt ein *Durchschallungsverfahren* zum Einsatz.

Eine weitere prinzipielle Differenzierung, die vorzunehmen ist, liegt in der Orientierung der Schwingungsrichtung begründet. Am verständlichsten wird dies durch die Abstraktion einer Welle in einzelne schwingende Teilchen:

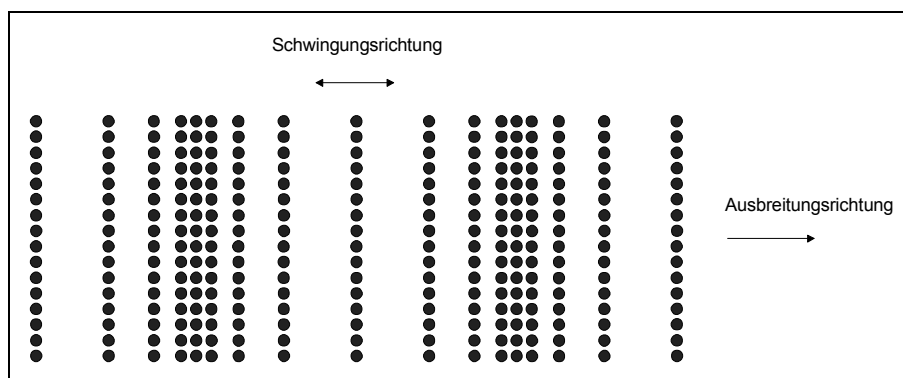


Abbildung 2.1-1: Teilchenmodell einer Longitudinalwelle.

Bei der Longitudinal- oder Längswelle zeigt die Verschiebung dieser Teilchen (Schwingungsrichtung) in Richtung der Wellenausbreitung. Das Material, das von der Welle durchlaufen wird, wird also komprimiert bzw. gedehnt (Abbildung 2.1-1). Deshalb wird auch von der sogenannten Kompressionswelle gesprochen.

Steht die Schwingungsrichtung der Teilchen rechtwinklig zur Ausbreitungsrichtung einer Welle, wird sie als Transversal- oder Querwelle bezeichnet (Abbildung 2.1-2). Das Material wird sozusagen geschert. Infolgedessen wird diese Wellenart auch *Scherwelle* genannt.



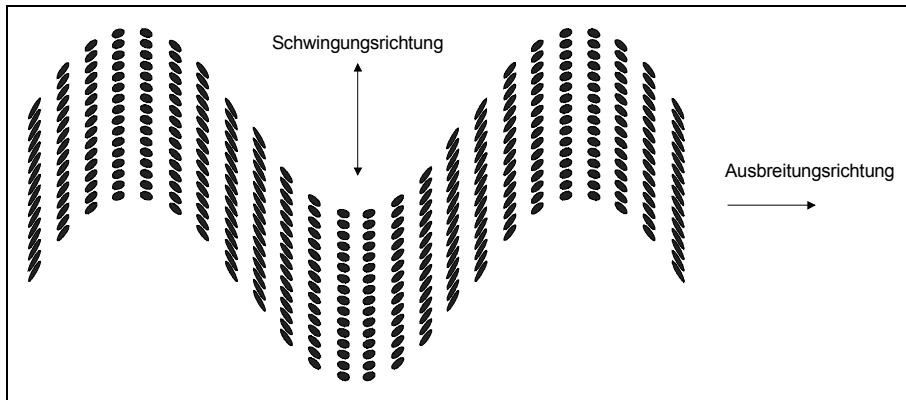


Abbildung 2.1-2: Teilchenmodell einer Transversalwelle.

Die Geschwindigkeit  $c$ , mit der sich eine Welle ausbreitet, wird berechnet nach:

$$c = \lambda \cdot f \quad [m/s] \quad (Gl. 2.1-1)$$

$\lambda$  Wellenlänge [m]

$f$  Frequenz [Hz]

Die Wellengeschwindigkeit hängt von den mechanischen Eigenschaften des *Mediums*, in dem sich die Welle ausbreitet, ab. Nachfolgende Berechnungsansätze berücksichtigen diesen Umstand.

**a) Festkörper: (große elastische Körper)**

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \quad [m/s] \quad (Gl. 2.1-2)$$

$\mu$  Querkontraktionszahl [-]

$\rho$  Rohdichte [ $kg/m^3$ ]

$E$  Elastizitätsmodul [ $N/m^2$ ]

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad [m/s] \quad (Gl. 2.1-3)$$

$c_s$  ist die Schallgeschwindigkeit der S-Welle (Sekundärwelle) und  $c_p$  der P-Welle (Primärwelle).

**b) Fluide:**

$$c_p = \sqrt{\frac{I}{\rho \cdot k}} \quad [m/s] \quad (Gl. 2.1-4)$$

$k$  Kompressibilität [ $m^2/N$ ]

**c) Gase:**

$$c_p = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T} \quad [m/s] \quad (Gl. 2.1-5)$$

$\kappa$  Adiabatenkonstante [-]

$R$  allgemeine Gaskonstante  
[ $J/(kg \cdot K)$ ]

$T$  Absoluttemperatur [ $K$ ]

Für Luft beispielsweise betragen die Werte dieser Konstanten  $\kappa=1,4$  und  $R=287$  J/kgK.

In *Gasen* sowie in *Flüssigkeiten* breitet sich Schall nur in Form von Longitudinalwellen aus. Hingegen treten in *Festkörpern* zusätzlich zu den P-Wellen die transversalen Wellen auf. Diese sind außerdem an Grenzflächen zweier unterschiedlicher Medien möglich; dann werden sie speziell als Oberflächenwelle (Rayleighwelle) bezeichnet und stellen eine Superposition zwischen longitudinaler (parallel zur Ober- oder Grenzfläche) und transversaler (quer zur Ober- oder Grenzfläche) Komponente dar.

Die Abmessungen der Probekörper, in denen sich der Schall ausbreitet, müssen als Einflussgrößen berücksichtigt werden. Besitzen die Probekörper Abmessungen (a, b) quer zur Ausbreitungsrichtung, die im Vergleich zur Wellenlänge  $\lambda$  klein sind, so übt das sich in Querrichtung erstreckende Gebiet des Mediums eine Querbehinderung auf die sich ausbreitende Welle aus. Handelt es sich jedoch um den Fall, dass  $\lambda \ll a, b$  ist, dann wird weder die Dilatation noch die Kontraktion in Querrichtung behindert. Beim dritten Fall  $\lambda = a, b$  bildet sich eine stehende Welle aus. Dies hat im Resonanzfall zur Folge, dass sich keine Welle mehr ausbreitet. Im zweiten Fall ( $\lambda \ll a, b$ ) ergeben die genannten Abmessungen entweder eine platten- ( $a \neq b$ ) oder eine stabförmige ( $a=b$ ) Geometrie. Daraus resultieren zwei weitere Wellenformen, auf welche der Vollständigkeit halber noch hingewiesen werden soll: Die *Biegewelle* sowie die *Dehnwelle*. Die *Biegewelle* (Körperschallwelle) stellt sich als Überlagerung von longitudinaler und transversaler Schwingung dar; der transversale Anteil überwiegt deutlich. Sie treten vorwiegend in Platten auf. Die Ausbreitungsrichtung hängt wesentlich von den Randbedingungen sowie dem Plattenaufbau ab. Die *Dehnwelle* ist ebenfalls eine Superposition einer longitudinalen und transversalen Welle. Allerdings hat die longitudinale Komponente einen größeren Betrag. Körper, in denen sie

sich ausbreiten, sind Stäbe. (Auf die Gleichungen zur Berechnung der Geschwindigkeit dieser beiden Wellenarten wird im Hinblick auf die Relevanz innerhalb dieser Arbeit verzichtet.)

## 2.2 Wellenausbreitung in hydratisierenden Materialien

Der frisch gemischte Zementleim, Mörtel oder Beton hat zunächst ein flüssigkeitsähnliches Verhalten. Die sofort entstehenden Hydratationsprodukte bilden noch kein zusammenhängendes Feststoffgerüst, welches mechanische Kräfte übertragen kann. Daher breiten sich, wie in Abschnitt 2.1 erläutert, zunächst nur P-Wellen aus.

Erst ab 90 min Probenalter gelang es NEISECKE [1974] bei Messungen an Zementleim das Auftreten von S-Wellen nachzuweisen.

Aus den Gleichungen (Gl. 2.1-2) und (Gl. 2.1-3) ergibt sich die Querkontraktionszahl  $\mu$  zu:

$$\mu = \frac{c_p^2 - 2c_s^2}{2c_p^2} \quad [-] \quad (\text{Gl. 2.2-1})$$

$c_p$  Geschwindigkeit der P-Welle [m/s]

$c_s$  Geschwindigkeit der S-Welle [m/s]

Dieser analytische Zusammenhang aus den Ausbreitungsgeschwindigkeiten der beiden auftretenden Wellenformen lässt sich im Bezug auf die Hydratationsdauer in einem Diagramm gemäß Abbildung 2.2-1 darstellen.

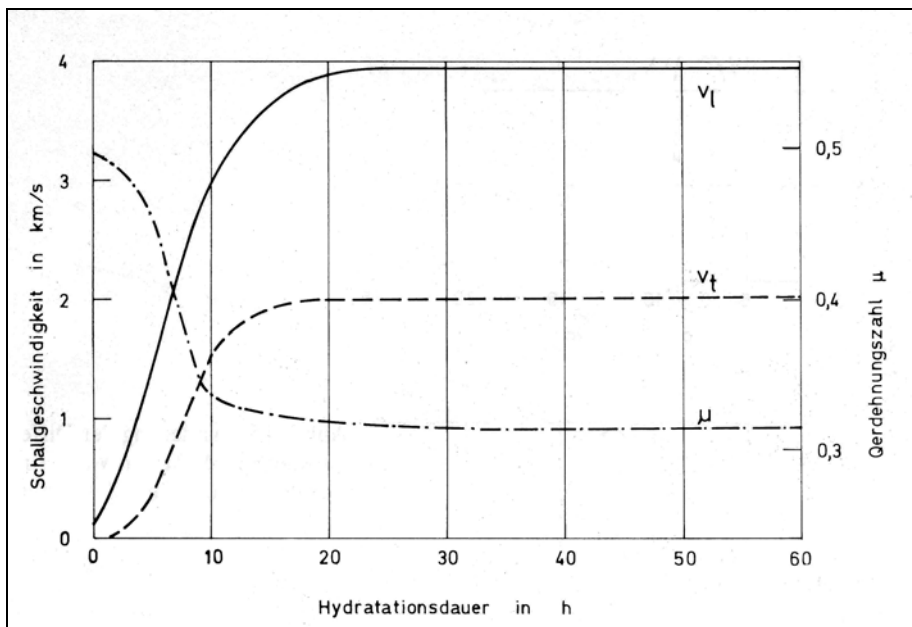
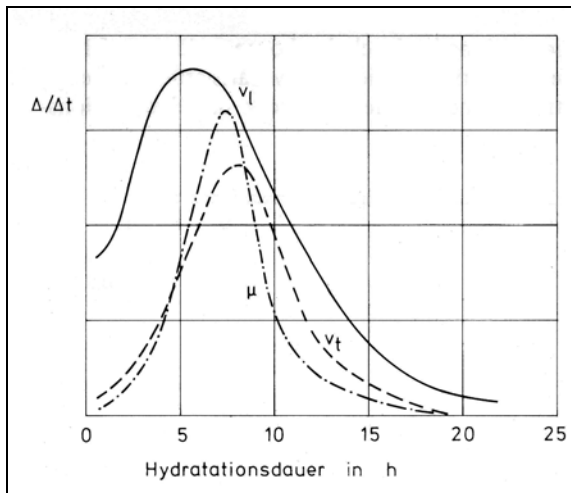


Abbildung 2.2-1:  $v_l(c_p)$ ,  $v_t(c_s)$  und  $\mu$  über der Hydratationszeit eines Zementleims aus Hochofenzement der Festigkeitsklasse 42,5 nach Neisecke [1974].



**Abbildung 2.2-2:**  $v_l(c_p)$ ,  $v_t(c_s)$  und  $\mu$  eines Zementleims aus Hochofenzement der Festigkeitsklasse 42,5 nach der Hydrationszeit  $t$  differenziert nach Neisecke [1974].

Werden die Werte der einzelnen Kurven nach der Zeit differenziert, ergibt sich Abbildung 2.2-2 (vgl. auch DIEM [1982]). Daraus ist ersichtlich, dass das Maximum des Zuwachses der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und der Querdehnzahl zwischen 5 und 10 Stunden Hydrationsdauer auftritt. Nach ca. 20 Stunden ändern sich die Werte kaum noch.

## 2.3 Kenntnisstand

In der Literatur ist eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden zur Untersuchung von Beton mittels Ultraschallwellen zu finden. REHM et al. [1973] sowie THEODORU [1989] führten eine Literatursichtung mit dem Ziel durch, Ordnung in diese Verfahrensvielfalt zu bringen. Neuere Publikationen wie beispielsweise [GROSSE, 1996] und [REINHARDT et al., 1998] behandelten einen aktuelleren Kenntnisstand. Im Hinblick auf die vorliegende Arbeit soll sich die Recherche vorwiegend auf diejenigen Ultraschallverfahren konzentrieren, welche auf dem Prinzip der Durchschallung basieren.

### 2.3.1 Durchschallungsverfahren

Bereits 1951 untersuchte EISENMANN die Rissbildung an Beton mit Hilfe von Ultraschall.

Bei Messungen an *erhärtetem* Beton wiesen KORDINA et al. [1966 und 1967] die Tauglichkeit einer Ultraschall-Impulsmethode im Hinblick auf die Erfassung von Unterschieden in der Betonfestigkeit, Rissbildung sowie Lunkerstellen nach.

WAUBKE [1966/67] versuchte erstmals den „Hydratationsablauf im Zementstein“ mittels Ultraschall zu verfolgen. Diese Experimente wurden allerdings an Probekörpern durchgeführt, die mindestens *einen Tag alt* waren. Der zeitliche Bereich des Erstarrens war somit nicht Gegenstand der Messungen. Untersucht wurde die Ultraschalllaufzeit an Zementsteinprobekörpern aus Portlandzement über einen Zeitraum von einem bis 365 Tage. Ob die gemessenen Veränderungen hydrations- oder austrocknungsbedingt waren, konnte nicht geklärt werden.

Fehlstellen und fehlerhafte Bauteile detektierten NEISECKE und WAUBKE [1972/73] mit Hilfe von Ultraschallintensitätsmessungen. Bei einzelnen Frequenzen machten sich die Fehlstellen in *erhärteten* Betonbauteilen in ihrer dämpfenden Wirkung auf die übertragenen Ultraschallsignale unterschiedlich stark bemerkbar (siehe auch REHM et al. [1975]).

REHM et al. [1973] fassten diese ersten Untersuchungen vom Ende der 60er Jahre an der TU Braunschweig als einen „erfolgsversprechenden Ansatz“ zusammen. Aus Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen ließen sich „Aussagen über die Dynamik des Verfestigungsvorgangs ableiten“. Diese Methode wurde als „empfindlich genug“ bezeichnet, um „die physikalisch-mechanischen Umwandlungen in der ersten Stufe des Erstarrungsvorganges deutlich sichtbar zu machen“. Allerdings wurde auch noch auf das Fehlen eines „zuverlässigen Zusammenhangs zwischen Hydratationsgrad und Impulsgeschwindigkeit“ hingewiesen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von S- und P-Wellen, sowie die Intensität der longitudinalen Wellen maß NEISECKE [1974] mit seinem Ultraschallprüfverfahren. Daraus sollte die Entwicklung der Querdehnungszahl sowie des dynamischen Elastizitätsmoduls an *erhärtendem* Beton innerhalb der ersten 72 h bestimmt werden.

Diese Arbeit setzte HILLGER [1983] fort. Er analysierte zusätzlich zur Messung der Geschwindigkeit und Intensität das Spektrum der Signale. Neben Messungen zur zerstörungsfreien

Fehlstellenkontrolle wurde auch an frischem Zementleim gemessen. Infolge der verwendeten Ultraschallaufnehmer, die erst oberhalb 30 kHz eine ausreichende Empfindlichkeit aufwiesen, konnten frühestens drei Stunden nach Anmischen brauchbare Signale aufgezeichnet werden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit entwickelte sich von anfänglich 800 m/s auf ca. 3500 m/s nach 24 h. Der Frequenzanalyse maß Hilger zukünftig eine große Bedeutung bei der Verfolgung der Zementhydratation bei. Defektoskopischen Untersuchungen wurde jedoch in der folgenden Zeit das Hauptaugenmerk geschenkt [HILLGER, 1984 und 1986].

ROSTÁSY und HARIRI [1996] maßen mit der auf den Vorarbeiten von Neisecke und Hillger basierenden Ultraschallmesstechnik. Über den aus den Ultraschallaufzeiten bestimmten dynamischen Elastizitätsmodul wurde das Ende der „Ruheperiode  $\alpha_0$ “ des Hydratationsprozesses ermittelt. Ab diesem Zeitpunkt begann der untersuchte Beton erste Feststoffeigenschaften zu zeigen. Allerdings wurde auch eine „starke Diskrepanz zwischen der errechneten  $\alpha_0$  und den schalltechnisch experimentell erfassten  $\alpha_{0i}$ “ beschrieben. Die freigesetzte Wärmemenge wurde mit einem adiabatischen Kalorimeter bestimmt.

Eine frequenzabhängige Intensitätsverteilung wendete JONAS [1996] an. Er zerlegt die einzelnen Signale in schmale (20 kHz breite) Frequenzbänder. Parallel durchgeführte Vicat-Nadel-Messung lieferten für einen CEM III/A 32,5 die Erstarrungszeiten. Im Frequenzbereich zwischen 40 und 60 kHz fand er den signifikantesten Kurvenverlauf der Amplitude. Hier ordnete er zwei markanten Kurvenpunkten den Vicat'schen Erstarrungsbeginn und -ende zu (vgl. auch [NEISECKE et al., 1996] und [KRAUSS et al., 2001]).

WHITEHURST [1951] variierte die Zementart eines Betons und wertete die Messungen (2 h - 28 d) hinsichtlich der Ausbreitungsgeschwindigkeit aus. Bei einer ersten Betonmischung gab es eine zeitliche Übereinstimmung zwischen dem Erstarrungsbeginn  $t_{EB}$  und dem Wendepunkt des Kurvenverlaufs der Geschwindigkeit. Bei zwei anderen Betonen verfehlte dieser Kurvenpunkt die Zeit um 20 bzw. 45 min.

Gleichartige Versuche führte STURRUP [1959] durch. Er ordnete allerdings dem Zeitpunkt des Kurvenanstiegs der Geschwindigkeit den Beginn der Erstarrung zu.

Messungen an Zementleimen führten ODLER et al. [1984/85] durch. Sie beschränkten die Auswertung auf die Amplitude. Die Experimente erfassten den Hydratationszeitraum von 15 h nach dem Anmachen. Mit einem Vorversuch wurde ermittelt, dass die Schallübertragung eine Frequenzabhängigkeit aufweist. Weil der frische Zementleim überwiegend niedrige Frequenzen übertrug, wurde für die weiteren Messungen eine „niedrigste Frequenz von 75 kHz“ gewählt. Neben dem Wasserzementwert, der Zementart sowie Zusatzmitteln erfolgte eine Variation der Probendicke (Schallweg). Dickere Proben zeigten einen späteren Anstieg im Verlauf der Amplitude gegenüber dünnen. Bei Parallelmessungen mit der Vicat-Nadel gelang keine konkrete Zuweisung der Erstarrungszeiten zu Amplitudenwerten; lediglich eine qualitative Korrelation konnte aufgezeigt werden.

Bei der Untersuchung unterschiedlicher Zementleime mit Wasserzementwerten von 0,44 bis 0,90 korrelierten KEATING et al. [1989a und 1989b] die Ausbreitungsgeschwindigkeit von S-Wellen mit der Würfeldruckfestigkeit. Da in dieser Arbeit die baupraktische Relevanz bei der Verdämmung von Bohrlöchern von Interesse war, wurden sowohl der in situ herrschende hydrostatische Druck als auch der Luftgehalt bei der Ultraschallmessung systematisch variiert. Zeitraum der Messungen waren jeweils die ersten 24 h nach Wasserzugabe.

Beim Bau einer Ölbohrplattform aus Beton zeichneten VAN DER WINDEN und BRANT [1977] die Ultraschalllaufzeiten während der ersten 24 h nach dem Mischen auf. Sie ermittelten den Zeitpunkt, von dem an der Beton nicht mehr verarbeitet werden konnte und ordneten diesem den Bereich zu, in dem die Geschwindigkeit von 1000 auf 1500 m/s anwuchs. Zum Gesamtumfang des Messprogramms gehörten verschiedene Zementsorten, W/Z-Werte, der Einfluss der Temperatur sowie der von Zusatzmitteln (vgl. auch VAN DER WINDEN [1991]).

Öhlbohrzemente waren Gegenstand der Untersuchungen von SAYERS und DAHLIN [1993]. Zum Teil wurden beschleunigende Zusatzmittel eingesetzt. Mit Hilfe von Unterdruck wurde bei einzelnen Proben die enthaltene Luft entfernt, um den Einfluss der Luftblasen zu untersuchen. Evaluiert wurden die Geschwindigkeit sowie die Amplitude der übertragenen P-Wellen. Allgemein konnte eine Geschwindigkeitsentwicklung von anfänglich 1500 m/s (konstant während der ersten 5 h) zu 2300 m/s nach 24 h gemessen werden (Vgl. auch SAYERS und GRENFELL [1993]). SAYERS und DAHLIN bedienten sich der Theorie von BIOT [1956], um die Auswirkungen der in mineralisch gebundenen Materialien enthaltenen Luftblasen auf die Fortpflanzung der Wellen zu klären.

D'ANGELO et al. [1995] setzten die Arbeit von Sayers et al. fort, indem sie zusätzliche Messungen mit S-Wellen durchführten. Der Beginn der Erstarrung ließ sich damit besser verfolgen.

Den Einfluss von Luftblasen auf die Fortpflanzung von Schallwellen in flüssigen Medien untersuchten GAUNAURD und ÜBERALL [1981]. Sie erklärten die Verminderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit durch starke Resonanzerscheinungen der Luftblasen. Die Geschwindigkeit konnte in Folge von Luftblasen bis auf ein Zehntel abfallen.

Zur Untersuchung der rheologischen Entwicklung von Porenbeton setzten BOUTIN und ARNAUD [1995] eine Versuchseinrichtung ein, die sie „Vibroscop“ nannten. Dabei handelte es sich um einen Wellengenerator, der Schwingungen im Frequenzbereich von 100 bis 1000 Hz erzeugte. (Es wurden also nicht Signale im Ultraschall- sondern im hörbaren Bereich verwendet.) Das heterogene Material veränderte innerhalb von vier Stunden seinen Zustand von einer blasendurchsetzten Flüssigkeit in einen porösen Festkörper. Die sich hierbei zeigende Veränderung der makroskopischen Verdichtbarkeit des Porenbetons wurde anhand der Ausbreitung ebener

*P-Wellen* verfolgt. Der Übergang von flüssig zu fest konnte auf den Zeitpunkt 1 h 30 min terminiert werden. Auch eine Anwendung an erstarrenden Materialien wie Mörtel und Gips wurde aufgezeigt.

In einer weiteren Versuchsreihe generierte ARNAUD [2001] mit dem „Vibroscop“ *S-Wellen* sehr niedriger Frequenz (20 bis 200 Hz). Damit untersuchte er eine Korrelation zwischen der Veränderung des Schermoduls und dem Erstarrungsvorgang von Beton.

An Zementleim und Mörtel wurde während der ersten Stunden der Hydratation die Ausbreitungsgeschwindigkeit von P- und S-Wellen sowie die Entwicklung der Materialtemperatur und seiner elektrischen Leitfähigkeit gemessen (BOUMIZ et al. [1996]). Für Zementleim wurde über die ersten 2 h eine gleichbleibende P-Wellengeschwindigkeit von 1500 m/s ermittelt. Sie stieg dann auf Werte zwischen 2300 m/s ( $W/Z = 0,50$ ) und 2900 m/s ( $W/Z = 0,40$ ) an. Aus den Ergebnissen der Geschwindigkeiten wurden der Elastizitätsmodul und die Querdehnungszahl errechnet. Über den Hydratationsgrad aufgetragen ergab sich für den E-Modul ein nahezu linear ansteigender Verlauf (vgl. auch BARCELO et al., [2001]).

Die nachfolgenden drei Publikationen behandelten Korrelationsversuche zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit ( $v$ ) und der Druckfestigkeit ( $f_{cm}$ ).

ELVERY [1982] variierte bei seinen Messungen den Zement und die Erhärtungstemperatur. Als Ergebnisse beschrieb er die zeitliche Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeit im Vergleich zur Würfeldruckfestigkeit über einen Zeitraum von 3 h bis zu 28 d. Eine funktionale Beziehung dieser beiden Parameter zeigte sich abhängig von der Zementart sowie vom Zuschlaggehalt;  $W/Z$ -Wert und Erhärtungstemperatur hatten hingegen keinen Einfluss. Eine „brauchbare“ Abschätzung der Festigkeit aus der Geschwindigkeit mit Abweichungen von 13-22 % gelang erst ab 12 h nach Wasserzugabe.

Vergleichbare Schlüsse zogen STURRUP et al. [1984] aus ihren Versuchen unter Variation diverser Betonparameter im Hinblick auf eine Wechselbeziehung zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit und Druckfestigkeit.

Als einflussreichste Parameter bezeichnete BYFORS [1982] den Luftgehalt sowie den Größtkorndurchmesser auf einen bilinearen funktionalen Zusammenhang  $f_{cm} = f(v)$ .

Unter Verwendung eines Ultraschallmessverfahrens kontrollieren REICHELDT et al. [1991a, b und c] Frischbeton im Hinblick auf eine ausreichende Verdichtung, einen korrekten Wasser-Zementwert sowie den Luftgehalt.

Auf der Basis dieser Messtechnik entwickelten NICKOL et al. [1993] eine sog. Ultraschall-Messgabel, die in den frischen Beton eingetaucht wurde. Die Messungen wurden hinsichtlich der Wellengeschwindigkeit und der Intensität der übertragenen Signale ausgewertet. Die Prüffrequenz lag bei 46 kHz. Variiert wurden die Betonzuschläge, der Wasser-Zementwert, der Gehalt an Stabilisierer sowie andere Mischungsparameter.



KÄSSNER et al. [1995] integrierten diese Technik in ein baustellentaugliches Messgerät. Nach der umfassenden Eingabe aller Daten aus dem Mischungsentwurf des jeweiligen Betons wurde eine Voraussage über die zu erwartende Druckfestigkeit getroffen.

### 2.3.2 Andere Ultraschallverfahren

Mit der akustischen Nah-Feld-Methode beschrieben CROS und FERRANDIS [1999] ein Verfahren zur Messung der Viskosität, des Erstarrungsvorgangs sowie der Veränderung mechanischer Eigenschaften viskoser Stoffe. Nach Messungen an flüssigen Medien und Polymeren wendeten sie ihr Verfahren an Zementleim an. Das Messprinzip bestand darin, die Veränderung der Resonanzkurve einer Sonde zu verfolgen, die in das zu untersuchende Material eingetaucht wurde. Anhand der Änderung der Resonanzmerkmale wurde die Entwicklung der rheologischen Eigenschaften des Zementleims charakterisiert.

Der Reflexionskoeffizient an der Grenzfläche zweier unterschiedlicher Stoffe war die Grundlage eines Prüfverfahrens, das ÖZTÜRK et al. [1999] erläuterten. Es wurden zementgebundene Materialien während des Erstarrens und Erhärtens untersucht. Verglichen wurden diese Messungen mit dem mechanischen Eindringwiderstand sowie der Temperaturentwicklung. Betone mit Zusatzmitteln wie Beschleuniger, Verzögerer und Fließmittel sowie mit dem Zusatzstoff Silicastaub wurden ebenfalls untersucht.

Ebenfalls auf der Basis von Reflexion von Ultraschallwellen entwickelte VALIC [2000] eine Methode zur Untersuchung der Hydratation. An diversen Versuchsreihen mit Zementleimen wurden Messungen durchgeführt. Aus dem kontinuierlich gemessenen Reflexionskoeffizient wurde auf den dynamischen Schermodul geschlossen. Neben der Variation des Wasser-Zementwerts, der Zementart, verschiedener Zusatzmittel sowie der Umgebungstemperatur wurden auch die Erstarrungszeiten nach Vicat untersucht (vgl. auch VALIC et al. [1999]).

### 2.3.3 Zusammenfassende Beurteilung der bisherigen Arbeiten

In den für diese Arbeit relevanten o. a. Veröffentlichungen ist der Hydratationsvorgang ebenfalls mittels Ultraschallmesstechnik untersucht worden. Es gelang jedoch nicht oder nur in unbefriedigendem Maße, eine Zuordnung von konkreten Werten der US-Parameter und den Erstarrungszeiten nach Vicat herzustellen. Auch waren Ansätze, den Hydratationsgrad ultraschallmesstechnisch zu erfassen unbrauchbar.

Die nachfolgend aufgezählten Gründe hierfür sind vielfältig und liegen z. T. auch in einer früheren, unzureichenden Mess- und Analysetechnik. So war der untersuchte Frequenzbereich nicht groß genug; die Messungen setzten erst deutlich nach dem Beginn des Hydratationsprozesses ein oder waren im frühesten Hydratationsstadium zu unempfindlich, um Veränderungen in der Schallwellenfortpflanzung erfassen zu können.

Unternommene Korrelationen zu Festigkeitswerten sind aus unterschiedlichen Gründen fragwürdig und wurden daher in der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt. Hingegen gibt es somit weiteren Forschungsbedarf im Bereich der Korrelation von Ultraschallmessungen und den Erstarrungszeiten sowie dem Hydratationsgrad. Des Weiteren ist es bislang nicht gelungen, das hydrationsbedingte Kristallwachstum visuell - also direkt - zu verfolgen. Diese direkte Beobachtungsmethode des Hydrationsvorgangs soll die indirekten Untersuchungen, zu denen auch die US-Messungen gehören, im Hinblick auf gefügemorphologische Abläufe unterstützen.

### 2.3.4 Festlegungen im Hinblick auf die verwendeten Begriffe

Bei der Umwandlung des Zementleims in den Zementstein während der Hydrationsreaktion stellen sich unterschiedliche Gefügestände ein. Diese sollen nachfolgend kurz definiert werden:

#### **Ansteifen**

Sobald die Zementkörner mit dem Anmachwasser in Kontakt kommen beginnt die Hydratation. Die dabei entstehenden Kristalle rufen eine zunehmend starrere Verbindung der einzelnen Zementkörner hervor. Die Folge ist ein anfänglich geringes, sukzessive stärker werdendes *Ansteifen*.

#### **Erstarren**

Erreicht das Ansteifen ein bestimmtes Maß, so spricht man vom sog. *Erstarren*. Dem Erstarren wird in der Baustoffprüfung ein besonderes Augenmerk geschenkt. Messtechnisch werden die beiden Zeitpunkte des Erstarrungsbeginns- und endes mit dem Nadelgerät nach Vicat nach DIN EN 196 ermittelt und dadurch quantifiziert.

#### **Erhärten**

Der Prozess der daran ansetzenden Verfestigung wird als *Erhärten* bezeichnet. Daraus resultiert eine der maßgeblichen Betoneigenschaften: die Festigkeit. Mit Einsetzen des Erhärtungsprozesses kann ohne eine Gefügeschädigung dieser Zustand nicht mehr aufgehoben werden. Eine Suspendierung der Mischung ist jetzt, ohne Mikrorisse zu verursachen, nicht mehr möglich.

Die Übergänge zwischen diesen einzelnen zeitlich aufeinanderfolgenden Zuständen sind fließend. MINDESS und YOUNG [1981] teilen den Hydrationsprozess in fünf Bereiche ein (vgl. Kapitel 4.3).

#### **Reifegrad**

Sowohl die Hydrationsgeschwindigkeit von Zement als auch die zeitliche Entwicklung der mechanischen Eigenschaften (Festigkeit etc.) von Beton hängen von der Lagerungstempera-

tur ab. Diesen Zusammenhang erfasst der sog. *Reifegrad*. Er basiert auf der Annahme, dass Betone gleicher Reife auch gleiche Druckfestigkeitswerte aufweisen. Dies trifft jedoch nur auf Betone mit gleicher Zusammensetzung zu, da in den Formeln zur Ermittlung der Reife kein (Gl. 2.3-1) bzw. nur ein einziger betontechnologischer Parameter (Gl. 2.3-2) Berücksichtigung findet. Die Reifeformel nach SAUL ist die bekannteste und einfachste Beziehung:

$$R_s = \sum (\vartheta_i + 10) \cdot \Delta t_i \quad [^\circ\text{C}\cdot\text{d} \text{ bzw. } ^\circ\text{C}\cdot\text{h}] \quad (\text{Gl. 2.3-1})$$

$\vartheta_i$      *mittlere Betontemperatur*

*im Zeitintervall  $\Delta t_i$  [ $^\circ\text{C}$ ]*

$\Delta t_i$     *Zeitintervall [d bzw. h]*

Die Reife kann also mit der Fläche unterhalb der Temperatur-Zeit-Kurve oberhalb von  $-10^\circ\text{C}$  gleichgesetzt werden. Da jedoch in der Realität höhere Betontemperaturen einen größeren Einfluss auf die Erhärtungsgeschwindigkeit haben, ist es sinnvoll eine Wichtung vorzunehmen. Diesem Umstand wird im Reifegrad nach PAPADAKIS Rechnung getragen:

$$R_p = \sum (\vartheta_i + 10) \cdot \Delta t_i \cdot K^{n_i} \quad [^\circ\text{C}\cdot\text{h}] \quad (\text{Gl. 2.3-2})$$

$K$      *zementabhängiger Beiwert*

*(CEM I      $K=1,2$*

*CEM III      $K=1,4$ )*

$n_i$      *temperaturabhängiger Beiwert*

Der Wichtungsfaktor hängt somit neben der Betontemperatur auch von der Zementart ab. Bei Temperaturen von  $\vartheta \leq 20^\circ\text{C}$  beträgt  $n = 0$ . Damit entspricht der Reifegrad nach PAPADAKIS in diesem Temperaturbereich dem Reifegrad nach SAUL.

### Hydratationsgrad

Der *Hydratations-* und *Reaktionsgrad* werden in Kapitel 4.3 genauer beleuchtet und definiert.

## 2.4 Das Messverfahren

### 2.4.1 Prinzip

Das Ultraschallprüfverfahren, das in der vorliegenden Arbeit zum Einsatz kam und dabei weiterentwickelt wurde, basiert auf dem in Abbildung 2.4-1 dargestellten Prinzip:

In ein *Prüfgefäß* wird das frisch gemischte Material, welches untersucht werden soll, eingefüllt. In festgelegten zeitlichen Abständen wird der sog. *Kugelgeber* ausgelöst. Dabei handelt es sich um einen Schussapparat. In seinem Lauf wird mittels Druckluft eine Stahlkugel mit einem Durchmesser von 4 mm beschleunigt. Diese Kugel trifft dann mit einer Geschwindigkeit von 11,2 m/s auf die Prüfgefäßwand auf und erzeugt ein Schallereignis mit breitem Frequenzspektrum bis zu 100 kHz. Das Signal wird von der Prüfgefäßwand an das frische Material weitergegeben und breitet sich darin aus. Direkt neben dem Kugelgeber ist ein breitbandiger Piezoaufnehmer angebracht (*Aufnehmer 1*). Er nimmt das erzeugte Signal als Referenz auf und gibt es an eine *analog-digitale Messkarte* weiter. Diese wiederum ist mit einem *Rechner* verbunden, der es aufzeichnet. Am zweiten Kanal der Messkarte ist ein weiterer US-Aufnehmer gleicher Bauart angeschlossen (*Aufnehmer 2*). Dieser ist genau gegenüber der Schallquelle an der anderen Gefäßwand platziert. Er nimmt das vom zu untersuchenden Material übertragene US-Signal auf. Nach der Signalerzeugung und einer Verweildauer von ca. 10  $\mu$ s prallt die Kugel von der Wandung ab und wird wieder zurück in den Lauf des Kugelgebers katapultiert. Dort wird sie bis zum Auslösen des nächsten Druckluftstoßes in ihrer Ausgangsposition gehalten. Das beschriebene Messprinzip ist messtechnisch von geringem Aufwand. Komplexer allerdings ist sowohl der sig-

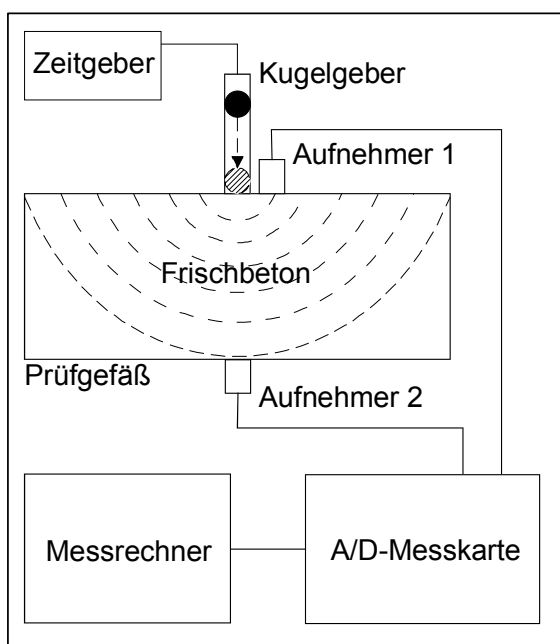


Abbildung 2.4-1: Schema der Ultraschall-Messtechnik.

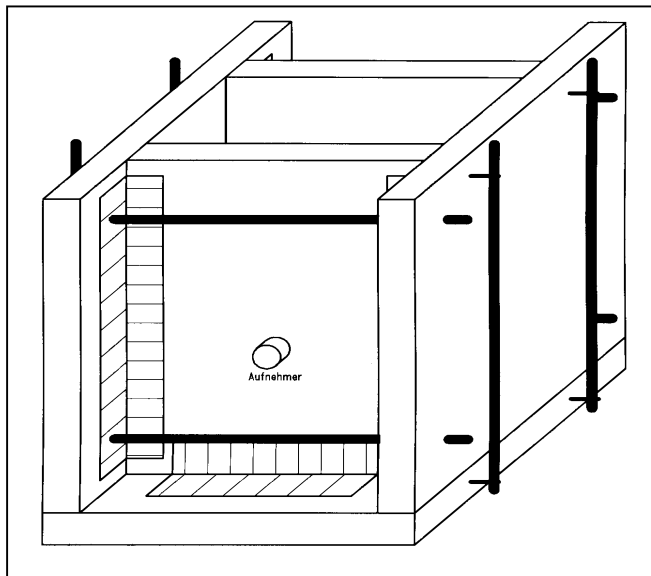
nalerzeugende Kugelgeber als auch die Konstruktion des Prüfgefäßes zur Aufnahme des erstarrenden und erhärtenden Materials. Insbesondere die Anforderungen an dieses Behältnis sind umfangreich. Deshalb wurde das Prüfgefäß sukzessive weiterentwickelt und verbessert (siehe Abb. A-1 und 2 sowie A-11 bis 17 im Anhang).

Mit einer Kalibrierungsmessung vor jedem Test wird der Einfluss des Prüfgefäßes eliminiert. Dazu wird das Gefäß zerlegt und ein direkter Kontakt der beiden Gefäßwände, an denen die Ultraschallaufnehmer angebracht sind, über einen dünnen Wasserfilm hergestellt. In dieser Position wird die vordere Wand mit einem Signal beaufschlagt. Die Zeit, die verstreicht, bis der Ersteinsatz des Signals bei Aufnehmer 2 detektierbar ist, wird dann bei der Auswertung der Messungen entsprechend berücksichtigt; dasselbe gilt für die sogenannte Totzeit der Piezoaufnehmer.

#### 2.4.2 Geräteentwicklung

Für den Bau der Basisversion des Probenaufnahmegefäßes wurden zu Beginn des Forschungsprojektes Polystyrolschaumplatten verwendet. Insbesondere ihre sehr gut dämpfende Eigenschaft zur Vermeidung einer Schallübertragung über die Prüfgefäßwände (Nebenwegübertragung) machten ihre Verwendung interessant. Der Nachteil hingegen war die geringe Dauerhaftigkeit. D. h. das Probengefäß war nicht wiederverwendbar. Es wurde beim Ausschalen des erhärteten Materials zerstört. Die Durchschallungsrichtung war anfänglich vertikal. Zur Anregung und Einleitung der Signale wurde eine dünne Aluminiumplatte auf der Betonoberfläche platziert. Daran war der Referenzaufnehmer befestigt. Auf der Unterseite war in den Gefäßboden der als Empfänger fungierende zweite Aufnehmer eingelassen. Dieser hatte ebenso über eine Platte aus Aluminium Kontakt zum Probenmaterial (Abbildung A-1 im Anhang).

Um den Grad der Wiederverwendbarkeit zu erhöhen, wurden im Folgenden die Styroporgefäßwände durch Platten aus Plexiglas bzw. kunststoffbeschichtete Spanplatten ersetzt. Außerdem wurde durch die modifizierte Konstruktion die Durchschallungsrichtung von der vertikalen in die horizontale geändert. Boden und Wände wurden miteinander mittels Gewindestangen demontabel verbunden. Nach Versuche und nach dem das Probenmaterial erhärtet war, konnte das Gefäß zerlegt und von Betonanhaftungen gereinigt werden. Auf ein Trennmittel (z. B. Schalöl) konnte auf Grund der glatten Oberflächen verzichtet werden. Um die o. a. Schallnebenwegübertragung zu verhindern und eine ausreichende Dichtigkeit im Hinblick auf das flüssige Probenmaterial zu gewährleisten, wurden die einzelnen Wände an den zu stoßenden Kanten mit Dichtungstreifen aus PVC versehen. Das Ultraschallaufnehmerpaar wurde dauerhaft mit Heißkleber auf den PMMA-Wänden fixiert. Die lichten Innenabmessungen des Gefäßes quer zur P-Wellenausbreitungsrichtung wurden so gewählt, dass Reflexionen an den Probenrändern auf Grund ihrer längeren Laufzeit das übertragene Messsignal nicht beeinflussen (Abbildung A-2 im Anhang). Schließlich wurden als letzte kleinere Optimierung die Spanplatten gegen Plexiglasplatten getauscht. Letztgenannte weisen eine höhere Beständigkeit gegen Feuchte-



*Abbildung 2.4-2: Unmittelbare Vorstufe zum z. Z. eingesetzten Prüfgefäß (aus PMMA-Platten).*

einwirkung auf. Des Weiteren stellt die Transparenz des PMMA einen nicht zu vernachlässigenden Vorteil im Hinblick auf die Kontrolle der Verdichtung des eingefüllten Materials dar. Wenn Lufteinschlüsse nach dem Einfüllen und ersten Verdichten sichtbar sind, können diese durch ein ausreichendes Weiterverdichten auf dem Vibrationstisch kontrolliert beseitigt werden. Es ist also immer sichergestellt, dass weder übermäßig verdichtet wird und es dadurch zum Entmischen und Absinken der größeren Zuschlagskörner kommt, noch besteht die Gefahr, beispielsweise bei steifen Betonen Lufteinschlüsse zu übersehen.

### 2.4.3 Auswertung nach Messparametern

Die Kompressionswelle (P-Welle) der gemessenen US-Signale wird bzgl. dreier Parameter ausgewertet: Geschwindigkeit, relative Energie des übertragenen Signals sowie Frequenzspektrum. Alle drei Parameter sind abhängig von der Zeit seit Herstellung des Werkstoffes. Ihr Nullpunkt ist der Zeitpunkt der Wasserzugabe, der als Beginn des Hydratationsprozesses angesehen wird. Die drei Größen bilden zusammen einen vollständigen Parametersatz, der die gesamte über elastische Wellen zugängliche Information des Werkstoffes enthält. Das zeitliche Messraster wurde auf zehn Minuten Intervalle festgelegt.

In Abbildung 2.4-3 ist beispielhaft dargestellt, wie sich die am Aufnehmer 2 ankommenden Signale mit fortschreitender Hydratation des Frischbetons verändern. Das erste Signal wurde 10 Minuten nach Wasserzugabe aufgezeichnet. Die weiteren abgebildeten Signale folgen im Stundenabstand. Deutlich zu erkennen ist, wie die Wellenlänge der „Grundschwingung“ bzw. Trägerwelle abnimmt. Gleichzeitig nimmt der überlagerte Anteil hoher Frequenzen zu. Des Weiteren steigt die Amplitude dieser übertragenen Signale kontinuierlich an.

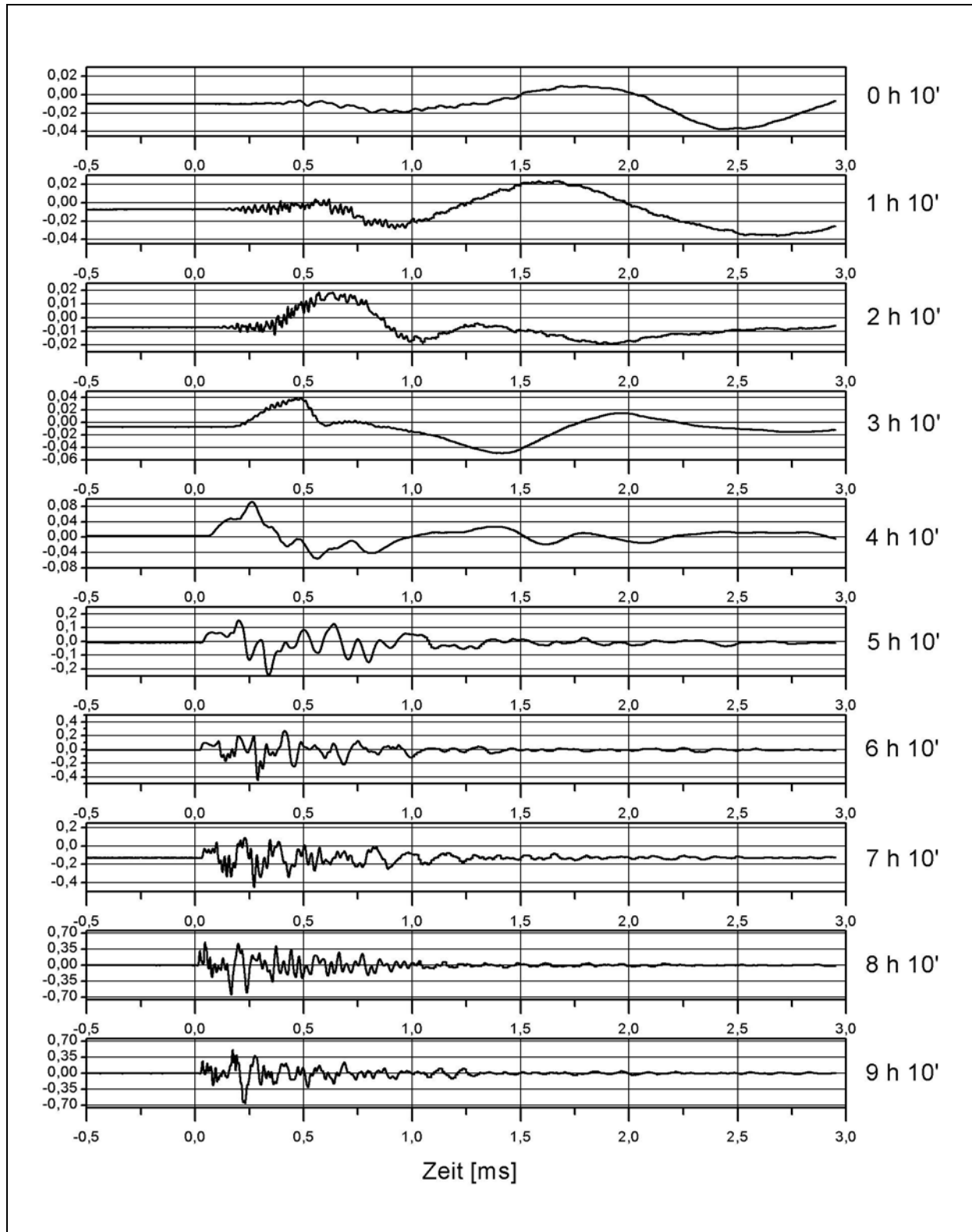


Abbildung 2.4-3: Entwicklung der übertragenen Signale über einen Zeitraum von 9 h am Beispiel eines Frischbetons.

### Geschwindigkeit (Laufzeit)

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der P-Wellen im Werkstoff zum jeweiligen Hydratationszeitpunkt  $t_h$  wird durch den Quotienten aus Laufweg  $s$  und Laufzeit  $t$  der Wellen bestimmt:

$$v_p(t_h) = s / (t(t_h) - t_0) \quad [m/s] \quad (Gl. 2.4-1)$$

Der Laufweg  $s$ , welcher von der Größe des Prüfgefäßes abhängt, ist konstant. Die Laufzeit  $t(t_h)$  der Signale verringert sich mit zunehmender Hydratation des zu prüfenden Materials. Von der ermittelten Laufzeit müssen bei dieser Rechnung noch konstante Anteile für die Laufzeit der Wellen durch die Gefäßwände sowie für die Zeitverzögerung, die durch die Messeinrichtung bedingt ist, abgezogen werden. Diese nicht mit dem Werkstoff in Beziehung stehende Totzeit  $t_0$  des Systems wird durch die o. a. Kalibrierungsmessung ermittelt.

Um die Laufzeit  $t(t_h)$  der Signale zu bestimmen, muss der Ersteinsatz detektiert werden. Dies bedeutet, dass die Ankunftszeit des Ultraschallsignals am Aufnehmer aus den aufgezeichneten Signalen extrahiert werden muss. Dazu wurde eigens ein Algorithmus entwickelt, der auf der partiellen Energie und der Verwendung des Hinkley-Kriteriums basiert. Er ist ein probates und einfaches Mittel zur Ersteinsatzbestimmung. Die Summe der partiellen Energie  $S_i$  eines einzelnen digitalisierten Wellensignals lässt sich als Summe der Amplitudenquadrate  $x_k^2$  wie folgt darstellen:

$$S_i = \sum_{k=0}^i x_k^2 \quad (Gl. 2.4-2)$$

Der Samplepunkt  $i$  entspricht dabei einer bestimmten Zeit während des Signals. Die Ankunft des Signals drückt sich dabei in einem signifikanten Anstieg dieser Energiesumme aus. Für den Algorithmus bedeutet dies, dass das Minimum der Summenkurve aus partieller Energie abzüglich eines entsprechend des Signalrauschens geeigneten negativen Trends  $\delta$  automatisch erkannt werden muss:

$$S'_i = \sum_{k=0}^i x_k^2 - i\delta \quad (Gl. 2.4-3)$$

Dieser Trend kann folgendermaßen dargestellt werden:

$$\delta = \frac{S_N}{\alpha \cdot N} \quad (Gl. 2.4-4)$$



$S_N$  ist die Energie beim letzten Samplepunkt  $N$ . Für den variablen  $\alpha$ -Wert wurde eine automatische Iterationsroutine zur Anpassung an die Signalqualität implementiert.

Abbildung 2.4-4 zeigt das Prinzip der automatischen Detektion der Ersteinsatzzeit zur Bestimmung der Kompressionswellengeschwindigkeit. Beispielhaft ist ein typisches Ultraschallsignal dargestellt. Auf der selben Zeitachse ist die Summe der partiellen Energie des Signals mit drei unterschiedlichen Werten für den Trend eingezeichnet. Daraus lässt sich ableiten, dass für die Bestimmung des Minimums der Energie, entsprechend der Ankunftszeit der Wellen, ein  $\alpha$ -Wert von 5 am geeignetsten ist. Für  $\alpha = 15$  wird der Ersteinsatz zu früh, für  $\alpha = 1$  zu spät gepickt. Weitere Details hierzu sind in [GROSSE & REINHARDT, 1999] zu finden.

### Relative Energie

Die relative Energie  $w(t_h)$  ist definiert als Quotient aus der Wellenenergie, die vom Werkstoff übertragen wird, und der Energie, die durch den Ultraschallimpuls in den Werkstoff eingeleitet wird. Die einzelnen Wellenenergien berechnen sich dabei aus dem Integral der Amplitudenquadrate der jeweiligen Signale. Steht die eingeleitete Energie als Messwert nicht zur Verfügung, so kann diese bei Verwendung eines geeigneten Ultraschall-Gebers als konstant angenommen werden. Wird der Impuls jedoch mit dem Kugelgeber erzeugt, so nimmt ein zweiter US-Aufnehmer, welcher direkt neben der Signaleinleitungsposition angebracht ist (siehe Abb. A-2 bzw. A-16 im Anhang), das Referenzsignal auf. Schwankungen in der Impulserzeugung werden dadurch relativiert.

Mit zunehmender Erstarrung bzw. Erhärtung des Werkstoffes nimmt die relative Energie zu. Als weitere Darstellung des Parameters Energie kann ihr Integral über der Zeit dienen.

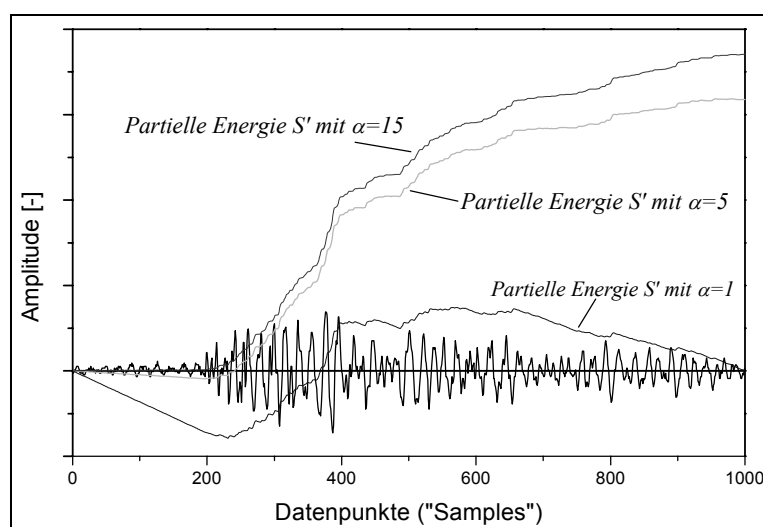


Abbildung 2.4-4: Variation der  $\alpha$ -Werte  
[REINHARDT ET AL.,  
1999].

## Frequenzspektrum

Ist der verwendete Ultraschall-Geber in der Lage, hinreichend kurze Pulse zu generieren, so enthält die gesendete Ultraschallwelle nicht nur eine bestimmte Frequenz. Diese Fähigkeit besitzt der eigens dazu konstruierte Kugelgeber. Es wird ein breites, kontinuierliches Frequenzspektrum bis zu einer bestimmten Grenzfrequenz angeregt, die reziprok zur Impulsdauer ist. Abhängig vom Erstarrungs- bzw. Erhärtungszustand überträgt der Werkstoff verschiedene Frequenzanteile mit unterschiedlicher Amplitude. Im jungen Zustand des Materials werden überwiegend niedere Frequenzen weitergeleitet; mit zunehmendem Alter auch höhere.

Das Spektrum der einzelnen Signale lässt sich mit einer Fouriertransformation bestimmen. Werden diese Einzelspektren auf ihr Maximum normiert und chronologisch aneinandergereiht, ergibt sich eine Diagrammdarstellung gemäß Abbildung 2.4-5. Entweder wird die Amplitude dreidimensional in Richtung der z-Achse aufgetragen (links) oder es erfolgt eine Grauabstufung, die die jeweilige Höhe der Amplitude wiedergibt (rechts). Letztere Darstellungsweise, ein sogenannter Frequenzisoliniplot, ist für eine detailliertere, quantitative Analyse besser geeignet und wurde in der vorliegenden Arbeit verwendet.

## Analyse-Software

Der beschriebene Algorithmus zur Ersteinsatzdetektion wurde zunächst in einem C<sup>++</sup>-Programm mit dem Namen FreshCon implementiert. Mit FreshCon werden die kontinuierlich aufgezeichneten US-Signale nach Abschluss der Messung eingelesen. Nach Eingabe der Grundeinstellungen (Totzeit  $t_0$  der Messeinrichtung, Laufweg  $s$  und div. Filtermoden) erfolgt dann die Bestimmung des Ersteinsatzes, aus dem die Geschwindigkeit  $v_p(t_h)$  automatisch errechnet wird.

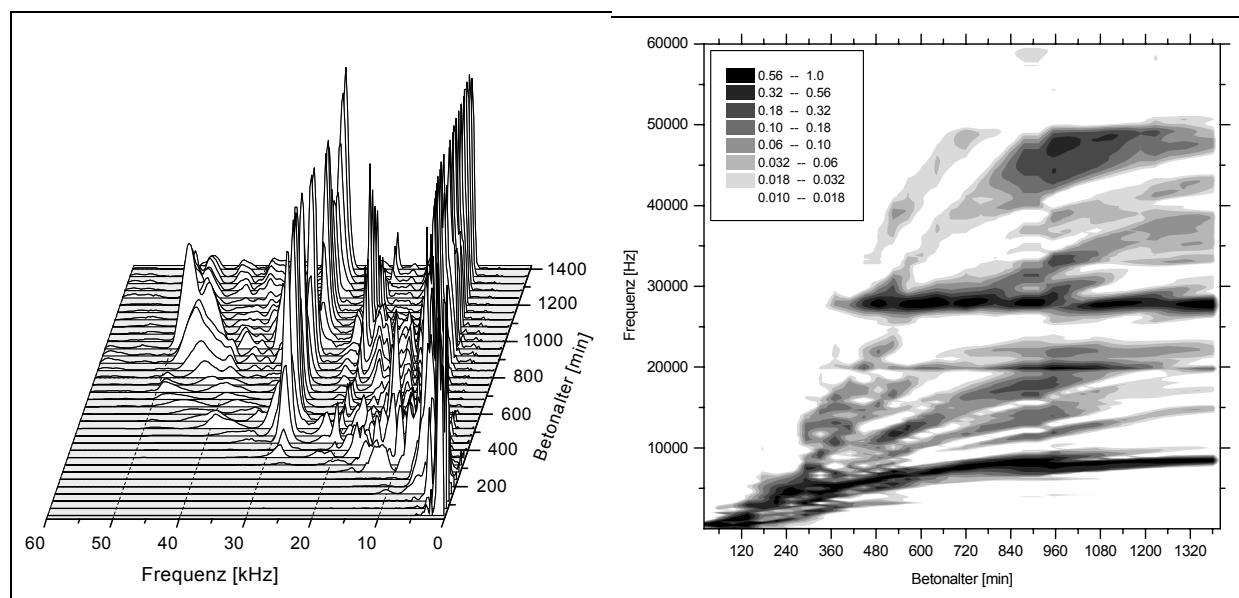
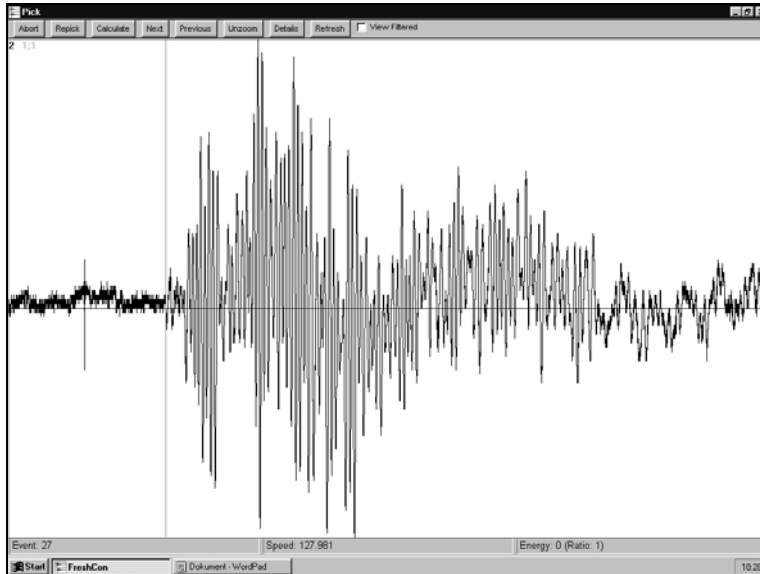


Abbildung 2.4-5: Entwicklung des Frequenzspektrums über die Zeit; links: dreidimensionale Darstellung, rechts: Frequenzisoliniplot [REINHARDT ET AL., 1998].



*Abbildung 2.4-6: Bildschirmansicht des Programms FreshCon [HERB ET AL., 1999].*

Im gleichen Programmschritt wird auch die Energie berechnet. Im vollautomatischen Modus werden sämtliche Messsignale selbsttätig der Reihe nach ausgewertet. In Grenzfällen, wenn z. B. der Signalausabstand sehr gering ist oder u. U. Störsignale mitaufgezeichnet wurden, kann im semiautomatischen Programmbetrieb ausgewertet werden. Der Anwender überprüft dann visuell (Abbildung 2.4-6) die Qualität der Ersteinsatzdetektion und kann sie gegebenenfalls korrigieren. Nach Auswertung des letzten Signals werden in beiden Betriebsmoden diese Ergebnisse in einer vom Programm erzeugten Datei abgelegt.

Für die Weiterverarbeitung und Visualisierung der beiden in FreshCon ausgewerteten Messparameter (Geschwindigkeit und Energie) wird ein gängiges Softwaretool verwendet, das mit Importfiltern, Templates und Macros modifiziert wurde. In wenigen Programmschritten wird dann ein Diagramm erstellt, in dem die Ergebniskurven dargestellt werden.

#### **2.4.4 Ergebnisse, Möglichkeiten, Grenzen**

Es soll nun der Frage nachgegangen werden, wozu das Ultraschallprüfverfahren überhaupt in der Lage ist. Welche Ergebnisse wurden in den bisherigen Experimenten erzielt? An welchen Materialien ergibt sich ein sinnvoller Einsatz? Was kann das Messverfahren nicht leisten und wo sind seine Grenzen?

Generell kann die Motivation, mit dem Ultraschallprüfverfahren Beton zu untersuchen, in zwei Bereiche unterteilt werden. Zum einen ist dies das Interesse, Unterschiede - ob gewollte oder ungewollte - in der verwendeten Rezeptur zu erkennen. Andererseits ist der Hydratationsprozess und seine Verfolgung von Bedeutung.

Zunächst soll der erste Bereich betrachtet werden. Da Beton stark inhomogen ist und seine Mischungsbestandteile sehr vielfältig sind, sind die Variationsmöglichkeiten der Mischungspa-

parameter groß. Dies beginnt beim Verändern des Wasser-Zementwerts, geht über unterschiedliche Größtkorndurchmesser und Sieblinien bis zur Variation von Art und Menge von Zusatzstoffen. Allerdings haben die drei genannten Variablen selbstverständlich auch einen Einfluss auf den Hydratationsverlauf. In Versuchen gelang es einwandfrei unterschiedliche W/Z-Werte (z. B. von 0,40 bis 0,55) nachzuweisen (Abbildungen A-3 und A-6 im Anhang). Bei den Betonmischungen mit den niedrigeren W/Z-Werten zeigte sich ein deutlich schnelleres Ansteigen der Wellengeschwindigkeiten und der übertragenen Energie. Dies war genauso bei den Frequenzverläufen zu beobachten. Die Variation der Sieblinien bzw. der Größtkorndurchmesser (0/8 zu 0/16) machte sich ebenfalls bei den US-Parametern bemerkbar (Abbildungen A-4 und A-7). Ein größeres Größtkorn war analog zu niedrigeren W/Z-Werten für ein schnelleres Erreichen höherer Werte bei Geschwindigkeit, Energie sowie Amplituden entsprechender Frequenzen verantwortlich.

Wie sich der Hydratationsprozess und insbesondere seine Geschwindigkeit verändert, wenn Betonzusatzmittel zum Einsatz kommen, ist hinlänglich bekannt. Auch die Wirkung unterschiedlicher Zementarten gehört dazu. Dass das Ultraschallprüfverfahren Variationen in diesem Bereich und ihren Einfluss auf den Hydratationsverlauf ebenfalls nachweisen kann, zeigen umfangreiche Messreihen (Abbildungen A-5 und A-8 bis A-10). Im Einzelnen wurden u. a. diverse Betonverzögerer in unterschiedlicher Dosierung, Luftporenbildner sowie verschiedene Zemente untersucht. Einzelne Diagramme hierzu sind dem Anhang sowie nähere Details zu den Ergebnissen [REINHARDT et al., 1998] zu entnehmen.

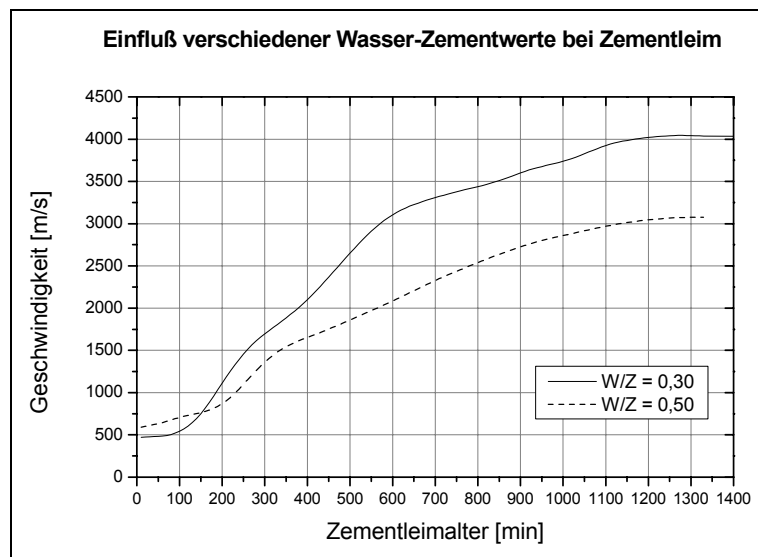
Im Rahmen mehrerer Kooperationen mit der Industrie sowie zahlreicher Diplomarbeiten wurde die US-Messeinrichtung vielfältigen Praxistests unterzogen. Die daraus gewonnenen Erfahrungen konnten in die ständige Weiterentwicklung des Messverfahrens einfließen. Daher wurde noch nicht bei allen US-Versuchen das aktuelle Prüfgefäß eingesetzt, sondern z. T. die in diesem Kapitel beschriebenen *Geräteentwicklungsvorstufen*. Hier werden nun diese Messungen vorgestellt und im Hinblick auf ihre Möglichkeiten für die Praxis bewertet. Ebenso in diesem Sinne interessant sind diverse Messreihen, die in den nachfolgenden Kapiteln behandelt werden.

In Bindemittellaboratorien werden hauptsächlich Zementleime und Mörtel sowie in Kombination damit Zusatzmittel oder -stoffe untersucht. Entweder wird eine solche Einrichtung bei einem Hersteller betrieben oder es handelt sich um ein Institut für die Fremdüberwachung bzw. Zulassungsprüfung. Im erstgenannten Fall sind die Betreiber Zementhersteller oder chemische Betriebe, die Zusatzmittel entwickeln und produzieren.

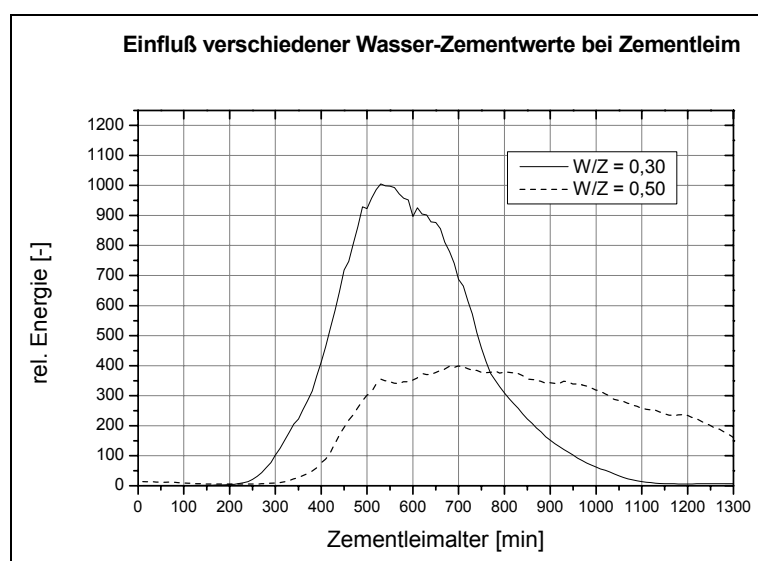
In allen Fällen liegt das Hauptaugenmerk auf dem Hydratationsprozess und seine Beeinflussung durch die in der jeweiligen Mischung verwendeten Komponenten. Die Ergebnisse der nachfolgenden ersten beiden Messungen stammen von einem Zementleim. Variiert wurde der Wasser-Zementwert in einer bewusst hohen Spanne (0,30 bzw. 0,50). Als Zement kam der spä-

ter in Kapitel 5 vorgestellte und eingesetzte CEM I 42,5 N (Holcim Zement, Schweiz) zum Einsatz.

Abbildung 2.4-7 zeigt die Geschwindigkeitsentwicklung über einen Messzeitraum von knapp 24 h. Der niedrigere Wasser-Zementwert ergibt einen steiferen Zementleim, dessen Hydratationsprozess deutlich schneller abläuft. Die Folgen sind ein offensichtlich zügigeres Ansteigen der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit sowie eine höhere Geschwindigkeit am Messende. Der Verlauf der übertragenen Energie ist in Abbildung 2.4-8 dargestellt. Die Mischung mit dem geringeren Wassergehalt überträgt permanent mehr Energie bzw. dämpft die Amplituden viel weniger stark als die Mischung mit dem höheren Wasser-Zementwert. Der starke Abfall im Energieverlauf bei beiden Zementleimen liegt im Schwinden der Probekörper begründet. Dadurch kommt es zu einem Ablösen von den Gefäßwänden und damit - trotz Überbrückung dieses Spalts mittels Wasser - zu einer schlechteren Ankopplung an die US-Aufnehmer. Da kein



**Abbildung 2.4-7:** Geschwindigkeitsentwicklung bei Zementleim.



**Abbildung 2.4-8:** Entwicklung der übertragenen Energie bei Zementleim.

Sand als Zuschlag beigemischt wurde, ist der absolute Betrag, um den sich die Proben verkürzen, deutlich größer als bei den Mörtel- oder gar Betonversuchen.

Es wird deutlich, dass zu steife Zementleime zumindest für den Parameter *rel. Energie* problematisch sein können. Nur in den ersten 10 Stunden werden brauchbare Messwerte geliefert, danach werden die Messwerte unsicher. Bei der Handhabung des Geräts müssen die Grenzen der Anwendbarkeit beachtet werden. Allerdings bietet das US-Verfahren mit seinen drei Parametern in diesem Fall Ausweichmöglichkeiten auf die übrigen beiden Messgrößen *Geschwindigkeit* oder *übertragene Frequenz*. Um die Lesbarkeit zu erhalten, sind die zugehörigen großformatigen Frequenzspektren - wie generell in dieser Arbeit - im Anhang (Abb. A-32 und 33) wiedergegeben. Werden die beiden zu dieser Messreihe gehörigen Frequenzisoliniensbilder miteinander verglichen, wird ebenfalls der schneller ablaufende Hydratationsprozess des trockeneren Zementleims sichtbar. Die US-Signale beinhalten frühzeitiger ein breiteres Frequenzspektrum als beim Zementleim mit  $w/z=0,50$ . Auch beim markanten Bereich der Resonanzfrequenz ist bei letztgenannter Mischung eine relevante Amplitude erst ab 5,5 h erkennbar. Hingegen zeigt der Zementleim mit dem Wasser-Zementwert von 0,30 hier schon zwei Stunden früher (3,5 h) eine messbare Amplitude. Allerdings überträgt die *steifere* Mischung anfänglich nur Frequenzen bis knapp 5 kHz im Vergleich zu bis zu 8 kHz bei der *feuchteren* Mischung. Dass der Zementleim mit  $w/z=0,50$  scheinbar ab 6,5 h wieder ganz niedere Frequenzen übertragen soll, wie im Frequenzisoliniensbild zu sehen ist, ist vermutlich auf Messprobleme (s. o.) zurückzuführen. Eine tatsächliche Übertragung über den Zementstein ist eher unwahrscheinlich, da sich jener zu diesem Zeitpunkt bereits wie ein Festkörper verhält.

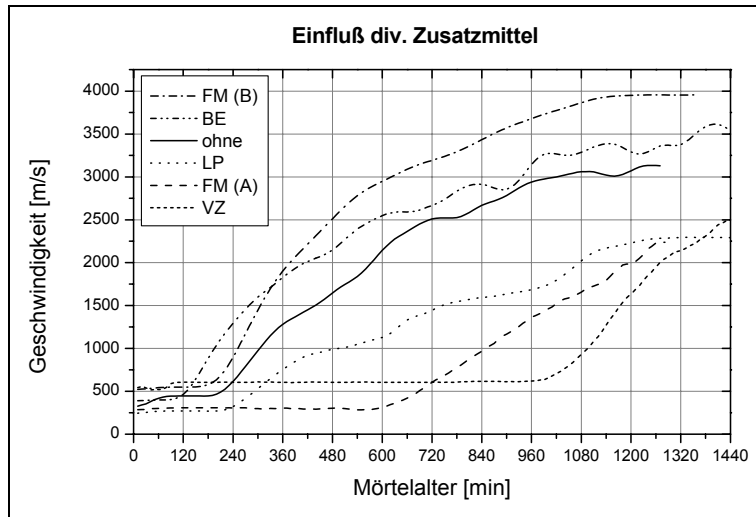
In der nächsten Messreihe wurde näher beleuchtet, inwieweit Unterschiede im Zuschlag-Zementverhältnis vom Ultraschallverfahren detektiert werden können. Dazu wurden drei Mörtel mit dem bekannten Zement (CEM I 42,5 N) unter Verwendung von Normsand hergestellt. Der W/Z-Wert betrug 0,50. Die Variation des Verhältnisses zwischen Normsand und Zement wurde mit den Werten 1,0, 2,0 und 3,0 durchgeführt. Die Ergebnisse der drei US-Messparameter sind im Anhang (Abb. A-34 bis 38) abgedruckt. Das Verhältnis von 3:1 entspricht den in der Norm festgelegten Mischungsparametern zur Bestimmung der Zementfestigkeit (Druck- und Biegezug-) an den bekannten Mörtelprismen. Dazu ist es hilfreich, sich mit dem Zustandekommen solcher Randbedingungen in der Norm zu beschäftigen. Die verantwortlichen Ersteller einer Norm, die eine solche technologische Prüfung festlegen, sind bestrebt, die bestmöglichen Randbedingungen festzulegen. Das bedeutet für unseren Fall, dass mit diesem Mischungsverhältnis von 3,0 die besten Festigkeitswerte erzielt werden können. Diese Vorkenntnis ist notwendig, wenn die Messergebnisse dieser Versuchsreihe richtig verstanden werden sollen. Denn die Mischung mit dem Zuschlag-Zementverhältnis von 3,0 erzielt beim US-Parameter *Wellengeschwindigkeit* den höchsten Endwert nach 24 h. Zu Beginn der Messung ist es genau umgekehrt. Das liegt daran, dass der Mörtel mit dem Verhältnis 1:1 den höchsten Wasseranspruch unter den drei Mischungen hat. Dadurch ist der Frischmörtel während der ersten drei Stunden am steifsten.

Das wiederum verursacht eine recht hohe Anfangsgeschwindigkeit der Wellen. Allerdings ist ein Ansteigen der Geschwindigkeit erst nach ca. 3,5 h zu verzeichnen. Der Mörtel mit dem ausgewogenen Verhältnis von 3:1 hingegen beginnt zwar infolge der erläuterten flüssigeren Anfangskonsistenz mit einer niedrigeren Geschwindigkeit, ein Anwachsen selbiger erfolgt jedoch schon eine Stunde früher (nach ca. 2,5 h). Dass bei der übertragenen Energie der Mörtel mit  $S/Z=1,0$  nach oben ausreißt, konnte nicht zweifelsfrei geklärt werden. Ansonsten sind auch hier die Kurvenverläufe konsistent und passen zur Reihenfolge der Geschwindigkeitsverläufe. Die Messergebnisse der übertragenen Frequenzen bestätigen wiederum die Entwicklungen der US-Geschwindigkeiten. Werden die beiden Frequenzisolinenbilder der Mörtelmessungen mit  $S/Z=3,0$  und  $1,0$  verglichen (Abb. A-36 und 38), so ist ebenfalls der Unterschied in der Hydratationsgeschwindigkeit deutlich wahrzunehmen. Ebenso zu erkennen ist die steife Konsistenz an einem breiteren Anfangsfrequenzband bis knapp 6 kHz im Vergleich zu sonst höchstens 2,5 kHz. (Das etwas steifere Material überträgt anfänglich auch etwas höhere Frequenzen.)

Neben diesen Messreihen, in denen grundlegende Mischungsparameter variiert worden sind, ist die Wirkung von Betonzusatzmitteln, sowie die Sensibilität des US-Verfahrens diese zu detektieren, von Interesse. Die verschiedenen Zusatzmittel wurden Mörteln beigemischt. Die Mischungsverhältnisse betragen im Einzelnen:  $S/Z=3,0$  und  $W/Z=0,5$ . Der jeweilige Wassergehalt der zugegebenen Mittel wurde dabei berücksichtigt. Es wurde kein Normsand sondern ein Sand gemäß der im Anhang (Abb. A-39) abgebildeten Sieblinie (0,125 - 1 mm) verwendet.

Als Zusatzmittel waren ein Beschleuniger, ein Verzögerer, ein Luftporenbildner sowie zwei verschiedene Fließmittel im Messprogramm (FM (A) gehört der neuesten Fließmittelgeneration an). Den Verlauf der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit der jeweiligen Mörtel zeigt Abbildung 2.4-9. Als Referenzmischung wurde ein Mörtel ohne Zugabe eines Zusatzmittels durchschallt. Hervorragend zu erkennen ist das späte Ansteigen der Geschwindigkeit gemessen an der Mischung mit Verzögerer. Dass das Fließmittel (A) seine Wirkung sehr lange (10 h) erhält ist ein Aspekt; der andere ist die ausgezeichnete verflüssigende Wirkung, die an der herabgesetzten Anfangsgeschwindigkeit abzulesen ist. Eine ebenso stark verminderte innere Reibung zwischen den Bestandteilen der Mörtelmischung erzielt ansonsten nur noch der verwendete Luftporenbildner. Sehr aufschlussreich ist auch der Zeitpunkt des Geschwindigkeitsanstiegs der Mörtelmessung unter Zugabe des Beschleunigers. Offensichtlich entfaltet dieses Zusatzmittel seine erstarrungsbeschleunigende Wirkung nach knapp 2 h. Die Referenzmischung zeigt diesen Zeitpunkt, an dem die Geschwindigkeit ansteigt, erst nach ca. 3,5 h.

Die erreichten Endgeschwindigkeiten nach einem halben Jahr sind bei dieser Messreihe besonders interessant. So kann daran abgelesen werden, in wie weit die Zusatzmittel einen Einfluss auf die Feststoffeigenschaften des vollständig erhärteten Mörtels ausüben. Tabelle 2.4-1 zeigt die Ergebnisse hierzu. Relativ betrachtet können hieraus Rückschlüsse auf die erreichten Festigkeiten der Mörtel gezogen werden. Der Wert der Referenzmischung liegt bei knapp über



**Abbildung 2.4-9: Geschwindigkeitsentwicklung bei Mörtel unter Variation diverser Zusatzmittel.**

4000 m/s. Der Beschleuniger hat offenbar nur schwache negative Auswirkungen auf die Feststoffeigenschaften, und der damit hergestellte Mörtel liegt nur knapp unterhalb von diesem Wert. Die mit dem LP erzeugten Luftporen schwächen die Zementmatrix des Mörtels schon deutlich stärker. Bei ihm wird eine mehr als 400 m/s niedrigere Geschwindigkeit gemessen. Noch größer ist der negative Einfluss des FM (A). Die Endgeschwindigkeit des zugehörigen Mörtels liegt bei nur noch 3400 m/s. Offensichtlich strukturverbessernd zeigt sich das Fließmittel (B). Der Gewinn an Ausbreitungsgeschwindigkeit im Festkörper beläuft sich auf 200 m/s. Der Mörtel mit dem zugemischten Verzögerer verdoppelt diesen Zuwachs noch. In Anbetracht des Geschwindigkeitsverlaufs in Abbildung 2.4-8 ist dieser hohe Wert durchaus plausibel. Denn vor Ablauf der 24 h Messdauer überholte der verzögerte Mörtel bereits den Mörtel mit dem LP. Auch die Tendenz ließ eine hohe Endgeschwindigkeit erwarten. Die Ergebnisse der Energieauswertung sind analog zu den Geschwindigkeitsentwicklungen zu bewerten (Anhang Abb. A-36 bis A-38). Um die Analyse dieses US-Parameters zu erleichtern, wurde zusätzlich das Integral gebildet (linear in Abb. A-37 und logarithmisch in Abb. A-42 dargestellt). Die jeweiligen Einflüsse der Zusatzmittel sind klar zu erkennen. Werden die ebenfalls im Anhang (Abb. A-43 bis A-48) abgebildeten Frequenzspektren analysiert und untereinander verglichen, so ist bei den Mischungen mit FM (A) und VZ wieder die angesprochene verzögernde Wirkung gut zu erkennen. Letztgenannter Mörtel weist außerdem eine geringfügig höhere Bandbreite der Anfangsfrequenzen auf. Das Auftreten dieses Phänomens stimmt mit den Geschwindigkeitsverläufe in Abbildung 2.4-9 überein. Auch die Wirkung des Beschleunigers spiegelt sich im schnelleren Übertragen eines breiteren Frequenzbandes wieder. Wie unterschiedlich die beiden Fließmittel

**Tabelle 2.4-1: Endgeschwindigkeiten nach einem halben Jahr der Mörtelserie mit Zusatzmitteln.**

Zusatzmittel	FM (B)	BE	ohne	LP	FM (A)	VZ
$v_{183\text{ d}}$ [m/s]	4250	3900	4050	3600	3400	4500



auf die Schallübertragung und somit auf die Festkörperentwicklung der Mörtel wirken, spiegeln die Frequenzisolinienviertel wieder.

Zusammenfassend kann auf die sehr guten Möglichkeiten hingewiesen werden, die das Ultraschallprüfverfahren im Hinblick auf die Wirkungsüberprüfung von Zusatzmitteln besitzt. Kein anderes Prüfverfahren kann vergleichbar transparent und zeitnah das Funktionieren dieser chemischen Mittel im Zusammenhang mit dem Hydratationsprozess klären. Wie außerdem gezeigt wurde, können auch ganz spezifische Eigenschaften *aufgedeckt* werden. Dies wurde beispielsweise durch die Entdeckung der verzögernden Wirkung des verwendeten Luftporenbildners offenbar.

Aus der Gesamtheit der vorangegangenen Messserien wird die Bedeutung des US-Verfahrens für den Einsatz im Bindemittellabor offensichtlich. Die Möglichkeiten, die das Verfahren bei der Entwicklung von Zusatzmitteln bzw. Zementen bietet, sind vielfältig.

Auch wenn manche der hier gezeigten Ergebnisse im Hinblick auf eine Druckfestigkeitsabschätzung vielversprechend erscheinen, so muss dieses Ziel verworfen werden. Zu viele Mischungsparameter der Betonrezeptur beeinflussen die Schallwellenausbreitung im erhärtenden Zustand. So spielen beispielsweise nicht nur Größe und Kornverteilung eine Rolle. Auch die Art der Zuschläge – ob gebrochenes oder rundes Korn, Rohdichte etc. – wirken auf die Wellenfortpflanzung ein. Ein auf dem Markt befindliches Gerät beispielsweise, das eine Prognostizierung der Druckfestigkeit verspricht, erfordert eine derart große Flut an Eingabeparametern (z. B. die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit der jeweiligen Zuschlagkörner), dass die Praktikabilität in Frage zu stellen ist.

Zweck einer auf Ultraschall basierenden Prüfeinrichtung muss es sein, das hochempfindliche Reagieren auf Mischungsunterschiede oder auf Dosierungsvariationen bei der Zugabe von Zusatzmitteln oder –stoffen im Praxiseinsatz nutzbar zu machen.

### 3 Weiterentwicklung des Prüfverfahrens

#### 3.1 Praktische Anwendbarkeit – Verbesserungen in der Handhabbarkeit

Ausgangspunkt der Weiterentwicklung ist das Prüfgefäß, wie es im vorausgegangenen Kapitel beschrieben wurde (Abbildung A-11 im Anhang). Es handelte sich um ein Behältnis, das aus vier Wänden und einem Boden aus Plexiglas (PMMA) besteht. Fixiert wurden die Gefäßwände mit Aluminiumschienen und Gewindestangen. Die Innenmaße des Behälters ergaben ein Volumen von ca. zwei Litern und eine Probendicke, die durchschallt wurde, von 60 mm. Die Kontaktflächen zwischen den PMMA-Platten wurden mittels Dichtungsgummis akustisch entkoppelt und abgedichtet. Sie mussten vor jeder Messung erneuert werden.

##### 3.1.1 Prüfeinrichtung für Zementleim und Mörtel

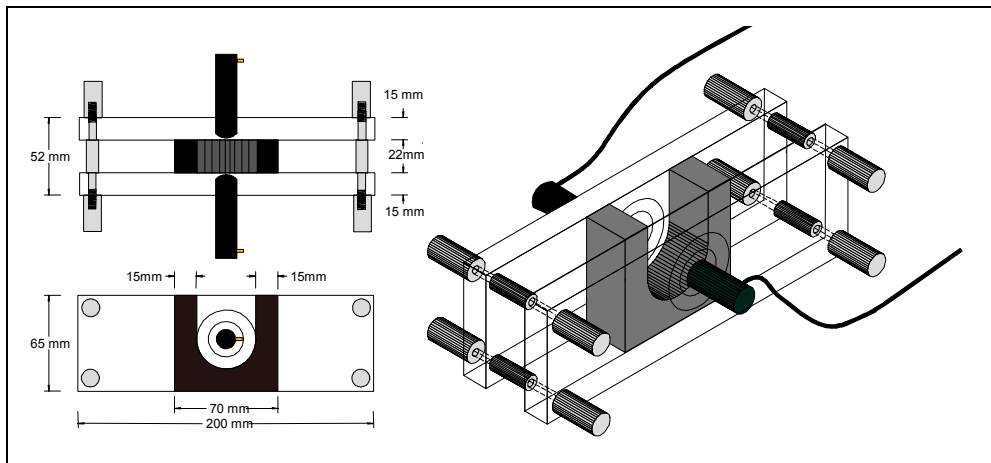
Soll das Prüfverfahren im Bindemittellabor zum Einsatz kommen, spielt die Materialmenge eine wichtige Rolle. Auf der einen Seite soll sowohl aus ökologischen als auch aus ökonomischen Gründen möglichst wenig Abfall durch Baustoffprüfungen entstehen. Zum anderen ist es vorteilhaft, wenn Restmengen, die bei anderen Prüfungen anfallen, verwendet werden können. Bei einer erforderlichen Menge von knapp zwei Litern kann aber keinem dieser beiden Gesichtspunkte Rechnung getragen werden.

Bei der folgerichtigen Verkleinerung des Prüfgefäßes müssen der Größtkorndurchmesser und eine mögliche Signalübertragung über die Nebenwege – also vorbei am zu untersuchenden Material – berücksichtigt werden. Die Abmessungen der Zuschlagkörner finden deshalb Beachtung bei der Konstruktion des Probenträgers, da ausgeschlossen werden muss, dass im ungünstigsten Fall ein oder mehrere verkeilte Körner direkt durchschallt werden.

Von den Querabmessungen des Gefäßes hängt es ab, wie schnell und wie stark Signale über die Flanken weitergeleitet werden. Diese Nebenwegsschallübertragungen müssen hinsichtlich ihrer Intensität und ihres Ersteinsatzes im Vergleich zum eigentlichen, durch die Probe geleiteten Signal vernachlässigbar gering sein.

Erstgenannter Aspekt hat dazu geführt, dass für die Untersuchungen an Zementleim/Mörtel und Beton zweierlei Probengefäße mit unterschiedlichen Abmessungen entwickelt wurden. Weil bei Zementleim keine und bei Mörtel (per Definition) Zuschlagkörner mit einer maximalen Größe von 4 mm verarbeitet sind, konnte das neue Prüfgefäß sehr klein und handlich konstruiert werden.

Für eine erste Studie im Hinblick auf die angestrebte Miniaturisierung wurden zwei laborübliche Objektträger aus Glas verwendet (Abbildung A-12). Zwischen diesen beiden Glasplättchen wurde ein U-förmiges Styrodur-Formteil als Probenträger geklemmt. Den notwendigen Druck, um das Glas auf den Hartschaum zu pressen, lieferten zwei einfache Gummibänder. Die-



**Abbildung 3.1-1: Bemaßte Ansichten und isometrische Darstellung des Mörtelprüfgefäßes.**

ser sehr simple aber funktionsfähige erste Konstruktionsansatz war hinsichtlich der verwendeten Materialien und im Hinblick auf die Probenraumgröße zwar verbesserungswürdig aber durchaus erfolgversprechend. Wie auf dem im Anhang abgebildeten Foto zu erkennen ist, ist insbesondere das Styrodur, was seine Dichtwirkung am Übergang zur Glaswandung angeht, nicht optimal. Es wurde schließlich durch ein Formteil aus Moosgummi ersetzt. Auch die Abmessungen der Gefäßwände, vorgegeben durch die Größe der Objektträgerplättchen, waren nicht ganz befriedigend. Die bislang verwendeten Piezoaufnehmer sollten auf Grund ihrer zweckoptimalen Charakteristik sowie ihrer guten Robustheit wieder zum Einsatz kommen. Wegen ihrer Größe war eine Befestigung an den kleinen Glaswänden problematisch. Demzufolge wurde das Gefäß insgesamt etwas vergrößert. Die Glasplättchen wichen den bekannten PMMA-Platten. Diese hatten sich in den vorausgegangenen Versuchsreihen bzw. Gefäßvarianten durch ihre Dauerhaftigkeit sowie Stoßfestigkeit und gleichzeitige ausreichende Transparenz (vgl. Kapitel 1) bewährt.

Abbildung 3.1-1 bzw. Abbildung A-13 im Anhang zeigen die aktuelle Version des Mörtelprüfgefäßes. Vier Rändelschrauben aus Edelstahl fixieren in einem definierten Abstand von 22,3 mm zwei Platten (je 200x65x15 mm<sup>3</sup>) aus PMMA. Diese Wände weisen jeweils eine spezielle Fräsung auf, in welche die Ultraschallaufnehmer eingelassen sind. Zwischen diesen transparenten Platten sitzt der eigentliche Probenträger. Er ist aus einem weichen, U-förmigen Zellgummi und erzeugt eine ausreichende Dämpfung und Dichtwirkung. Das durchschallbare Volumen beträgt ca. 33 cm<sup>3</sup> und ist somit nur noch etwa 1,8% vom alten Probenvolumen.

Die untersuchte und erhärtete Probe lässt sich sehr leicht und schnell ausschalen, ohne die Form zu beschädigen (Abbildung A-14 und A-15). Nicht zuletzt die einfache Verbindung mit den Rändelschrauben verbessert deutlich die Handhabbarkeit dieses robusten und dauerhaften Prüfgefäßes.

Auf Grund der Größe des Prüfgefäßes aber auch wegen des geringeren Aufwandes in der Messtechnik werden die US-Signale beim Mörtelprüfverfahren von einem US-Generator erzeugt. Aufnehmer 1 fungiert daher als Sender. Die Aufzeichnung der Messsignale erfolgt somit

einkanalig. Ein Vorteil im Vergleich zur Generation der Signale mittels Kugelgeber ist die Konstanz der eingeleiteten Energie in die Proben. Die Relativierung zwischen Sender- und Empfängersignal beim US-Messparameter *übertragene Energie* entfällt damit. Nachteilig hingegen ist, dass infolge der anderen Charakteristik der elektrisch generierten Schallereignisse eine Auswertung hinsichtlich des übertragenen Frequenzspektrums unterbleibt.

### 3.1.2 Prüfeinrichtung für Beton

Die Abmessungen für ein Probengefäß zur US-Untersuchung von Frischbeton müssen sich in erster Linie, wie oben erläutert, am verwendeten Größtkorn des Betonzuschlags orientieren. Aber auch hier ist eine Reduzierung der Probenentnahmemenge interessant und möglich. In Anlehnung an die Probenform für Mörtel/Zementleim entstand der Betonprobenträger (Abbildung 3.1-2 bzw. Abbildung A-16 im Anhang). Dieser hat im Vergleich zum zuvor beschriebenen Prüfgefäß andere Abmessungen. Die Dicke der Probe beträgt ca. 58 mm. Damit können problemlos Betone mit größeren Zuschlagkörnern (min. 16 mm) geprüft werden. Aus statischen Gründen ist der U-förmige Probenträger aus zwei unterschiedlichen Materialien zusammengesetzt. Das Zellgummi ist für eine ausreichende Dichtigkeit am Übergang zu den Gefäßwänden und der PUR-Schaum für eine stabile Aufnahme des Gewichts der Probe (ca. 870 g) zuständig. Das zu befüllende Volumen ergibt  $378 \text{ cm}^3$ . Das entspricht 21 % des alten Probenvolumens.

Nach wie vor erfolgt die Erzeugung der Signale beim Betonprüfverfahren durch den Kugelgeber. Dies hat zwei Gründe. Erstens bietet das Betonprüfgefäß genügend Platz auf der Gefäßwand, damit der Kugelgeber angesetzt werden kann. Und zweitens ist zur Durchschallung von knapp 6 cm Frischbeton ein Signal mit hohem Energieinhalt erforderlich. Der beim Mörtelprüfverfahren eingesetzte US-Generator würde mit seinen deutlich schwächeren Signalen einen Vor-

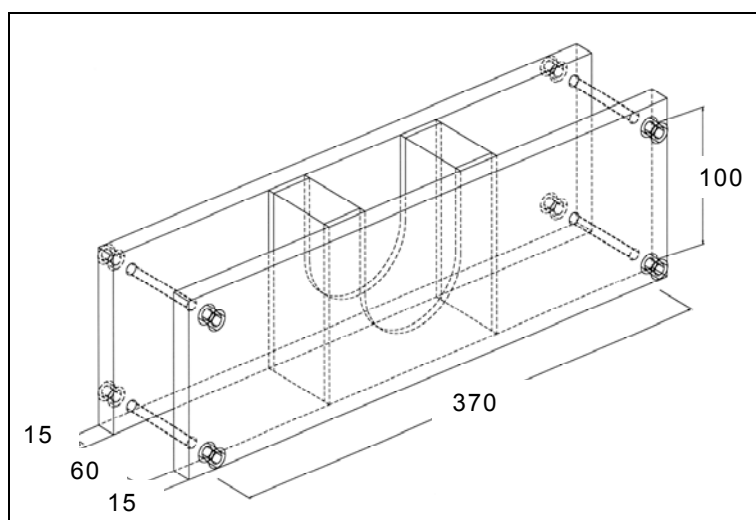


Abbildung 3.1-2: Bemaßte isometrische Darstellung des Betonprüfgefäßes [mm].

verstärker zwischen Piezoaufnehmer und Messkarte erforderlich machen. Eine höhere Anzahl elektronischer Bauteile in der Messkette ist jedoch für die Qualität der Messsignale wenig förderlich.

Somit werden bei dieser Messtechnik zwei Kanäle (Referenzaufnehmer / Empfängeraufnehmer), vergleichbar mit den früheren Messungen, aufgezeichnet. Die Analyse des Frequenzspektrums ist auf Grund der Signalgenerierung mit dem Kugelgeber ebenfalls möglich.

### 3.2 Mess- und Analysesoftware

Unter der grafischen Programmiersprache LabVIEW (National Instruments) wurde von RUCK et al. [2000] das Programm FreshCon vollständig neuerstellt. Ein großer Vorteil dieser Version FreshCon 2.0 ist, dass die Auswertung und die Visualisierung der Ergebnisse mit nur noch einem Programm ausgeführt werden. Außerdem – und das stellt einen weiteren Schritt in der Optimierung der Benutzerfreundlichkeit dar – können die Ergebnisse der Messparameter online im gleichen Ausgabefenster (Abbildung 3.2-1) dargestellt werden, in dem auch die Ersteinsatzdetektion erfolgt. Letztgenannte ist in dem Diagrammfenster links oben zu sehen. Dargestellt ist das gerade aktuelle Messsignal zum Zeitpunkt  $t_h$ , das vom erhärtenden Material übertragen und von der Messkarte aufgezeichnet wurde. Das Diagramm rechts daneben zeigt die seit Beginn der Messung chronologisch aneinandergereihten Ergebniswerte der mittels Ersteinsatz berechneten *Wellengeschwindigkeit* sowie der *übertragenen Energie*. Im Ausgabefenster unter der *Signalform* sind die Frequenzen des aktuellen Signals spektral abgebildet. Wenn diese *Frequenzspektren* der einzelnen Messsignale ebenfalls zeitlich hintereinander aufgetragen werden, ergibt sich der *Frequenzisolinienplot* rechts.

Damit ist es erstmals möglich, während der Messung die *Entwicklung* aller drei Messparameter ( $v_p(t_h)$ ,  $E(t_h)$  und  $f(t_h)$ ) zeitgleich mitzuverfolgen.

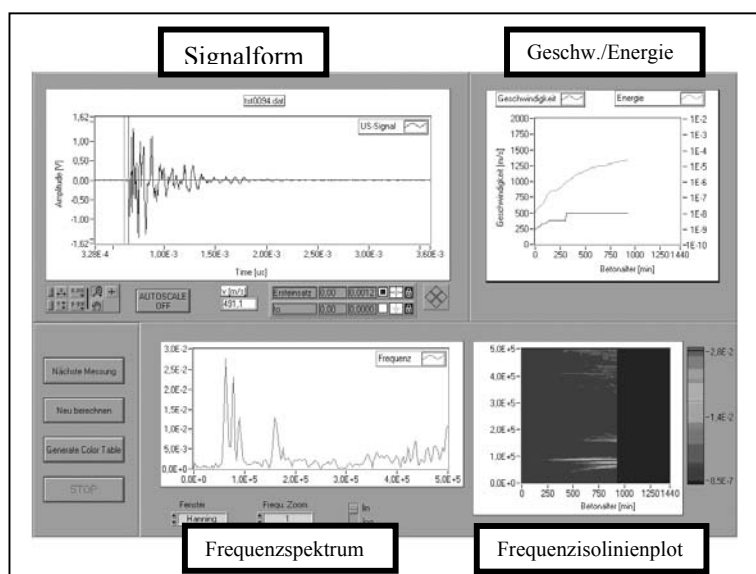


Abbildung 3.2-1: Bildschirmsicht  
FreshCon 2.0  
[RUCK ET AL., 2000].

Ein anderer Aspekt, der die Verbesserung des Prüfverfahrens betrifft, liegt in der Regelung der Messkarte. Bislang musste die Messempfindlichkeit manuell eingestellt werden. Dadurch dass im Laufe der Messung die Amplituden der Signale kontinuierlich anstiegen, war es notwendig, dass die Messung ständig beaufsichtigt worden ist. Sobald die Amplituden im Begriff waren, größer als der eingestellte Messbereich zu werden, musste dieser nachgeregelt werden. Andernfalls wurden die Signale an ihren Amplitudenspitzen abgeschnitten. Für die Ermittlung des Ersteinsatzes und damit der Wellengeschwindigkeit war dies von untergeordneter Bedeutung. Nicht so bei der Bestimmung der übertragenen Energie. Durch das Abschneiden der Signal-Peaks entstand das Problem, dass ein gewisser Anteil an Energie verloren geht.

Die neue Messsoftware ist nun in der Lage, selbstständig zu erkennen, wann ein anderer Empfindlichkeitsbereich der Messkarte eingestellt werden muss. Das Nachregeln erfolgt dann automatisch.

Bei der Interpretation der bisherigen Energieverläufe ist daher zu berücksichtigen, dass durch die manuelle Messkartenregelung die Energiebeträge z. T. beeinträchtigt worden sind. Die Gründe dafür sind folgende: Die Messdauer betrug bei Messungen, bei denen Zemente mit normaler oder schneller Hydratationsgeschwindigkeit zum Einsatz kamen ca. 24 h. Die Messung über diese komplette Messdauer zu beaufsichtigen war deshalb unmöglich. Zwar wurde versucht sämtliche Messungen früh morgens zu starten, damit gegen Abend der endgültige Empfindlichkeitsbereich an der Messkarte eingestellt werden konnte. Dies war aber nicht immer möglich. Auch konnte oft erst am darauffolgenden Morgen erkannt werden, ob tatsächlich der richtige Messbereich eingestellt worden war. Wurde aus Vorsicht ein zu unempfindlicher Bereich gewählt, so war die Empfindlichkeit für die Signale zu schwach. Genauso fatal war die Einstellung eines für die anwachsenden Amplituden zu empfindlichen Bereichs. Des weiteren musste schließlich zum Zeitpunkt, an dem die Messung sich selbst überlassen worden ist, vorausschauend eine Empfindlichkeitsstufe ausgewählt werden. Dadurch mussten meistens mehrere Zwischenstufen der Messkarte übersprungen werden. Leider machte sich dieser Sprung ebenfalls in den Energieverläufen bemerkbar.

Damit wird deutlich, wie groß die Notwendigkeit einer vollautomatischen Steuerung der Messung war. Die neue Mess- und Analysesoftware kann dies erstmalig leisten. Sie verbessert so nicht nur die Handhabbarkeit und spart Arbeitszeit ein, sondern erhöht die Qualität der aufgezeichneten Ultraschallmessparameter.

### 3.3 Signalauswertung - Impedanz

Ein neuer Ansatz in der Auswertung der Messsignale hat seine Grundlage in der Theorie der Ausbreitung eindimensionaler elastischer Wellen in Stäben. Stellen wir uns eine P-Welle vor, die sich durch eine definierte Querschnittsfläche hindurch in einem bestimmten Medium ausbreitet. Gelangt die Welle an einen Ort, an der sich die Fläche quer zur Ausbreitungsrichtung sprunghaft verändert, so wird ein Teil von ihr reflektiert. In Abbildung 3.3-1 ist das Prinzip schematisch dargestellt.  $\sigma_i$  ist die Intensität der Welle bzw. Teilwelle.  $A_2$  ist der im Vergleich zu  $A_1$  verringerte Querschnitt. Findet am Querschnittssprung außerdem auch ein Materialwechsel statt, so sind zusätzlich die sich ändernden Materialkonstanten  $\rho_i$  (Dichte) und  $c_i$  (Ausbreitungsgeschwindigkeit im jeweiligen Medium) zu berücksichtigen.

[ZUKAS ET AL. 1982]

Zwei Bedingungen an der Grenzfläche müssen erfüllt sein:

- I. Energieerhaltungssatz bzw. Kräftegleichgewicht und
- II. Teilchengeschwindigkeiten (Auslenkung  $v$ ) müssen stetig sein.

Aus Bedingung I ergibt sich:

$$\sigma_I + \sigma_R = \sigma_T \quad \text{bzw.} \quad A_1(\sigma_I + \sigma_R) = A_2 \sigma_T \quad (\text{Gl. 3.3-1})$$

Bedingung II hat zur Folge:

$$v_I - v_R = v_T \quad (\text{Gl. 3.3-2})$$

Wird berücksichtigt, dass  $\sigma = \rho c v$  ist, lässt sich (Gl. 3.3-2) umformen in:

$$\frac{\sigma_I}{\rho_1 c_1} - \frac{\sigma_R}{\rho_1 c_1} = \frac{\sigma_T}{\rho_2 c_2} \quad (\text{Gl. 3.3-3})$$

Wird nun unter Verwendung von (Gl. 3.3-1) nach  $\sigma_T$  bzw.  $\sigma_R$  aufgelöst, erhält man in Abhängigkeit von der Intensität der eingeleiteten Welle  $\sigma_I$ :

$$\sigma_T = \frac{2A_2\rho_2c_2}{A_1\rho_1c_1 + A_2\rho_2c_2} \sigma_I \quad (\text{Gl. 3.3-4})$$

$$\sigma_R = \frac{A_2\rho_2c_2 - A_1\rho_1c_1}{A_1\rho_1c_1 + A_2\rho_2c_2} \sigma_I \quad (\text{Gl. 3.3-5})$$

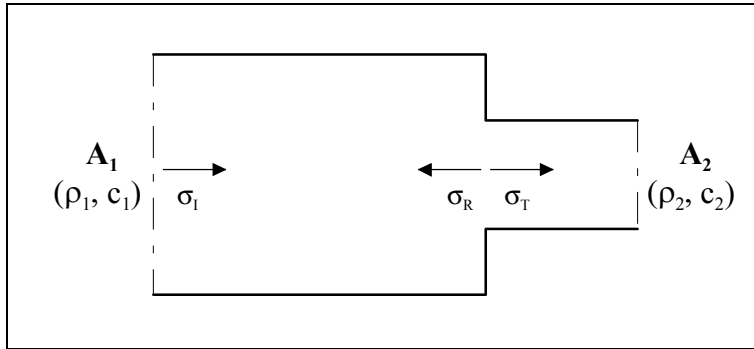


Abbildung 3.3-1: Wellenreflektion und -transmission am Querschnittsprung.

Handelt es sich ausschließlich um eine Veränderung des Querschnitts und ist also das Material vor dem Querschnittsprung das selbe wie danach, dann sind  $\rho_1 = \rho_2$  und  $c_1 = c_2$ . Dadurch vereinfachen sich  $\sigma_T$  und  $\sigma_R$  zu:

$$\sigma_T = \frac{2A_2}{A_1 + A_2} \sigma_I \quad (\text{Gl. 3.3-6})$$

$$\sigma_R = \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} \sigma_I \quad (\text{Gl. 3.3-7})$$

Aus (Gl. 3.3-6) lässt sich die relative Energie herleiten:

$$\text{rel. Energie} = \frac{\sigma_T}{\sigma_I} = \frac{2A_2}{A_1 + A_2} \quad (\text{Gl. 3.3-8})$$

Auf unser Ultraschallprüfverfahren übertragen, ist  $A_1$  die Fläche, über die das Signal in das zu untersuchende Material eingeleitet wird. Da zu Beginn des Erstarrungsvorgangs der Schallübertragungsweg nur aus wenigen untereinander verbundenen Kristallstrukturen besteht, ist die Querschnittsfläche  $A_2$ , durch die das Signal übertragen wird, klein. Mit fortschreitender Hydratation vergrößert sich  $A_2$ .

Die relative Energie  $E_{rel.}$  als eine der drei Messgrößen der Ultraschallprüfung kann nach Umwandlung letztgenannter Gleichung (Gl. 3.3-8) auch dargestellt werden als:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{E_{rel.}}{2 - E_{rel.}} \quad (\text{Gl. 3.3-9})$$

Am Beispiel von drei unterschiedlichen Betonmischungen wird nachfolgend die Impedanzentwicklung gezeigt. Verwendet wurde für alle drei Betone eine Sieblinie A/B 16, ein W/Z-Wert von 0,50 sowie ein Zementgehalt von 320 kg/m<sup>3</sup>.



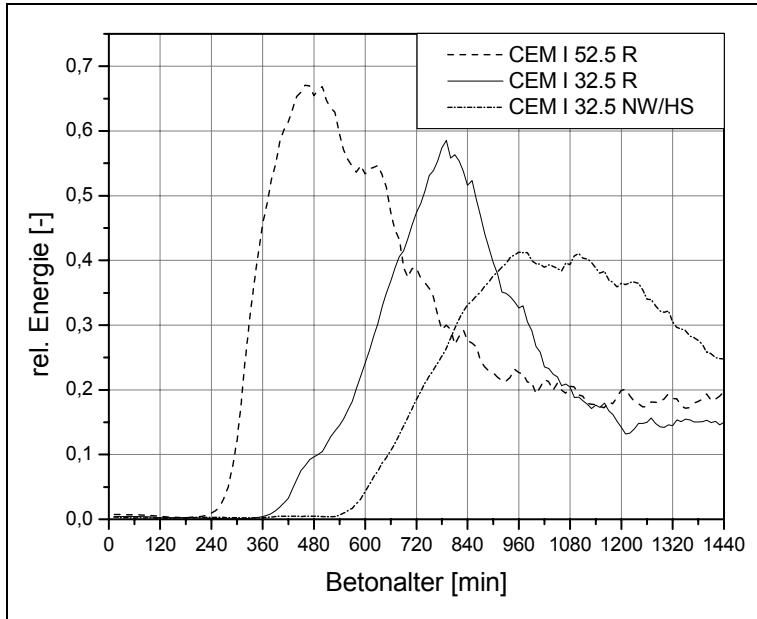


Abbildung 3.3-2: Entwicklung der rel. Energie dreier Betone.

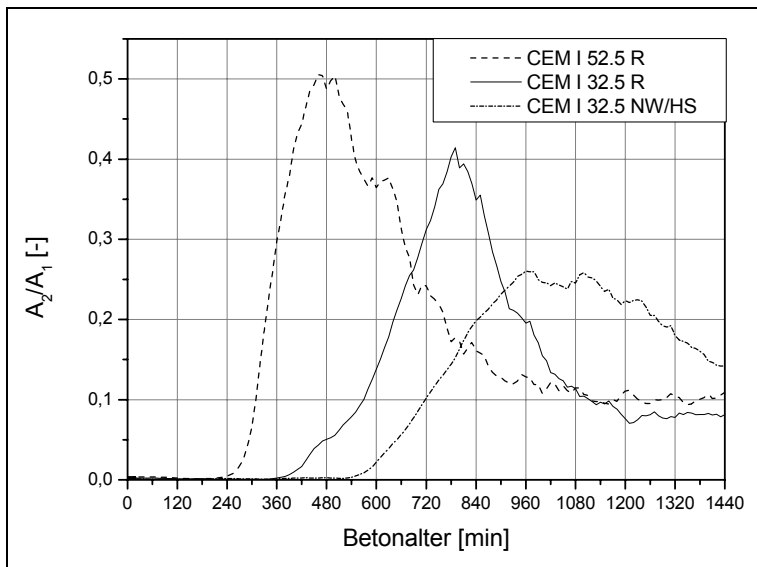


Abbildung 3.3-3: Entwicklung des Übertragungsquerschnitts über das Betonalter.

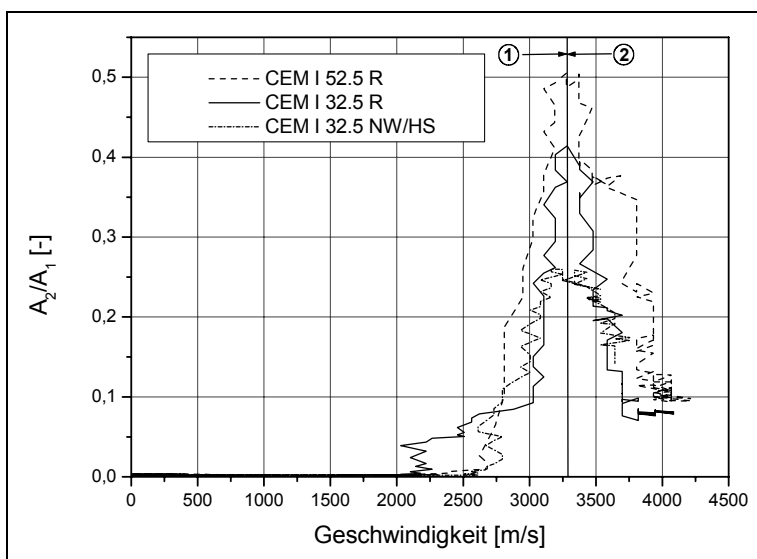


Abbildung 3.3-4: Entwicklung des Übertragungsquerschnitts über die Geschwindigkeit.

In Abbildung 3.3-2 ist der Verlauf der rel. Energie über das fortschreitende Betonalter dargestellt. Bei allen drei Messungen ist zunächst ein Anstieg der übertragenen Energie ab einem bestimmten Zeitpunkt zu erkennen. Die Größe der jeweiligen Steigung und die entsprechende Hydratationsgeschwindigkeit sind konsistent. Nach Erreichen eines Maximums folgt wieder ein Abfallen der Energiewerte. Dieser Zeitpunkt korreliert mit dem Austrocknen der Probekörper. Zwar wurde versucht, dem damit verbundenen Ablösen des Materials von den Prüfgefäßwänden mittels eines aufgetragenen Wasserfilms zu begegnen. Jedoch war das Verschlechtern der Ankopplungsbedingungen nicht aufzuhalten. Der Verlauf der Impedanz bzw. des Übertragungsquerschnitts gemäß Abbildung 3.3-3 gleicht, wie zu erwarten, dem Energieverlauf. Er wurde mittels (Gl. 3.3-9) aus der Energie errechnet. Sehr interessant hingegen ist der Verlauf des Übertragungsquerschnitts aufgetragen über die Wellengeschwindigkeit der Signale (Abbildung 3.3-4). Genau dieser beschriebene Energieabfall zeigt hier eine bemerkenswerte Übereinstimmung. Bei einer Geschwindigkeit von 3280 m/s haben alle drei Kurven ihr Maximum. Die Abszisse lässt sich somit in die Bereiche 1 und 2 unterteilen. Der erste Bereich ist gekennzeichnet vom erwartungsgemäßen Verlauf der Kurven. Physikalisch betrachtet, würde das Maximum bedeuten, dass beim Zement CEM I 52,5 R 50 % durchgängige Querschnittsfläche, beim CEM I 32,5 R 40 % und beim CEM I 32,5 NW/HS 25 % vorhanden sind. Beim Bereich 2 hingegen handelt es sich um einen Artefakt mit den oben beschriebenen Ursachen. Daran ist abzulesen, dass der Vorgang des frühen Schwindens beim Erreichen einer ganz bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeit des Betons einsetzt.